



HAL
open science

Fluage du bois ” vert ” à haute température (120 °C) : expérimentation et modélisation à l’aide d’éléments de Kelvin thermo-activés

Patrick Perre, Osmar Aguiar

► To cite this version:

Patrick Perre, Osmar Aguiar. Fluage du bois ” vert ” à haute température (120 °C) : expérimentation et modélisation à l’aide d’éléments de Kelvin thermo-activés. *Annals of Forest Science*, 1999, 56 (5), pp.403-416. hal-00883283

HAL Id: hal-00883283

<https://hal.science/hal-00883283>

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fluage du bois « vert » à haute température (120 °C) : expérimentation et modélisation à l'aide d'éléments de Kelvin thermo-activés

Patrick Perré*, Osmar Aguiar

Équipe Produits Forestiers, Engref / Inra 14, rue Girardet 54 042 Nancy cedex, France

(Reçu le 3 juillet ; accepté le 3 décembre 1998)

Abstract – Creep at high temperature (120 °C) of ‘green’ wood and modelling by thermo-activated Kelvin’s elements. This work involved creep tests performed on green wood samples at high temperature (up to 120 °C). The main problem to be solved lies in the boiling point of water, which induces internal vaporisation as soon as the temperature attains 100 °C. The solution consists in using an autoclave which maintains the overpressure required to keep saturated vapour conditions. The whole experiment (support and sensors) has been designed to withstand the severe conditions of temperature, pressure and relative humidity. Numerous experiments are now available, mainly for oak. Results are highly reproducible and depict a dramatic deformation of green wood when the temperature approaches 100–120 °C. The constitutive equation used to fit the experimental curves is made up of Kelvin elements with thermal activation placed in series. The fitted parameters depend on the species (spruce and oak) as well as on the experimental procedure. Nevertheless, the predicted deflexion simulated using these fitted parameters is in rather good agreement with the experiment. (© Inra/Elsevier, Paris.)

creep / wood / high temperature / experiment / model

Résumé – Ce travail propose une étude du fluage du bois vert à haute température (jusqu'à 120 °C). Le problème qui se pose au-dessus de 100 °C est d'éviter que l'échantillon ne sèche par ébullition. La solution consiste à travailler en autoclave, donc en vapeur saturante, avec des conditions très sévères de pression et de température. La déformation des éprouvettes est mesurée à l'aide de capteurs électroniques de type LVDT conçus pour résister à ces conditions. Par ailleurs, afin de faciliter l'interprétation des courbes, des éprouvettes « isocontraintes » sont utilisées. De nombreux essais sont désormais disponibles, surtout pour le chêne. Les mesures sont très reproductibles et démontrent une déformation considérable du bois « vert » lorsque la température atteint 100–120 °C. Ce comportement a été modélisé à l'aide d'éléments de Kelvin thermo-activés placés en série. Les paramètres identifiés sur les courbes expérimentales mettent en exergue l'effet de l'essence (épicéa et chêne) et l'effet des conditions expérimentales. Cependant, l'utilisation en prédiction de ces valeurs identifiées est toujours correcte. (© Inra/Elsevier, Paris.)

fluage / bois / haute température / expérience / modèle

1. Introduction

Il est bien connu que les propriétés physico-mécaniques du bois dépendent fortement de son état hygrothermique. Ceci est particulièrement vrai pour son comportement mécanique différé. Le thermoformage, par

exemple, met à profit cette particularité : un bois chaud et humide devient « plastique » et peut donc être mis en forme. Étant ensuite refroidi et séché, l'échantillon est capable de « figer » cette forme. C'est ainsi que, traditionnellement, sont fabriqués skis et accoudoirs de chaise. Ce comportement est également utilisé ou subi dans

* Correspondance et tirés à part
perre@engref.fr

les procédés modernes : séchage à haute température, étuvage, densification, formage...

L'étude expérimentale du comportement différé du bois a deux objectifs principaux :

- prédire le comportement des structures en conditions d'emploi,
- mieux maîtriser les aspects négatifs ou positifs de ce comportement différé lors de la transformation (séchage, étuvage, thermoformage...).

