

FACULTE ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Publication IBOIS 04:01

INFLUENCE DE DEFAUTS DE CROISSANCE, DES FIBRES TORSSES ET DE L'HUMIDITE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BOIS MASSIF

Essais de compression

Prof. Julius NATTERER
Olivier AGUET



Projet BUWAL 2000.16

Janvier 2004

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2
1 BUT DE CETTE RECHERCHE	3
2 ESSAIS DE COMPRESSION	3
2.1 Dispositif d'essai	3
2.2 Type de tronc.....	5
2.3 Déroulement de l'essai, détermination des déplacements u et v	6
2.3.1 Déplacements axial u et transversal v	6
2.3.2 Calcul théorique du déplacement axial u	7
2.3.3 Calcul théorique du déplacement transversal v	8
2.3.4 Théorie de la torsion uniforme	9
2.4 Résultats des essais de compression.....	10
2.4.1 Résultats du tronc n°1	10
2.4.2 Résultats du tronc n°2	11
2.4.3 Comparaison des caractéristiques mécaniques avec le Sylvatest-Duo.....	12
2.4.4 Moment de torsion obtenu lors de l'essai de compression.....	13
2.5 Commentaires des résultats des essais de compression	14
2.5.1 Tronc n°1.....	14
2.5.2 Tronc n°2.....	15
3 SYNTHESE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	16
4 ANNEXES	17
Essais non-destructifs	17
Essais de compression des deux troncs	17
Annexe 1.....	18
Annexe 2.....	19
Annexe 3.....	20
Annexe 4.....	21
Annexe 5.....	22
Annexe 6.....	23
Annexe 7...	24
Annexe 8...	
Annexe 9.....	26
Annexe 10.....	27
Annexe 11...	28

1 BUT DE CETTE RECHERCHE

Dans le cadre de l'exposition universelle 2000 à Hanovre une structure en bois de grandes dimensions était en construction. Innovatrice, elle se compose de plusieurs coques en bois supportées par des piliers constitués de troncs d'arbres non équarris. Le calcul de ces piliers a été fait avec les règles usuelles de calcul (Normes DIN, SIA, Eurocode).

Selon diverses expériences, les valeurs de résistance du bois rond non équarri sont bien supérieures à celles couramment recommandées par les normes qui sont trop conservatrices.

Le but de cette recherche est de réaliser des **essais de compression axiale sur des troncs** identiques à ceux utilisés à Hanovre, mais avec **des fibres torsées**, afin de déterminer le comportement réel du bois utilisé et afin de définir des valeurs de référence plus réalistes et conformes à la réalité du matériau.

L'on désire par cette étude, mettre en évidence certains avantages du bois rond massif non équarri par rapport aux bois façonnés, afin de sensibiliser les producteurs et les utilisateurs potentiels d'un tel produit.

2 ESSAIS DE COMPRESSION

2.1 Dispositif d'essai

Ce dispositif d'essai de l'Institut de structures (IS) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ainsi que sa gestion sont reconnus, par accréditation, conformes au cahier des charges et aux exigences qualité de la norme ISO 17025. Les éprouvettes et le dispositif d'essai représentés aux figures 1, 2 et 3 sont également conformes à la norme ISO.

Les appuis bi-articulés à chaque extrémité ont été spécialement conçus pour répondre aux exigences de cette même norme ISO. Le vérin de la presse Trebel permet une charge maximum de 10 MN et un déplacement axial maximum (course) de 250 mm, sur la longueur du tronc testé. La plaque de base au sol permet une rotation autour de l'axe vertical de l'éprouvette (du tronc), tandis que la plaque de base en haut est bloquée autour de ce même axe.

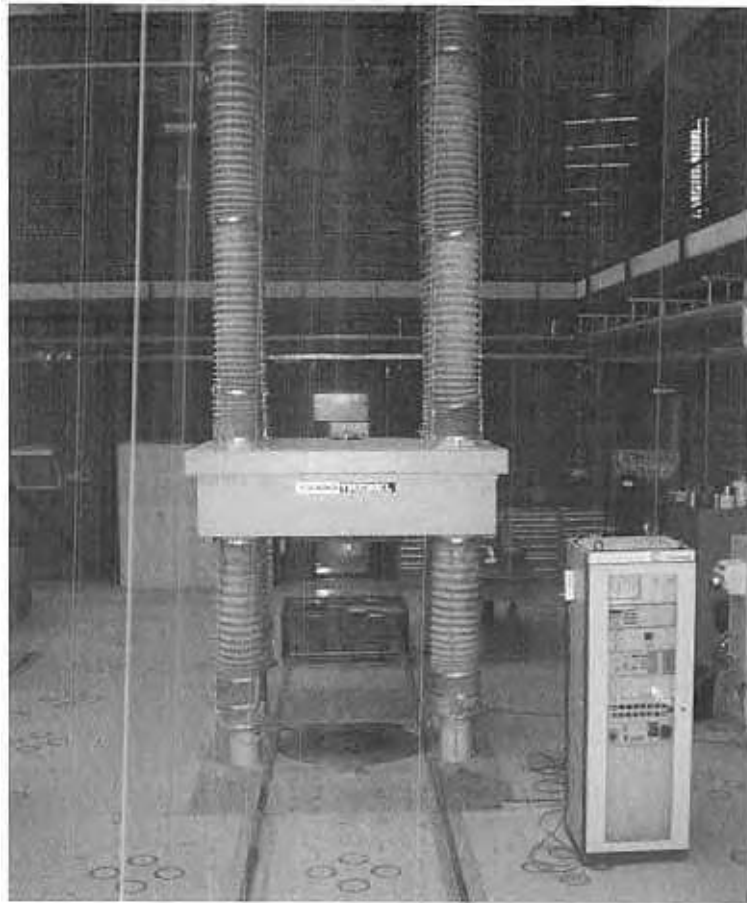


Figure 1 Dispositif d'essai pour la compression des troncs, presse Trebel 10 MN de charge maximum.



Figure 2 Photo du dispositif des capteurs de l'essai de compression de troncs, à la base.



Figure 3 Photo du dispositif des capteurs de l'essai de compression de troncs, au milieu de la longueur du tronc.

Les sept capteurs inductifs, schéma à la figure 4, sont disposés autour du tronc afin de prendre les mesures nécessaires :

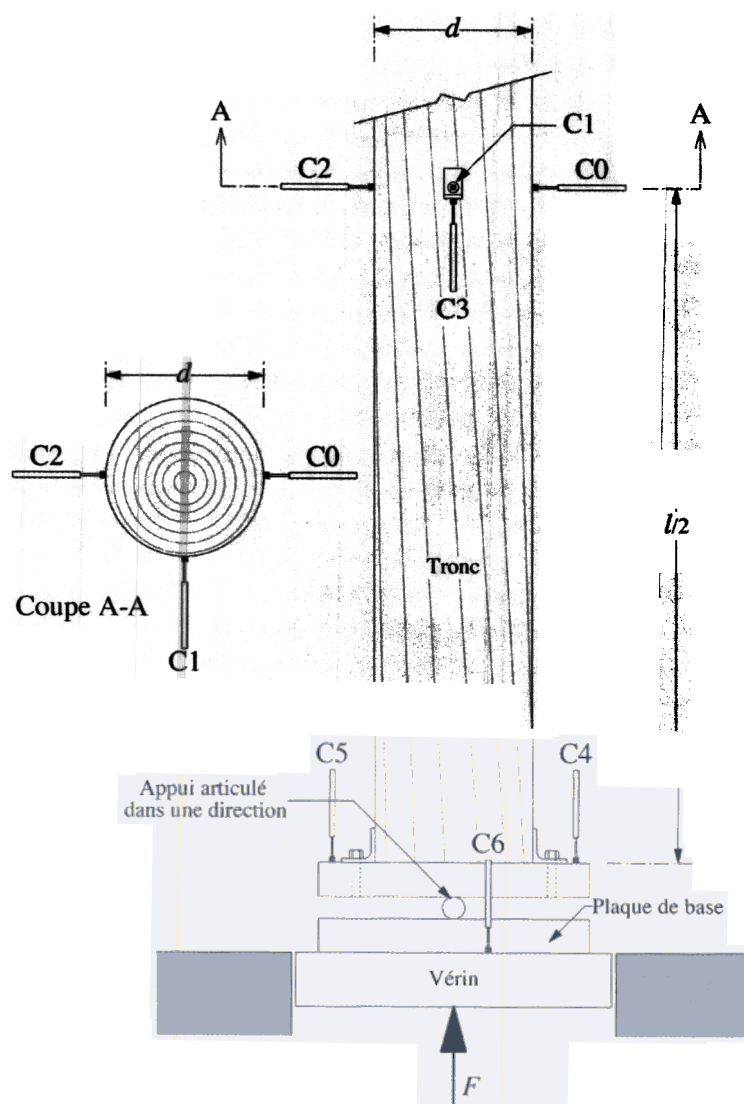


Figure 4 Position des sept capteurs inductifs de déplacement autour du tronc.

2.2 Type de tronc

Au départ, le déroulement des essais devait se réaliser avec les mêmes troncs employés à Hanovre, mais pour des raisons techniques au laboratoire - le diamètre des troncs trop grand et la charge de rupture nécessaire trop élevée - a nécessité l'emploi d'autres éprouvettes. Deux troncs, de l'essence sapin blanc ont été testés, évidemment de section circulaire avec un diamètre d et une longueur l , plus précisément :

- le tronc n°1 en sapin blanc écorcé est un poteau bi-articulé de 4.0 m de longueur entre appuis et le diamètre d égale à 350 mm (fig. 5),
- le tronc n°2 en sapin blanc écorcé est un poteau bi-articulé de 3.0 m de longueur entre appuis et le diamètre d égale à 360 mm (fig. 6).



Figure 5 Tronc n°1, $l = 4.0$ [m] et $d = 35$ [mm].



Figure 6 Tronc n°2, $l = 3.0$ [m] et $d = 36$ [mm].

2.3 Déroulement de l'essai, détermination des déplacements u et v

2.3.1 Déplacements axial u et transversal v

Pour la détermination du déplacement axial u , on effectue la mesure avec le déplacement du vérin et le capteur inductif de déplacement C6. Ce dernier est un contrôle de la mesure du vérin et il est placé sur la plaque de base (fig. 4).

Pour la détermination du déplacement transversal v , on effectue la mesure avec les capteurs inductifs de déplacement C0 et C2. La moyenne entre les deux dispositifs de mesurage, C0 et C2, donne le déplacement transversal du tronc.

L'expression des résultats est obtenue après plusieurs phases de mise en charge en stade élastique : d'abord on monte jusqu'à 500 kN, puis jusqu'à 1000 kN et pour le tronc n°2 on essayera de monter jusqu'à 1500 kN. La première mise en charge jusqu'à 500 kN est considérée comme phase de mise en place et elle n'est pas retenue. Puis, dans une deuxième phase d'essai, on est monté en charge jusqu'à la rupture pour les deux troncs.

Les capteurs inductifs de déplacement restants sont là pour contrôler le bon déroulement de l'essai de compression des troncs. Les capteurs C4 et C5 servent à contrôler que la plaque de base tourne légèrement autour de l'articulation pendant l'essai. Les capteurs C1 et C3 aident à s'assurer que la rotation du tronc, autour de l'appui articulé unidirectionnel, se produit bien dans cette direction.

2.3.2 Calcul théorique du déplacement axial u

Le calcul théorique du déplacement axial u se compose de deux parts, calculée séparément, puis additionnée par les étapes suivantes :

- a) Déplacement axial u_1 au 1^{er} ordre
- b) Déplacement axial u_2 au 2^{ème} ordre

Déplacement axial au 1^{er} ordre, u_1

$$u_1 = \frac{F L}{E A} = \varphi \frac{\pi^2 l}{\lambda_k^2}$$

- u_1 : déplacement axial au 1^{er} ordre [mm]
- φ : rapport de la charge F sur la charge critique de flambage F_{cr} [-]
- l : Longueur du tronc entre ses appuis bi-articulés [mm]

Pour obtenir le déplacement axial au 1^{er} ordre ci-dessus, il est nécessaire d'utiliser les formules suivantes, le rapport φ et la charge critique F_{cr} :

$$\varphi = \frac{F}{F_{cr}} \quad \text{et} \quad F_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l^2}$$

ainsi que le rayon de giration i pour une section circulaire et l'élancement λ_k :

$$\sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{d}{4} \quad \text{et} \quad \lambda_k = \frac{l_k}{i}$$

Déplacement axial au 2^{ème} ordre, u_2

$$u_2 = \int_1 \frac{1}{2} (v')^2 = v_{tot}^2 \frac{\pi^2}{4 l}$$

- u_2 : déplacement axial au 2^{ème} ordre [mm]
- v_{tot} : déplacement transversal total, obtenu selon le paragraphe 2.3.3 [mm]

Déplacement axial total, u_{tot}

$$u_{tot} = u_1 + u_2 = \frac{F L}{E A} + \int_1 \frac{1}{2} (v')^2 = \varphi \frac{\pi^2 l}{\lambda_k^2} + v_{tot}^2 \frac{\pi^2}{4 l}$$

2.3.3 Calcul théorique du déplacement transversal v

Déplacement transversal, solution linéaire v_1

Le déplacement transversal v est calculé au milieu de la longueur l du tronc, celui-ci se détermine par la théorie du 2^{ème} ordre ou des rotations modérées. Premièrement, on détermine la solution linéaire du déplacement v_1 :

$$v_1 = v_{\text{lin}} = e_0 \frac{F}{F_{\text{cr}}} = e_0 \varphi$$

v_1 : déplacement transversal, solution linéaire [mm]
 e_0 : déplacement initial, estimé (légère courbure du tronc) [mm]

Déplacement transversal, solution non-linéaire ou au 2^{ème} ordre v_2

Deuxièmement, on détermine la solution non-linéaire du déplacement transversal v_2 :

$$v_2 = v_1 \frac{1}{1 - \varphi} = e_0 \frac{\varphi}{1 - \varphi}$$

v_2 : déplacement transversal au 2^{ème} ordre [mm]

Avec le facteur d'amplification du 2^{ème} ordre égale à :

$$1 - \frac{F}{F_{\text{cr}}} = \frac{1}{1 - \varphi}$$

Déplacement transversal total, v_{tot}

Pour le calcul du déplacement transversal total v_{tot} , on additionne l'excentricité initiale e_0 , due aux imperfections géométriques de la pièce (tronc d'arbre), et le déplacement transversal v_2 , alors on obtient le déplacement transversal total :

$$v_{\text{tot}} = e_0 + v_2 = e_0 + e_0 \frac{\varphi}{1 - \varphi} = e_0 \frac{1}{1 - \varphi}$$

De plus, on en déduit le moment linéaire M_{lin} et le moment maximal M_{max} suivants :

$$M_{\text{lin}} = F e_0$$

$$M_{\text{max}} = F v_{\text{tot}} = F e_0 \frac{1}{1 - \varphi} = M_{\text{lin}} \frac{1}{1 - \varphi}$$

2.3.4 Théorie de la torsion uniforme

Equations de base pour une section circulaire pleine

Le glissement d'angle γ s'exprime de la manière suivante (pour plus de détails et d'explications on se référera à la littérature adéquate) :

$$\gamma = r \frac{d\theta_x}{dx} = r \chi = r \theta'_x \quad \text{avec:} \quad \chi = \theta'_x$$

χ : angle de torsion par unité de longueur [rad/m]

Comme le matériau bois obéit à la loi de Hooke, on a la relation suivante avec une variation linéaire des contraintes tangentielles τ selon la distance r depuis le centre de la section circulaire :

$$\tau = G \gamma = G r \chi$$

G : module de glissement [N/mm²]

En appliquant le principe d'équivalence on obtient le moment de torsion T :

$$T = \int_A \tau r dA = G \chi \int_A r^2 dA = G \chi I_p$$

Le moment d'inertie polaire I_p de la section droite circulaire de rayon R , s'obtient par :

$$I_p = \pi \frac{R^4}{2}$$

Contraintes tangentielles dues au moment de torsion

Alors avec les équations de base précédentes, on arrive à calculer les contraintes tangentielles dues au moment de torsion T :

$$\tau = \frac{T}{I_p} r \quad \text{et} \quad \tau_{\max} = \frac{T}{I_p} R$$

Calcul du moment de torsion obtenu lors de l'essai de compression

Comme la plaque de base n'est pas fixée, celle-ci peut tourner et les fibres torses du tronc permettent une rotation autour de l'axe longitudinal x . Donc, il y a bien un moment de torsion T sollicitant le tronc lors d'un essai de compression. Celui-ci s'obtient par l'astuce suivante :

$$T = G \chi I_p = G \chi \pi \frac{R^4}{2} = (G R^2 \pi) (R \chi) \frac{R}{2} \equiv F \gamma \frac{R}{2}$$

Résultats des essais de compression

Résultats du tronc n°1

Les résultats obtenus pour les déplacements, axial u et transversal v , par le calcul théorique et par l'essai de compression sont donnés au tableau 7 pour le tronc n°1.