En raison de son importance et de sa complexité, le comportement différé du bois a été et reste l'objet de nombreuses études, phénoménologiques ou explicatives de son comportement [8, 11, 16, 17]. Le comportement du bois est très sensible à la teneur en eau et à la température : le fluage est plus important, ou plus rapide, lorsque l'un ou l'autre de ces paramètres augmente.

Le concept de thermo- ou hygro- activation permet, dans une certaine plage de valeur, d'avancer le principe d'équivalence temps-température (ou temps-humidité). Cette approche est particulièrement intéressante pour tenter d'extrapoler le comportement du bois à température ambiante pour de très longues sollicitations [9].

La plupart des démarches explicatives tirent profit des nombreux travaux effectués sur les polymères, notamment sur les transitions vitreuses. Ce n'est donc pas par hasard que ces transitions soient recherchées par la mesure de tout type de grandeur physique qui varie fortement durant la transition : analyse thermique, constantes diélectriques [6, 7, 10, 12].

Cependant, par comparaison aux travaux sur les polymères, la spécificité du bois s'exprime par la complexité et la diversité des macromolécules qui le constituent et des successions d'échelle imbriquées jusqu'à l'échelle du bois massif (constitution de la paroi, agencement cellulaire, morphologie du plan ligneux). Les phénomènes observés sur le bois sont donc généralement moins nets et plus difficiles à interpréter. Ces imbrications d'échelles obligent les chercheurs à caractériser individuellement certains composés du bois : hémicelluloses, lignines, cellulose [3, 6, 7, 15].

Par ailleurs, il faut savoir que le taux de changement de teneur en eau fait apparaître une accélération du fluage : il s'agit du couplage mécanosorptif, interaction entre contrainte mécanique et sorption-désorption [5, 14]. L'expérimentation proposée dans ce travail a été conçue pour conserver le bois à l'état vert : le couplage mécanosorptif ne pourra donc pas s'exprimer.

L'effet de chaque constituant peut ensuite être reconnu plus ou moins directement sur des essais effectués sur le bois massif. En particulier, la transition de la lignine est bien perceptible sur du bois massif. Il est vrai que

cette transition intervient dans une fourchette de température assez souvent rencontrée en pratique (60-90 °C sur du bois vert, [6]). Cependant, en raison des problèmes expérimentaux liés à l'ébullition de l'eau [15], la caractérisation mécanique du bois « vert » au-dessus de 100 °C est encore très limitée. Ce constat est à l'origine du travail présenté ici : il propose des essais de fluage sur bois vert, à teneur en eau constante et à température croissante de la température ambiante jusqu'à 120 °C.

La *figure 1* rappelle l'évolution de la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température. Cette courbe est fortement croissante : la pression partielle de vapeur augmente d'un facteur 50 entre 20 °C et 100 °C, point d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique. Au-delà de ce point, la pression de vapeur saturante dépasse la pression atmosphérique : il n'est plus possible d'obtenir la saturation sans travailler en milieu confiné. La *figure 2* précise l'humidité relative maximale qu'il est possible d'atteindre en fonction de la pression totale et de la température. Ce constat est à l'origine de la conception et du développement du dispositif expérimental qui sera décrit au prochain paragraphe.

2. Dispositif expérimental

2.1. Autoclave

L'autoclave que nous avons retenu est construit par la société Commodore International. Cette société a accepté de faire, sur un modèle commercialisé, les modifications nécessaires pour un outil de recherche : passages de

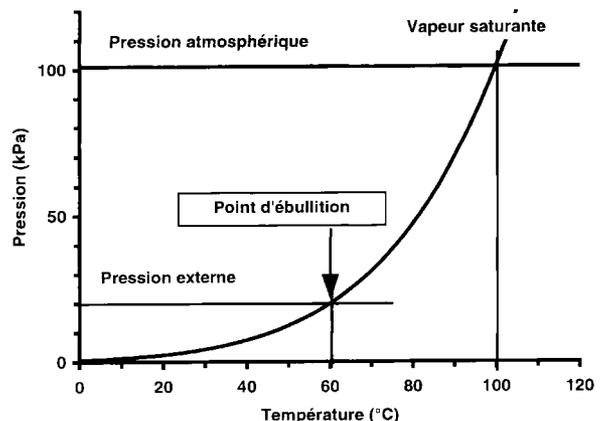


Figure 1. Pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température.