Charge F [kN]	Axial total u_{tot} [mm]	Axial mesuré u_{ef} [mm]	Facteur 2 ^{ème} ordre [-]	Déplacement initial e_0 [mm]	Déplacement 2 ^{ème} ordre v_2 [mm]	Déplacement total v_{tot} [mm]	Déplacement mesuré v_{ef} [mm]
100	0.42	1.22	1.023	3.00	0.07	3.07	0.05
200	0.84	1.91	1.046	3.00	0.14	3.14	0.12
300	1.25	2.45	1.071	3.00	0.21	3.21	0.19
400	1.67	2.98	1.097	3.00	0.29	3.29	0.21
500	2.09	3.50	1.124	3.00	0.37	3.37	0.205
600	2.50	3.94	1.152	3.00	0.46	3.46	0.11
700	2.92	4.42	1.182	3.00	0.55	3.55	0.315
800	3.33	4.94	1.214	3.00	0.64	3.64	1.055
900	3.75	5.51	1.247	3.00	0.74	3.74	2.03
1000	4.17	6.17	1.282	3.00	0.85	3.85	2.66

Tableau 7 Valeurs théoriques et résultats de l'essai de compression « 1000 kN – 4 » pour le tronc n°1

Pour établir, ce tableau 7 on a uniquement considéré l'essai 1000 kN – 4 (tronc n°1), c'est-à-dire le premier essai de montée en charge à 1000 kN.

Le tableau 7 donne pour les trois premiers niveaux de charge (jusqu'à 300 kN), des valeurs identiques pour le déplacement transversal au 2^{ème} ordre entre le calcul théorique v_2 et les mesures v_{ef} .

Pour le déplacement axial, on constate une différence entre le calcul théorique et les valeurs mesurées.

Les valeurs du calcul théorique pour les déplacements axial u et transversal v sont détaillées aux annexes 8 et 9 pour le tronc n°1. Toutes les caractéristiques géométriques et mécaniques sont calculées à l'aide des équations données aux paragraphes 2.3.2 et 2.3.3.

Le tableau 7 du tronc n°1 ne fournit pas des paramètres statistiques exploitables, car évidemment, un seul tronc de 4.0 m de longueur soumis à la compression est insuffisant pour une bonne représentation de l'échantillonnage.

2.4.2 Résultats du tronc n°2

Les résultats obtenus pour les déplacements, axial u et transversal v , pour le calcul théorique et pour l'essai de compression sont donnés au tableau 8 pour le tronc n°2.

Charge F [kN]	Axial total u_{tot} [mm]	Axial mesuré u_{ef} [mm]	Facteur 2 ^{ème} ordre [-]	Déplacement initial e_0 [mm]	Déplacement 2 ^{ème} ordre v_2 [mm]	Déplacement total v_{tot} [mm]	Déplacement mesuré v_{ef} [mm]
100	0.43	1.05	1.016	3.00	0.05	3.05	0.14
200	0.85	2.04	1.033	3.00	0.10	3.10	0.285
300	1.27	2.73	1.050	3.00	0.15	3.15	0.34
400	1.69	3.33	1.067	3.00	0.20	3.20	0.255
500	2.11	3.85	1.086	3.00	0.26	3.26	0.175
600	2.54	4.33	1.105	3.00	0.31	3.31	0.12
700	2.96	4.88	1.124	3.00	0.37	3.37	0.08
800	3.38	5.28	1.145	3.00	0.43	3.43	0.175
900	3.80	5.77	1.166	3.00	0.50	3.50	0.245
1000	4.22	6.26	1.188	3.00	0.56	3.56	0.385

Tableau 8 Valeurs théoriques et résultats de l'essai de compression « 1000 kN – 4 » pour le tronc n°2.

Pour établir, ce tableau 8 on a uniquement considéré l'essai 1000 kN – 4 (tronc n°2), c'est-à-dire le premier essai de montée en charge à 1000 kN.

Le tableau 8 montre les déplacements axial et transversal, on constate une différence entre le calcul théorique et les valeurs mesurées.

Les valeurs du calcul théorique pour les déplacements axial u et transversal v sont détaillées aux annexes 10 et 11 pour le tronc n°2. Toutes les caractéristiques géométriques et mécaniques sont calculées à l'aide des équations données aux paragraphes 2.3.2 et 2.3.3.

Le tableau 8 du tronc n°2 ne fournit pas des paramètres statistiques exploitables, car évidemment, un seul tronc de 3.0 m de longueur soumis à la compression est insuffisant pour une bonne représentation de l'échantillonnage.

L'annexe 7 montre la courbe force-déplacement ($F - u$) de l'essai de compression du tronc n°2 coupé à 1.49 m depuis le sol, cet essai est nommé « tronc n°2 bis ». La charge de rupture F_{rupt} égale à 1678 kN est considérablement supérieure à l'essai du tronc n°2. Cela est bien normal, car dans ce cas de figure, le « tronc n°2 bis » travaille uniquement en compression pure, il n'y a plus de phénomène de flambage avec un élancement λ_k si faible. Par contre, comme ce tronc a déjà subi une rupture dans l'essai de tronc n°2 avec une longueur de 3.0 m, on aurait obtenu sans aucun doute une charge de rupture plus élevée sous un seul essai de rupture.

2.4.3 Comparaison des caractéristiques mécaniques avec le Sylvatest-Duo

La mesure non destructive se réalise au moyen d'un appareil de mesures acousto-ultrasoniques, le **Sylvatest-Duo**. Elle permet par la mesure de la vitesse ultrason à travers la poutre d'obtenir la classe de qualité du bois, selon l'EC5, et par conséquent ses modules MOE et MOR.

Une comparaison des modules d'élasticité en flexion, MOE, et des modules de ruptures, MOR, obtenus premièrement par la méthode non destructive et deuxièmement par l'essai de compression, est donnée dans le tableau 9 pour les deux troncs. Ce tableau 9 est la synthèse des résultats pour les essais non destructif et destructif pour les deux troncs. Les **annexes 1,2,3 et 5** contiennent toutes les informations détaillées de ces essais.

Tronc n°	Vitesse $v_{30\%}$ [m/s]	Classe EC5 [-]	Sylvatest-Duo		Compression	
			MOE [N/mm ²]	MOR [N/mm ²]	MOE [N/mm ²]	MOR [N/mm ²]
1	4435	C22	10 000	22	8 219	12,8
2	3992	C14	7 000	14	5 458	11,8

Tableau 9 Comparaison des modules, Sylvatest-Duo – Essai de compression, pour les deux troncs.

Le calcul du module d'élasticité obtenu par l'essai de compression s'obtient de la manière suivante :

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon = E \frac{u}{l} \quad \Leftrightarrow \quad \text{MOE} = E = \frac{\Delta F}{\Delta u} \frac{l}{A}$$

Pour le bois, le module d'élasticité (ou module de Young) est sensiblement plus faible en compression qu'en traction. Cela concorde bien avec les résultats du tableau 9, où l'on remarque un module plus faible selon les essais de compression par rapport aux valeurs obtenues avec le Sylvatest-Duo (module en flexion). Mais les hypothèses générales accordent un module d'élasticité équivalent en compression, traction et donc en flexion.

Le calcul du module de rupture obtenu par l'essai de compression, s'obtient simplement par :

$$\text{MOR} = \sigma_{\text{rupt}} = \frac{F_{\text{rupt}}}{A}$$

Par contre, le module de rupture est nettement plus faible lors des essais de compression à ceux obtenus avec le Sylvatest-Duo pour les deux troncs. Sans doute, ces deux troncs comportaient des défauts internes importants, car les valeurs obtenues lors de ces essais destructifs sont très faibles !

2.4.4 Moment de torsion obtenu lors de l'essai de compression

Ce moment de torsion T engendré par l'essai de compression de tronc est déterminant, car la valeur de calcul de la résistance au cisaillement $f_{v,d}$ est nettement inférieure à la valeur de calcul de la résistance à la compression parallèle aux fibres $f_{c,0,d}$.

Le calcul de ce moment s'obtient à l'aide de la dernière équation du paragraphe 2.3.4 :

$$T = G \chi I_p = G \chi \pi \frac{R^4}{2} = (G R^2 \pi) (R \chi) \frac{R}{2} \cong F \gamma \frac{R}{2}$$

En prenant pour chaque tronc la valeur de la charge de rupture F_{rupt} , on calcule le moment de torsion maximum correspondant :

$$\text{Tronc n°1 : } T_{\max,1} = F_{rupt,1} \gamma \frac{R_1}{2} = 1234 \cdot \left(6 \frac{\pi}{180}\right) \frac{0.175}{2} = 11.3 \text{ kNm}$$

$$\text{Tronc n°2 : } T_{\max,2} = F_{rupt,2} \gamma \frac{R_2}{2} = 1205 \cdot \left(7 \frac{\pi}{180}\right) \frac{0.180}{2} = 13.2 \text{ kNm}$$

Puis, on calcule la contrainte tangentielle τ_{\max} correspondante pour une section circulaire pleine (voir l'équation du paragraphe 2.3.4) pour les deux troncs :

$$\tau_{\max,1} = \frac{T_{\max,1}}{I_{p,1}} R_1 = \frac{11.3 \cdot 10^6}{1.473 \cdot 10^9} 175 = 1.34 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{avec : } I_{p,1} = \pi \frac{R_1^4}{2} = \pi \frac{175^4}{2} = 1.473 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{\max,2} = \frac{T_{\max,2}}{I_{p,2}} R_2 = \frac{13.2 \cdot 10^6}{1.649 \cdot 10^9} 180 = 1.45 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{avec : } I_{p,2} = \pi \frac{R_2^4}{2} = \pi \frac{180^4}{2} = 1.649 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Par conséquent, on remarque bien que les deux contraintes τ_{\max} sont élevées et proches de la limite de la valeur de calcul de la résistance au cisaillement $f_{v,d}$ égale à 1.5 N/mm² pour du bois rond. De plus, on a une interaction de l'effort de compression F et de ce moment de torsion T dû aux fibres torses, donc par cette interaction d'efforts, la rupture se produit en dessous de la valeur de calcul de la résistance au cisaillement $f_{v,d}$.

2.5 Commentaires des résultats des essais de compression

2.5.1 Tronc n°1

L'essai de compression du tronc n°1 a montré une valeur mécanique MOE assez faible en compression, ce qui correspond bien au module d'élasticité obtenu avec la méthode non-destructif, voir le tableau 9. La différence notable des modules entre les deux méthodes, provient sans aucun doute, de défauts internes et du mode de sollicitation du tronc en compression avec flambage.

Lors de la mise en charge en phase élastique, avec plusieurs charge – décharge, on a obtenu des courbes $F - u$ identiques, voir l'annexe 3. Donc, on a bien remarqué une loi de comportement élastique linéaire.

Dans une deuxième phase d'essai on est monté en charge jusqu'à la rupture du tronc, et là on a pu constater la formation d'une rotule plastique. Celle-ci s'est formée à l'endroit, où le matériau bois du tronc a le plus de défauts intrinsèques, voir la figure 10.



Figure 10 Tronc n°1, position de la rotule plastique.

Cette montée en charge à la rupture a provoqué aussi une rotation de la plaque de base, signifiant bien la présence des fibres torses du tronc. L'inclinaison mesurée α des fibres par rapport à la verticale correspond à un angle de l'ordre de 6° qui entraîne un moment de torsion important et déterminant dans le mode de rupture (voir paragraphe 2.4.4).

2.5.2 Tronc n°2

L'essai de compression du tronc n°2 a montré une valeur mécanique MOE encore plus faible que le tronc n°1 en compression, qui correspond bien au module d'élasticité obtenu avec la méthode non-destructif, voir le tableau 9. La différence notable des modules entre les deux méthodes, provient sans aucun doute, de défauts internes et du mode de sollicitation du tronc en compression avec flambage.

Lors de la mise en charge en phase élastique, avec plusieurs charge – décharge, on a obtenu des courbes $F - u$ identiques, voir l'annexe 5. Donc, on a bien remarqué une loi de comportement élastique linéaire.

Dans une deuxième phase d'essai on est monté en charge jusqu'à la rupture du tronc, et là on a pu constater la formation d'une rotule plastique. Celle-ci s'est formée à l'endroit, où le matériau bois du tronc a le plus de défauts intrinsèques, voir la figure 11. Le dernier essai en phase élastique du tronc n°2 a dû être stoppé « in extremis », car la charge maximale prévue avant l'essai, 1500 kN - 6, dépassait la charge de rupture, voir l'annexe 5.



Figure 11 Tronc n°2, position de la rotule plastique.

Cette montée en charge à la rupture a provoqué aussi une rotation de la plaque de base, signifiant bien la présence des fibres torses du tronc. L'inclinaison mesurée α des fibres par rapport à la verticale correspond à un angle de l'ordre de 7° qui entraîne un moment de torsion important et déterminant dans le mode de rupture (voir paragraphe 2.4.4).

3 SYNTHESE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le module d'élasticité MOE obtenu sur chaque tronc de sapin blanc est relativement faible avec la méthode non destructive (Sylvatest-Duo). Selon l'Eurocode 5 on obtient les classes C22 (tronc n°1) et C14 (tronc n°2). Avec la méthode destructive (l'essai de compression), on obtient un module d'élasticité MOE en compression un peu inférieur, d'environ 20 %, à la méthode non destructive (mesure du module en flexion), ceci est en accord avec la théorie.

Par conséquent, la charge de rupture F_{rupt} obtenue pendant les essais de compression, est aussi assez basse par rapport à la charge critique F_{cr} de chaque tronc. De plus, il ne faut pas oublier l'**humidité** très élevée des troncs (au centre des troncs environ 32 % et au bord des troncs jusqu'à 146 %), supérieure à la saturation des fibres (30%), qui **diminue** nettement toutes les **caractéristiques mécaniques** (résistance à la compression, au cisaillement, etc.) de ce bois rond.

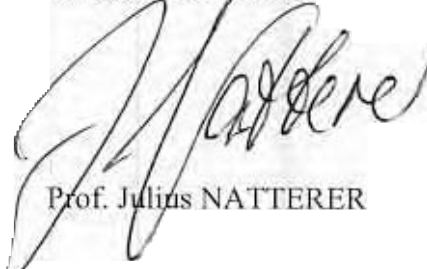
L'inclinaison des **fibres torses** du bois rond testé par rapport à l'axe vertical, de 6° à 7°, produit un **moment de torsion uniforme** T pendant l'essai de compression des troncs. Celui-ci provoque des contraintes tangentielles τ (ou de cisaillement) importantes, qui finalement sont la conséquence première de la ruine sous une charge de compression relativement faible. La valeur de calcul de la résistance au cisaillement $f_{v,d}$ devient prépondérante devant la valeur de calcul de la résistance à la compression parallèle aux fibres $f_{c,0,d}$, donc **la rupture** de ces essais de tronc avec fibres torses est dictée **par la résistance en cisaillement** et non par la résistance en compression.

Par conséquent, la mise en oeuvre de bois rond avec des fibres torses dans la construction peut être envisagée uniquement avec prudence, il est préférable pour des sollicitations en compression très importantes (par exemple : poteaux en bois rond du pavillon Expodach, exposition universelle de Hanovre, 2000) de sélectionner des troncs sans fibres torses, c'est-à-dire avec les fibres parallèles au fût de l'arbre. Sinon, les troncs avec des fibres torses doivent être dimensionnés en tenant compte du paramètre de cisaillement dû au moment de torsion.

Par contre, il est clair que l'utilisation de bois rond dans la construction, permet une nette économie par rapport au bois équarri qui demande des coûts de débit non négligeable et les valeurs de calculs des différentes résistances sont plus élevées pour le bois rond. Ceci est facilement compréhensible, puisque l'on ne façonne pas la matière, plus précisément, on ne tranche pas les fibres du matériau bois.

Lausanne, le 14 janvier 2004

Directeur de l'IBOIS



Prof. Julius NATTERER

4 ANNEXES

Essais non-destructifs

Annexe 1	Taux d'humidité des troncs, par étuvage
Annexe 2	Mesures avec Sylvatest-Duo, longitudinal

Essais de compression des deux troncs

Annexe 3	Graphe de la courbe force – déplacement pour le tronc n°1
Annexe 4	Graphe du déplacement des capteurs, tronc n°1, essai 1000 kN - 5
Annexe 5	Graphe de la courbe force – déplacement pour le tronc n°2
Annexe 6	Graphe du déplacement des capteurs, tronc n°2, essai 1000 kN - 5
Annexe 7	Graphe de la courbe force – déplacement pour le tronc n°2 bis
Annexe 8	Tronc n°1 : calcul théorique du déplacement u_{tot} et comparaison avec u_{ef}
Annexe 9	Tronc n°1 : calcul théorique du déplacement v_2 et comparaison avec v_{ef}
Annexe 10	Tronc n°2 : calcul théorique du déplacement u_{tot} et comparaison avec u_{ef}
Annexe 11	Tronc n°2 : calcul théorique du déplacement v_2 et comparaison avec v_{ef}

Annexe 1

Taux d'humidités des troncs

Essence : Sapin blanc

Troncs	Nr. Cube	Poids Humide m_h [g]	Poids sec m_o [g]	Poussée Y [g]	Tare T [g]	Densité anhydre ρ_o [Kg/m ³]	Moyenne [Kg/m ³]	Ecart type [Kg/m ³]	Humidité H [%]
1 à l'extrémité	b	18.12	7.36	6.99	0.38	527			146.2
	m	11.69	6.29	7.16	0.38	481	461	63	85.9
	c	6.17	4.60	8.03	0.38	376			34.1
		Date: 15.01.2001	19.01.2001						
1 au milieu	b	14.42	5.84	6.75	0.34	477			146.9
	m	9.12	6.18	7.02	0.34	481	444	49	47.6
	c	7.80	5.74	9.96	0.34	374			35.9
		Date: 26.01.2001	30.01.2001						
2 au tiers	b	10.10	5.50	8.80	0.34	394			83.6
	m	6.92	5.30	8.82	0.34	385	401	17	30.6
	c	7.92	6.00	8.46	0.34	425			32.0
		Date: 26.01.2001	30.01.2001						
2 au milieu	b	12.14	6.22	10.24	0.41	388			95.2
	m	7.97	6.08	9.42	0.41	403	388	12	31.1
	c	7.87	5.96	10.39	0.41	374			32.0
		Date: 31.01.2001	06.02.2001						