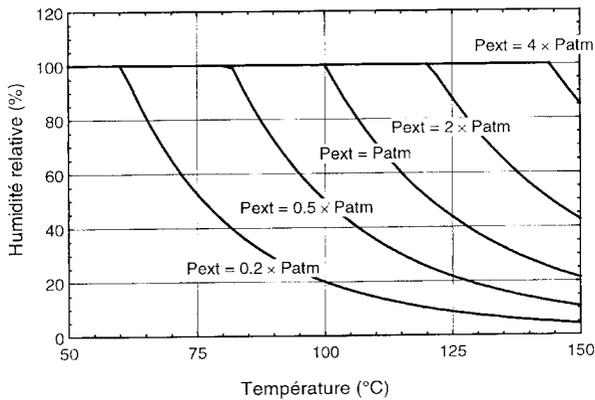


Figure 2. Humidité relative maximale en fonction de la pression totale et de la température.

paroi pour les capteurs et hublots de visualisation (figure 3).

Ses caractéristiques sont :

- contenance : 99 L (cylindre de 40 cm de diamètre) ;
- puissance électrique : 4.5 kW en triphasé ;
- température maximale : 132 °C (soit une surpression de service de 3 bars).

Pour des essais de fluage nous avons doté cet autoclave d'un dispositif de régulation thermique de type PID. Il s'agit d'un appareil Eurotherm programmable. Afin de préserver les sécurités d'origine de l'autoclave (fermeture de porte, surpression, niveau d'eau, surchauffe), la boucle de régulation a simplement été ajoutée sur la ligne d'alimentation des résistances électriques. Cette régulation apporte deux caractéristiques fondamentales :

- régulation de la température réelle de l'échantillon à l'aide d'un thermocouple type K ($\varnothing = 0,5$ mm) placé à sa surface.
- programmation de l'évolution de la température (croissance linéaire, plateau puis refroidissement).

Une centrale d'acquisition de données complète le dispositif pour la sauvegarde sur fichier des données de l'essai : températures et déplacements.

2.2. Support d'échantillons

L'instrumentation liée aux mesures mécaniques doit, elle-aussi, résister aux conditions de l'autoclave. Il a donc fallu imaginer et réaliser un dispositif expérimental spécifique. Il est composé d'un support très rigide en forme de couronne reposant sur trois pieds (figure 4).

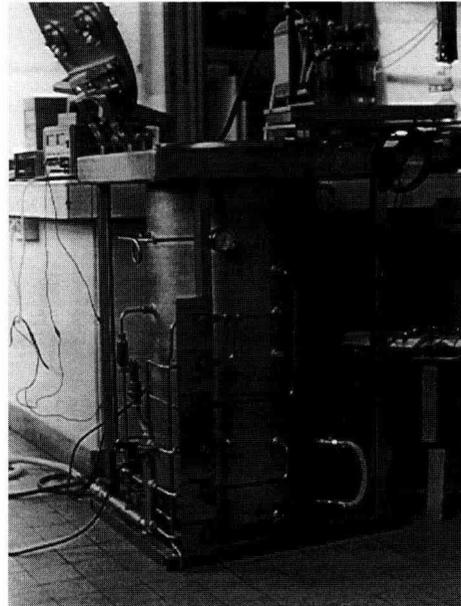


Figure 3. Autoclave utilisé pour les essais.