Légende

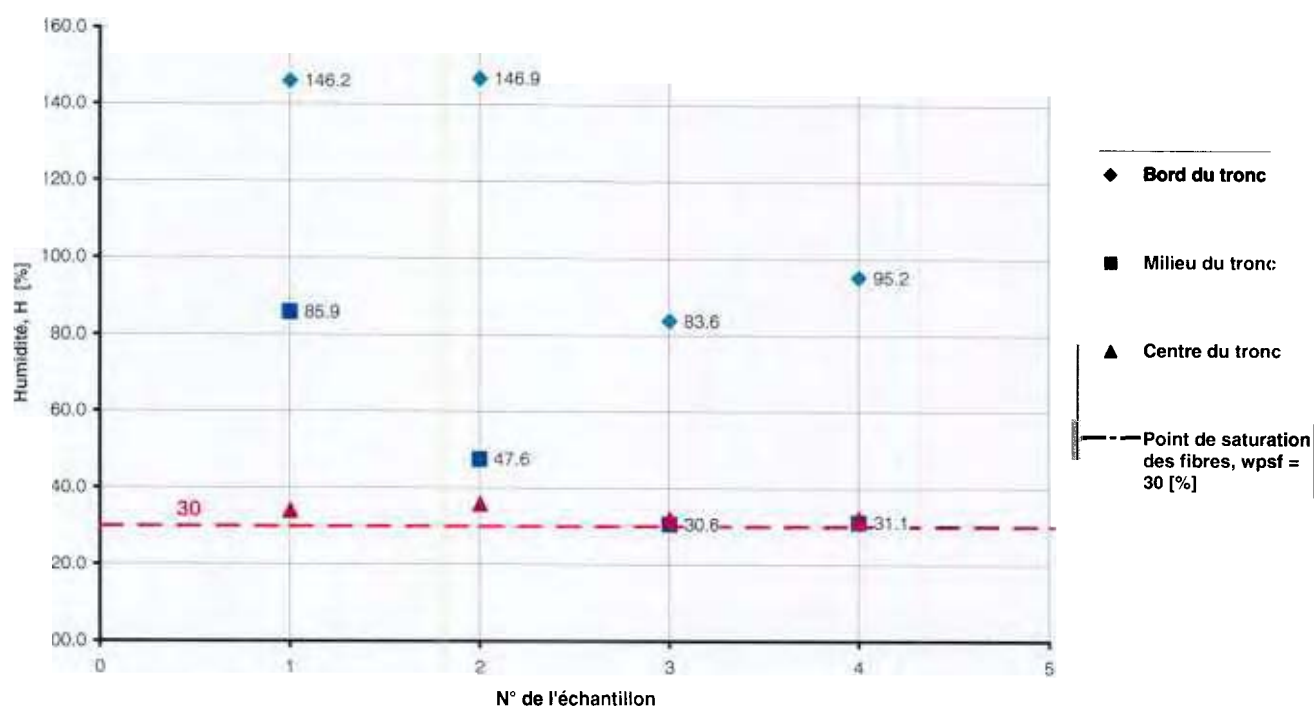
b = échantillon de bord du tronc
m = échantillon du milieu du tronc
c = échantillon du centre du tronc

$$\text{Densité anhydre : } \rho_o = \frac{m_o}{V_o} = \frac{m_o}{Y - T + m_o} \times 1000$$

Remarques : 1) Température du four égale à 103 [°C]
2) Echantillons : cubes de 2,5 [cm] de côté

$$\text{Humidité : } H = \frac{m_h - m_o}{m_o} \times 100$$

Humidité en fonction de la position de l'échantillon



Annexe 2

Mesures avec Sylvatest Duo

Longitudinal

Numéro	Mesure	Mesure indirecte					Classe
		Distance entre trou	Distance entre sondes (-5cm)	Temps	Vitesse	Energie	EC5
		[m]	[m]	[μs]	[m/s]	[mV]	
Tronc N° 1	a	3.46	3.41	769	4434	13	C22
	b	3.39	3.34	753	4436	11	
Tronc N° 2	a	3.69	3.64	921	3952	13	C14
	b	3.65	3.60	893	4031	5	

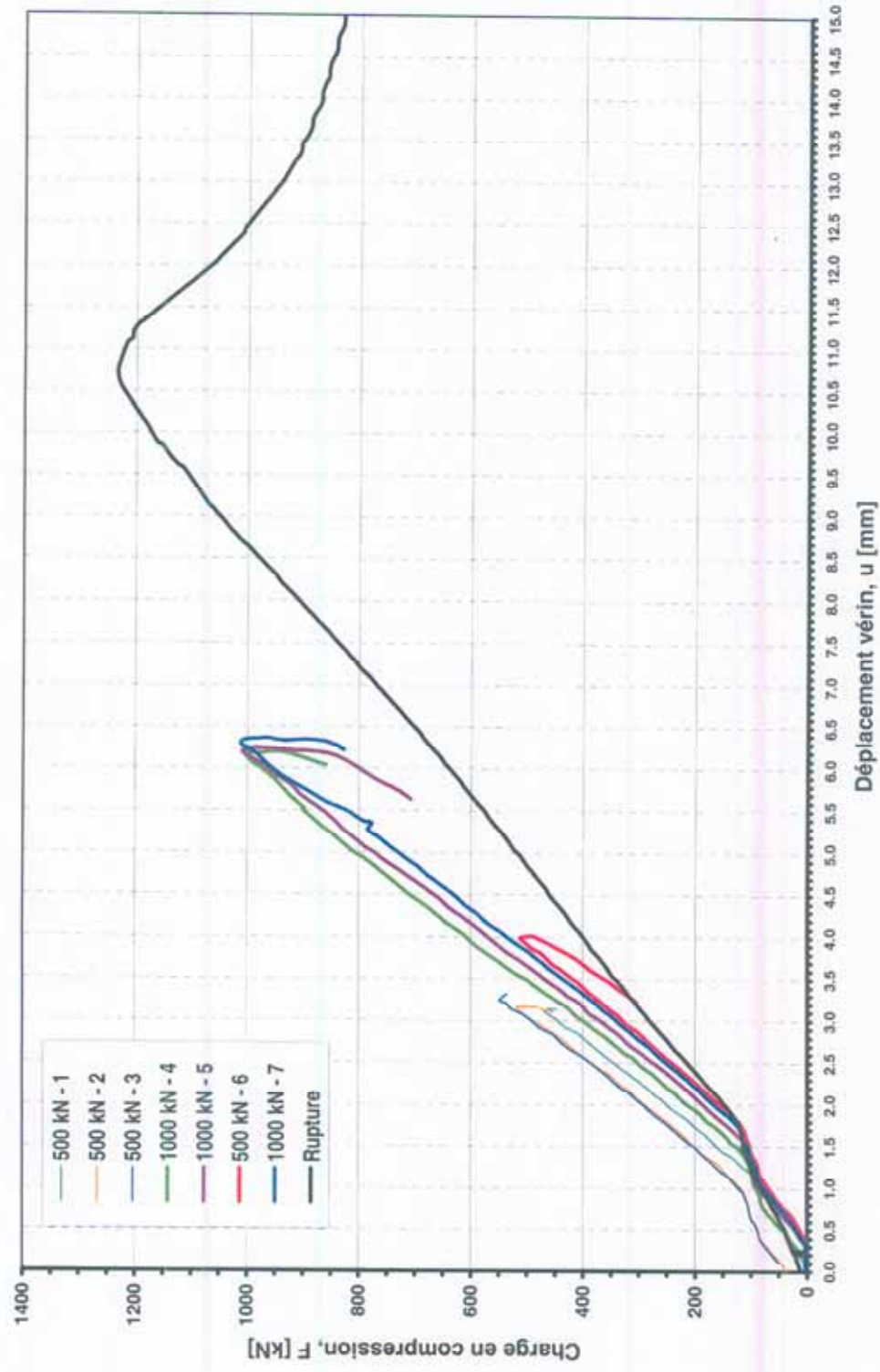
Caractéristiques géométriques des troncs :

Tronc N° 1 : Diamètre 35 [cm] ; Ltot 4,0 [m] ; écorcé Tronc N° 2 : Diamètre 36 [cm] ; Ltot 3,0 [m] ; écorcé
--

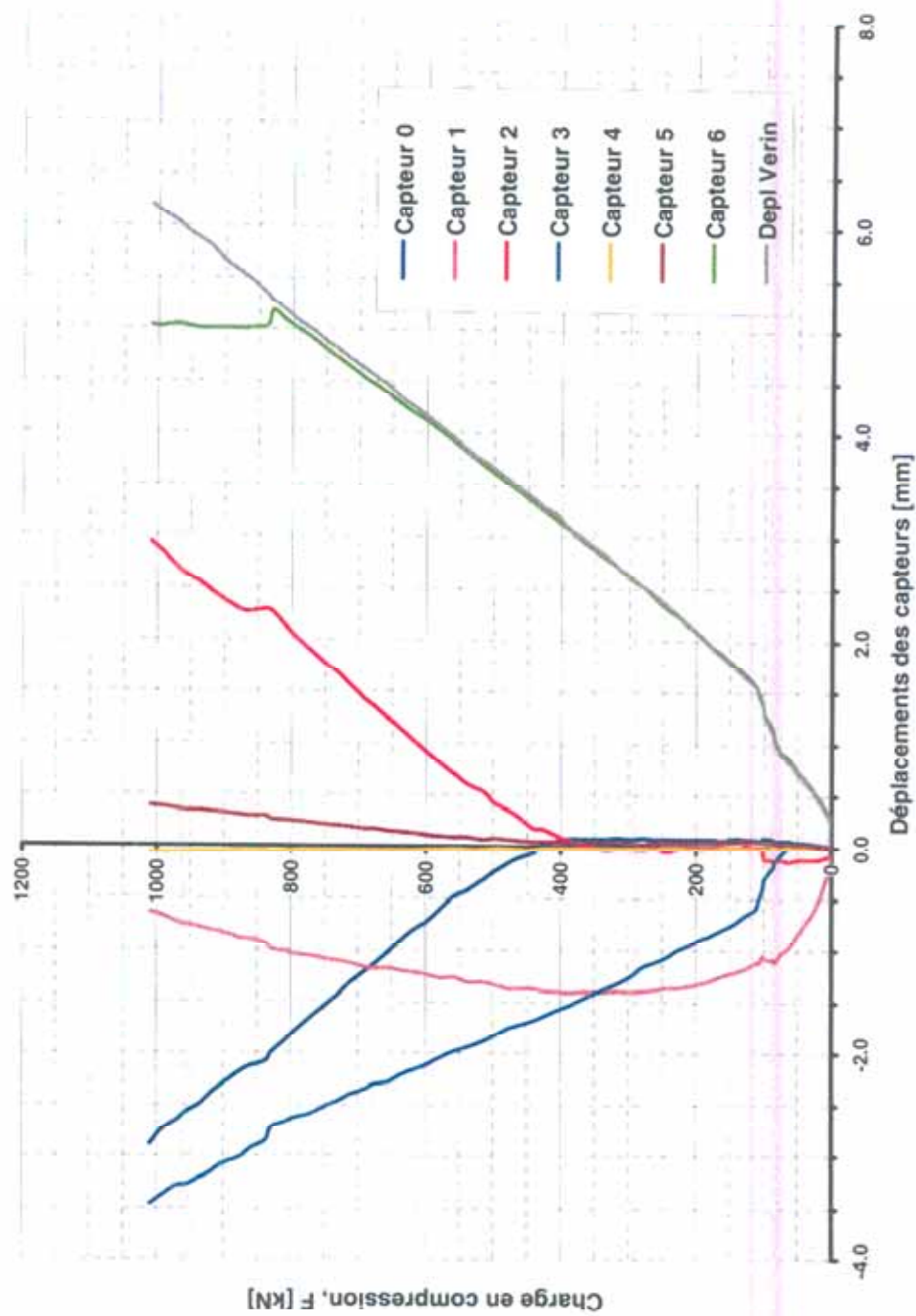
Remarques :

- 1) Essence des deux troncs : **Sapin blanc**.
- 2) Le taux d'humidité moyen de ces deux troncs correspond à une valeur supérieure à 30 [%], par conséquent il n'y a pas de correction à apporter à la vitesse.
- 3) Mesures indirectes diamétralement opposées : a et b dans le tableau ci-dessus.

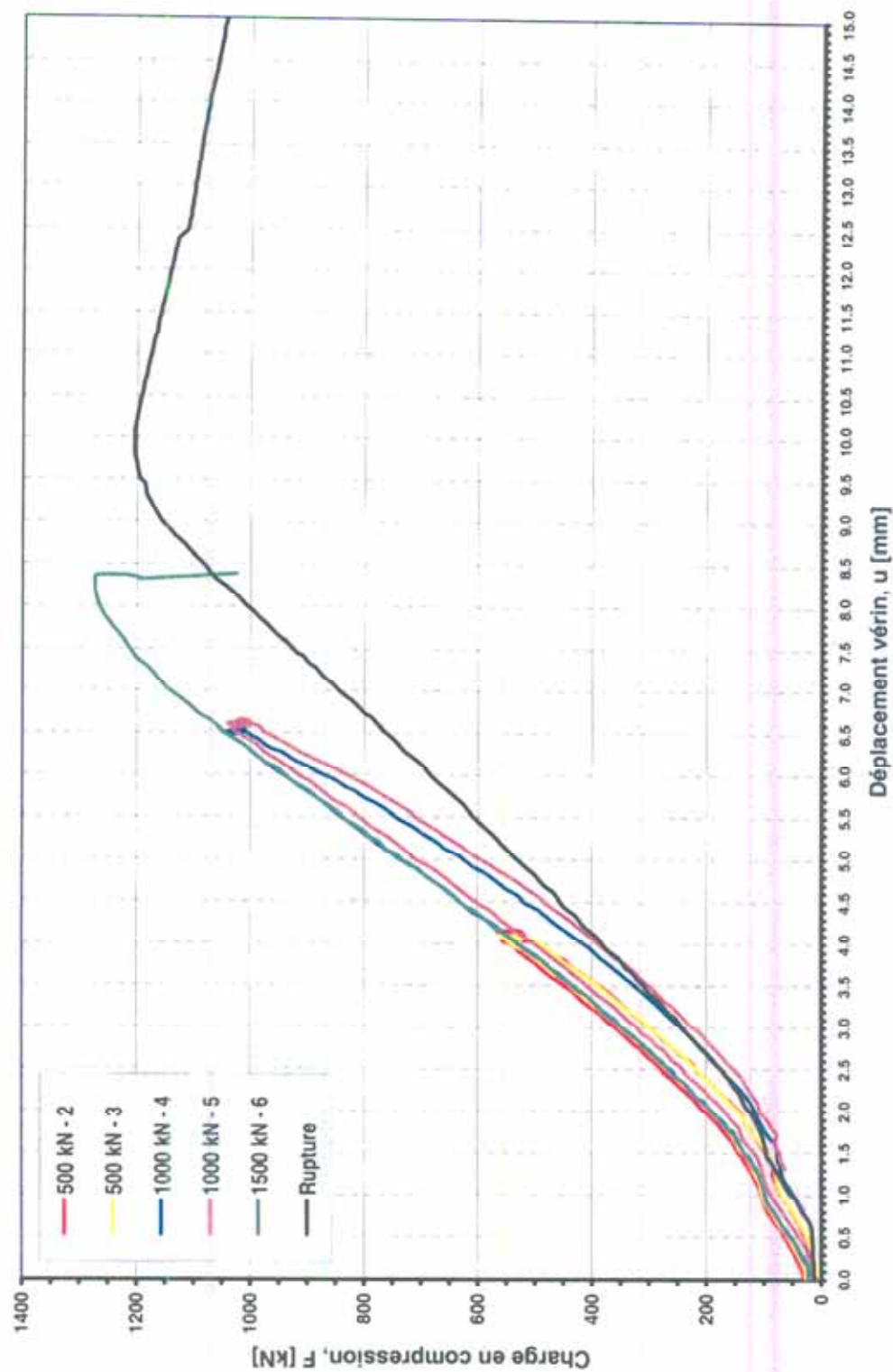
Tronc n°1 : Essai de compression, courbe force - déplacement