L'ensemble « support d'échantillon » permet la prise en étau de l'éprouvette et un déplacement sur la circonférence de la couronne. On y trouve d'une part une « mâchoire » (pièces 1 et 2) pour la fixation sur la couronne et, d'autre part, un ensemble (pièces 3, 4 et 5) pour le maintien de l'éprouvette. Ces deux « mâchoires » sont reliées entre elles par un axe permettant l'orientation de l'éprouvette dans l'enceinte. Par ailleurs, celle-ci peut être déplacée sur toute la circonférence de la couronne qui, grâce à sa dimension, autorise l'emploi d'éprouvettes dont la taille peut varier de quelques centimètres à une trentaine de centimètres de longueur.

Selon un principe analogue, la même couronne sert de support aux capteurs LDVT qui mesurent la déflexion des poutres encastrées (poutres « Cantilever »). Ces capteurs sont conçus pour résister aux conditions de l'autoclave (température et pression élevées et conditions de vapeur saturante).

2.3. Configuration géométrique et mécanique des éprouvettes

La forme des éprouvettes dépend de l'objectif recherché :

- parallélépipède pour obtenir un gradient de sollicitation selon la longueur,

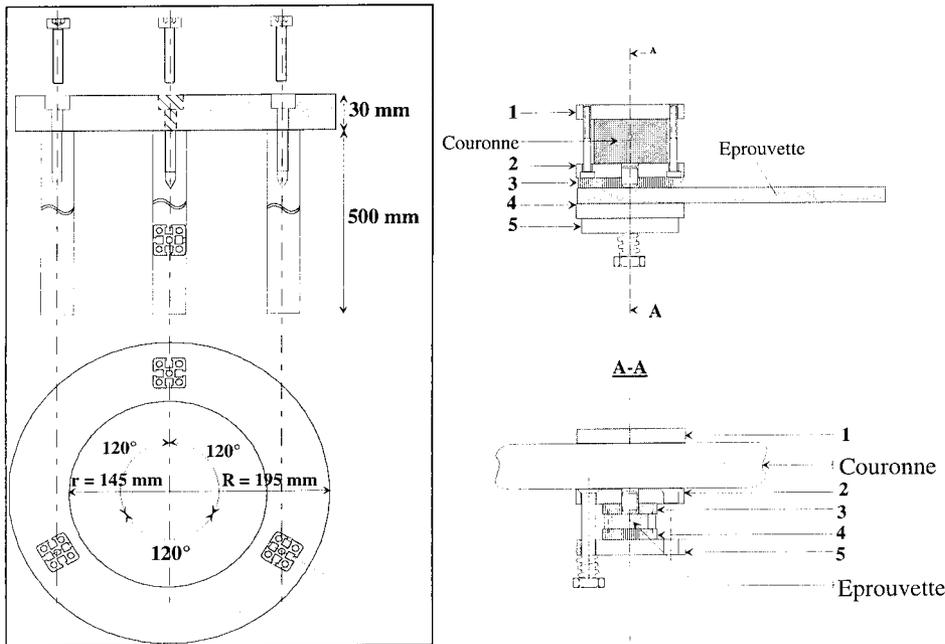


Figure 4. Supports des échantillons.

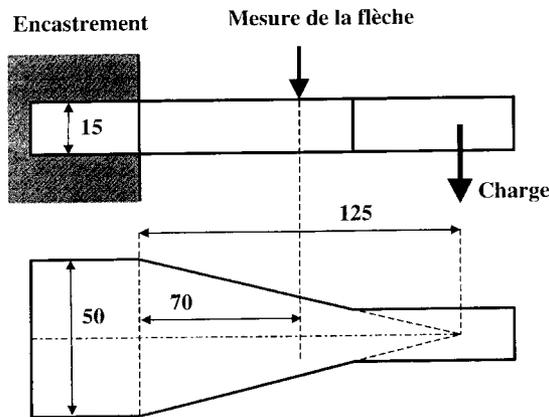


Figure 5. Configuration géométrique et sollicitations mécaniques.

– épreuve isocontrainte (figure 5) pour faciliter l’interprétation et ainsi caractériser plus facilement le matériau.