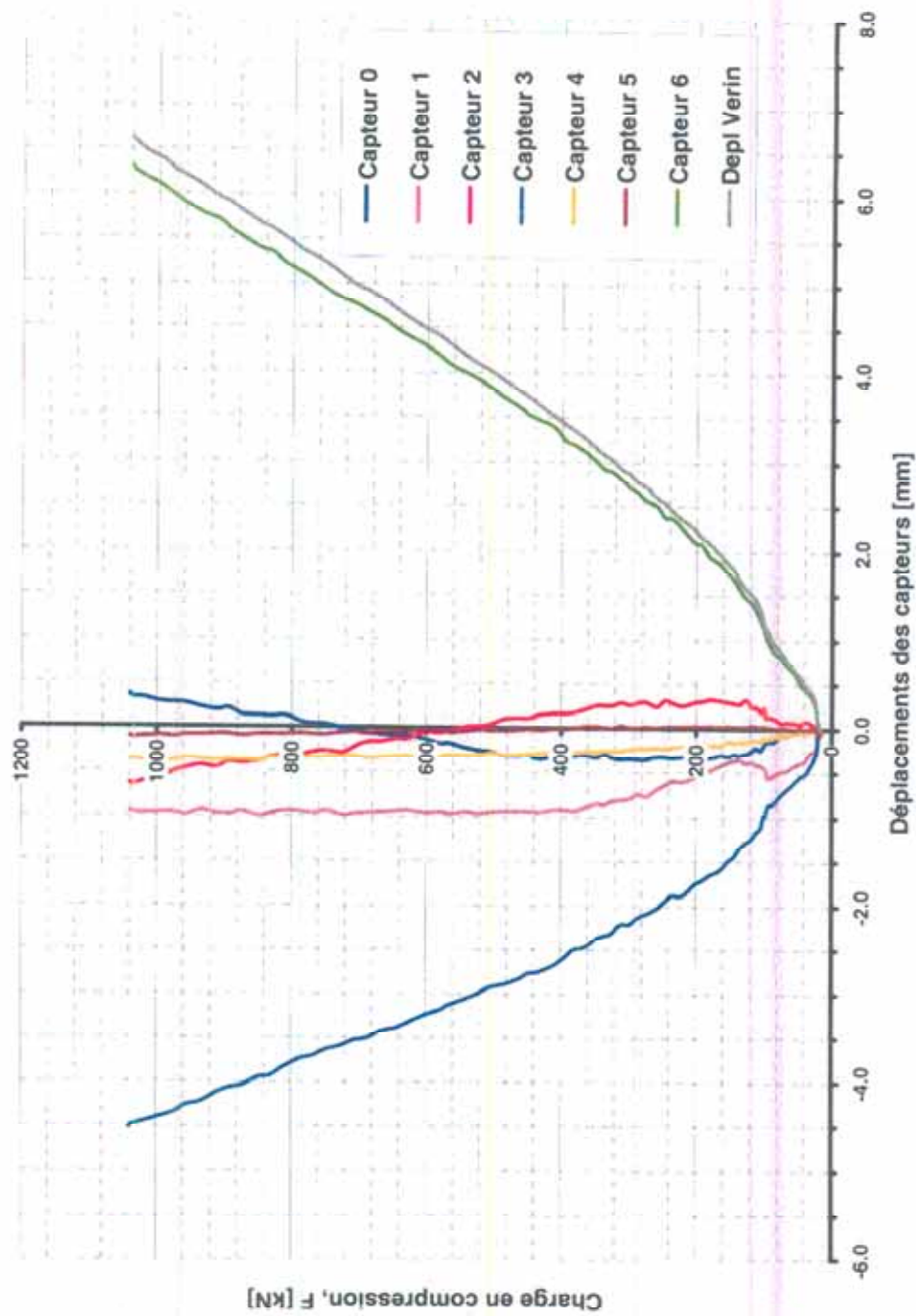
Tronc n°1 : Essai de compression 1000 kN - 5



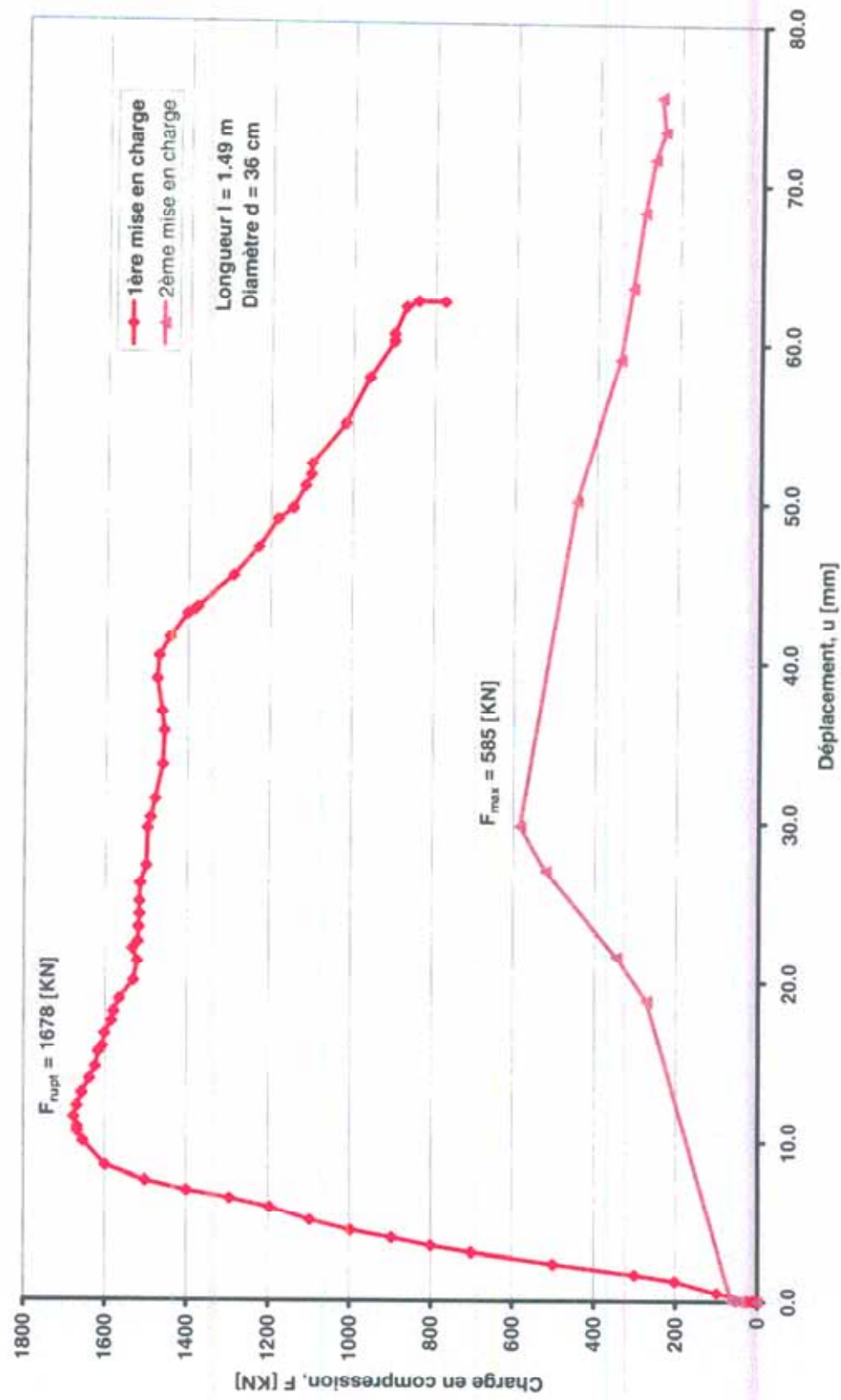
Tronc n°2 : Essai de compression, courbe force - déplacement



Tronc 2 - Essai de compression 1000 kN - 5



Tronc n°2 bis : Essai de compression, courbe force - déplacement



Annexe 8

Tronc n°1 : calcul théorique du déplacement u_{tot} et comparaison avec u_{ef}

Tronc 1
$F_{rupt} = 1234 \text{ kN}$

Calcul théorique : selon la théorie du second ordre ou des rotations modérées

Bois ronds, résineux : $E = 10 \text{ [KN/mm}^2\text{]}$ (Classe C22)

Diamètre $d \text{ [mm]}$	Longueur $l \text{ [mm]}$	Rayon giration $i \text{ [mm]}$	Eclatement $\lambda_k \text{ [°]}$	Charge critiques $F_{cr} \text{ [kN]}$	Charge appliquée $F \text{ [kN]}$	Rapport $\varphi = F/F_{cr}$	Fibtre totale $V_{tot} \text{ [mm]}$	Axial au 1 ^{er} ordre $u_1 \text{ [mm]}$	Axial au 2 ^{ème} ordre $u_2 \text{ [mm]}$	Axial total $u_{tot} \text{ [mm]}$	Déplacement mesuré $u_{ef} \text{ [mm]}$
350	4000	87.5	45.7	4543.8	100	0.022	3.07	0.4158	0.0058	0.42	1.22
350	4000	87.5	45.7	4543.8	200	0.044	3.14	0.8315	0.0061	0.84	1.91
350	4000	87.5	45.7	4543.8	300	0.066	3.21	1.2473	0.0064	1.25	2.45
350	4000	87.5	45.7	4543.8	400	0.088	3.29	1.6630	0.0067	1.67	2.98
350	4000	87.5	45.7	4543.8	500	0.110	3.37	2.0788	0.0070	2.09	3.50
350	4000	87.5	45.7	4543.8	600	0.132	3.46	2.4945	0.0074	2.50	3.94
350	4000	87.5	45.7	4543.8	700	0.154	3.55	2.9103	0.0078	2.92	4.42
350	4000	87.5	45.7	4543.8	800	0.176	3.64	3.3260	0.0082	3.33	4.94
350	4000	87.5	45.7	4543.8	900	0.198	3.74	3.7418	0.0086	3.75	5.51
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1000	0.220	3.85	4.1575	0.0091	4.17	6.17
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1100	0.242	3.96	4.5733	0.0097	4.58	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1200	0.264	4.08	4.9890	0.0103	5.00	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1300	0.286	4.20	5.4048	0.0109	5.42	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1400	0.308	4.34	5.8205	0.0116	5.83	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1500	0.330	4.48	6.2363	0.0124	6.25	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1600	0.352	4.63	6.6520	0.0132	6.67	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1700	0.374	4.79	7.0678	0.0142	7.08	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1800	0.396	4.97	7.4835	0.0152	7.50	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	1900	0.418	5.16	7.8993	0.0164	7.92	
350	4000	87.5	45.7	4543.8	2000	0.440	5.36	8.3150	0.0177	8.33	

Annexe 9

Tronc n°1 : calcul théorique du déplacement v_2 et comparaison avec v_{er}

Tronc 1
$F_{rupt} = 1234 \text{ kN}$

Calcul théorique : selon la théorie du second ordre ou des rotations modérées

Bois ronds, résineux $E = 10 \text{ [kN/mm}^2\text{]}$ (Classe C22)

Diamètre $d \text{ [mm]}$	Aire $A \text{ [mm}^2\text{]}$	Module élastique $E \text{ [kN/mm}^2\text{]}$	Inertie $I \text{ [mm}^4\text{]}$	Longueur $l \text{ [mm]}$	Elancement $\lambda_k [-]$	Charge critique $F_{cr} \text{ [kN]}$	Charge appliquée $F \text{ [kN]}$	Facteur 2 ^{ème} ordre $1/(1-F/F_{cr})$	Flèche initiale $e_0 \text{ estimée [mm]}$	Flèche 2 ^{ème} ordre $v_2 \text{ [mm]}$	Flèche totale $v_{tot} \text{ [mm]}$	Flèche mesurée $v_{er} \text{ [mm]}$	Moment linéaire $M_{lin} \text{ [kNm]}$	Moment maximal $M_{max} \text{ [kNm]}$
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	100	1.023	3.00	0.07	3.07	0.05	0.30	0.31
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	200	1.046	3.00	0.14	3.14	0.12	0.60	0.63
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	300	1.071	3.00	0.21	3.21	0.19	0.90	0.96
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	400	1.097	3.00	0.29	3.29	0.21	1.20	1.32
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	500	1.124	3.00	0.37	3.37	0.205	1.50	1.69
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	600	1.152	3.00	0.46	3.46	0.11	1.80	2.07
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	700	1.182	3.00	0.55	3.55	0.315	2.10	2.48
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	800	1.214	3.00	0.64	3.64	1.055	2.40	2.91
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	900	1.247	3.00	0.74	3.74	2.03	2.70	3.37
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1000	1.282	3.00	0.85	3.85	2.66	3.00	3.85
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1100	1.319	3.00	0.96	3.96		3.30	4.35
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1200	1.359	3.00	1.08	4.08		3.60	4.89
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1300	1.401	3.00	1.20	4.20		3.90	5.46
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1400	1.445	3.00	1.34	4.34		4.20	6.07
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1500	1.493	3.00	1.48	4.48		4.50	6.72
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1600	1.544	3.00	1.63	4.63		4.80	7.41
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1700	1.598	3.00	1.79	4.79		5.10	8.15
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1800	1.656	3.00	1.97	4.97		5.40	8.94
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	1900	1.719	3.00	2.16	5.16		5.70	9.80
350	96211	10	7.37E+08	4000	45.7	4543.8	2000	1.786	3.00	2.36	5.36		6.00	10.72

 v_{er} : moyenne des capteurs 0 et 2

Annexe 10

Tronc n°2 : calcul théorique du déplacement u_{tot} et comparaison avec u_{ef}

Tronc 2
$F_{rupt} = 1205 \text{ kN}$

Calcul théorique : selon la théorie du second ordre ou des rotations modérées

Bois ronds, résineux : $E = 7 \text{ [KN/mm}^2\text{]}$ (Classe C14)

Diamètre $d \text{ [mm]}$	Longueur $l \text{ [mm]}$	Rayon giration $i \text{ [mm]}$	Eclatement $\lambda_k \text{ [-]}$	Charge critique $F_{cr} \text{ [kN]}$	Charge appliquée $F \text{ [kN]}$	Rapport $\varphi = F/F_{cr}$	Flèche totale $v_{tot} \text{ [mm]}$	Axial au 1 ^{er} ordre $u_1 \text{ [mm]}$	Axial au 2 ^{ème} ordre $u_2 \text{ [mm]}$	Axial total $u_{tot} \text{ [mm]}$	Déplacement mesuré $u_{ef} \text{ [mm]}$
360	3000	90	33.3	6329.0	100	0.016	3.05	0.4210	0.0076	0.43	1.05
360	3000	90	33.3	6329.0	200	0.032	3.10	0.8421	0.0079	0.85	2.04
360	3000	90	33.3	6329.0	300	0.047	3.15	1.2631	0.0082	1.27	2.73
360	3000	90	33.3	6329.0	400	0.063	3.20	1.6842	0.0084	1.69	3.33
360	3000	90	33.3	6329.0	500	0.079	3.26	2.1052	0.0087	2.11	3.85
360	3000	90	33.3	6329.0	600	0.095	3.31	2.5263	0.0090	2.54	4.33
360	3000	90	33.3	6329.0	700	0.111	3.37	2.9473	0.0094	2.96	4.88
360	3000	90	33.3	6329.0	800	0.126	3.43	3.3684	0.0097	3.38	5.28
360	3000	90	33.3	6329.0	900	0.142	3.50	3.7894	0.0101	3.80	5.77
360	3000	90	33.3	6329.0	1000	0.158	3.56	4.2104	0.0104	4.22	6.26
360	3000	90	33.3	6329.0	1100	0.174	3.63	4.6315	0.0108	4.64	
360	3000	90	33.3	6329.0	1200	0.190	3.70	5.0525	0.0113	5.06	
360	3000	90	33.3	6329.0	1300	0.205	3.78	5.4736	0.0117	5.49	
360	3000	90	33.3	6329.0	1400	0.221	3.85	5.8946	0.0122	5.91	
360	3000	90	33.3	6329.0	1500	0.237	3.93	6.3157	0.0127	6.33	
360	3000	90	33.3	6329.0	1600	0.253	4.02	6.7367	0.0133	6.75	
360	3000	90	33.3	6329.0	1700	0.269	4.10	7.1578	0.0138	7.17	
360	3000	90	33.3	6329.0	1800	0.284	4.19	7.5788	0.0145	7.59	
360	3000	90	33.3	6329.0	1900	0.300	4.29	7.9999	0.0151	8.01	
360	3000	90	33.3	6329.0	2000	0.316	4.39	8.4209	0.0158	8.44	

Annexe 11

Tronc n°2 : calcul théorique du déplacement v_2 et comparaison avec v_{et}

Tronc 2
$F_{\text{rupt}} = 1205 \text{ kN}$

Calcul théorique : selon la théorie du second ordre ou des rotations modérées

Bois ronds, résineux $E = 7 \text{ [kN/mm}^2\text{]}$ (Classe C14)

Diamètre d [mm]	Aire A [mm ²]	Module d'élasticité E [kN/mm ²]	Inertie I [mm ⁴]	Longueur l [mm]	Elancement λ_y [-]	Charge critique F_{cr} [kN]	Charge appliquée F [kN]	Facteur 2 ^{ème} ordre $1/(1-F/F_{cr})$	Flèche initiale e_0 [mm]	Flèche 2 ^{ème} ordre v_2 [mm]	Flèche totale v_{tot} [mm]	Flèche mesurée v_{et} [mm]	Moment linéaire M_{lin} [kNm]	Moment maximal M_{max} [kNm]
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	100	1.016	3.00	0.05	3.05	0.14	0.30	0.30
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	200	1.033	3.00	0.10	3.10	0.285	0.60	0.62
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	300	1.050	3.00	0.15	3.15	0.34	0.90	0.94
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	400	1.067	3.00	0.20	3.20	0.255	1.20	1.28
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	500	1.085	3.00	0.26	3.26	0.175	1.50	1.63
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	600	1.105	3.00	0.31	3.31	0.12	1.80	1.99
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	700	1.124	3.00	0.37	3.37	0.08	2.10	2.36
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	800	1.145	3.00	0.43	3.43	0.175	2.40	2.75
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	900	1.166	3.00	0.50	3.50	0.245	2.70	3.15
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1000	1.188	3.00	0.56	3.56	0.385	3.00	3.56
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1100	1.210	3.00	0.63	3.63		3.30	3.99
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1200	1.234	3.00	0.70	3.70		3.60	4.44
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1300	1.259	3.00	0.78	3.78		3.90	4.91
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1400	1.284	3.00	0.85	3.85		4.20	5.39
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1500	1.311	3.00	0.93	3.93		4.50	5.90
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1600	1.338	3.00	1.02	4.02		4.80	6.42
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1700	1.367	3.00	1.10	4.10		5.10	6.97
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1800	1.397	3.00	1.19	4.19		5.40	7.55
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	1900	1.429	3.00	1.29	4.29		5.70	8.15
360	101788	7	8.24E+08	3000	33.3	6329.0	2000	1.462	3.00	1.39	4.39		6.00	8.77

 v_{et} : moyenne des capteurs 0 et 2