Seule cette deuxième géométrie sera utilisée dans ce travail. L’inertie de la poutre diminue linéairement selon des droites qui se rejoignent à l’endroit où est appliquée la charge (à 125 mm de l’encastrement). La déflexion est mesurée à 70 mm de l’encastrement.

Les échantillons sont prélevés sur des arbres fraîchement abattus. Les billons sont débités sur plots de 54 mm d’épaisseur. Pour une sollicitation mécanique dans la direction tangentielle, les échantillons sont des sections de 15 mm de long d’un plot débité sur dosse. Le reste du plot est enveloppé d’un film hermétique et placé en chambre froide jusqu’au prélèvement suivant. Tous les essais présentés sur le chêne proviennent du même plot. Cette condition garantit une bonne reproductibilité, donc une interprétation plus rigoureuse, des mesures.

3. Résultats expérimentaux

De nombreux essais ont été réalisés avec le dispositif décrit précédemment. Les figures 6 à 13 montrent quelques-uns des résultats obtenus et permettent d’illustrer les possibilités offertes par ce dispositif. La plupart des essais sont constitués d’une phase pendant laquelle la température augmente linéairement en fonction du temps suivie d’un plateau à la température finale. Le refroidissement est également enregistré. Il est simplement obtenu en coupant le chauffage. Ce protocole expérimental est largement inspiré des travaux de Genevaux [2]. Le caractère innovant des résultats présentés ci-après réside dans le niveau de température qu’il est possible d’atteindre et dans l’utilisation des paramètres identifiés

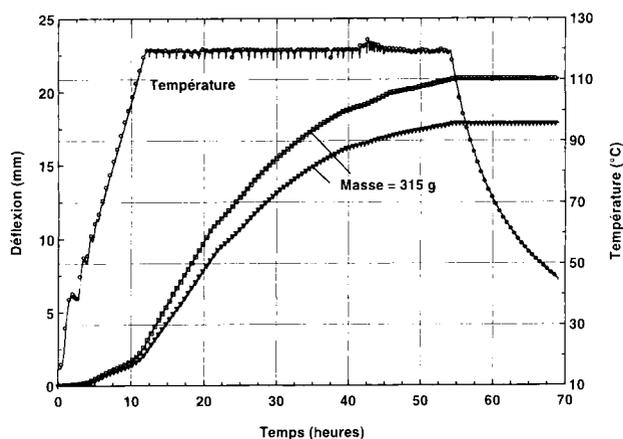


Figure 6. Exemple de fluage à haute température (chêne, 120 °C).

à partir d'une expérience pour la prédiction d'un autre chargement thermique.

La *figure 6* est un exemple typique de fluage à haute température sur du chêne « vert ». La flèche finale est ici impressionnante : environ 20 mm (*figure 7*) alors que la flèche mesurée à température ambiante, pour la même charge, est de l'ordre de 0,1 millimètre. Durant le palier à 120 °C, qui dure ici 40 h, la déflexion évolue d'abord linéairement dans le temps, puis s'incurve jusqu'à laisser entrevoir une asymptote horizontale. Le pic observé au voisinage de 60–70 °C doit également être noté. En se référant aux travaux publiés, ce pic peut être attribué à la transition vitreuse de la lignine. Par ailleurs, ce test montre la bonne reproductibilité des mesures : les deux éprouvettes, sections jointives de la même planche, présentent des comportements tout à fait similaires : le même écart, d'environ 15 %, est observé pendant toute la durée de l'essai.

La bonne reproductibilité des mesures nous autorise à envisager des configurations différentes pour les deux éprouvettes testées à chaque essai. La *figure 8* permet d'illustrer l'effet du niveau de chargement. En première approximation, le caractère linéaire du fluage semble confirmé : les courbes présentent des évolutions analogues. Le défaut de proportionnalité assez sensible entre chargement et déflexion (de l'ordre de 30 %) résulte certainement de la conjugaison de plusieurs phénomènes :

- effet du poids propre de l'échantillon, plus important en valeur relative pour une faible charge ;
- chargement non orthogonal à l'éprouvette lorsque la courbure est importante (l'extrémité de l'éprouvette fait

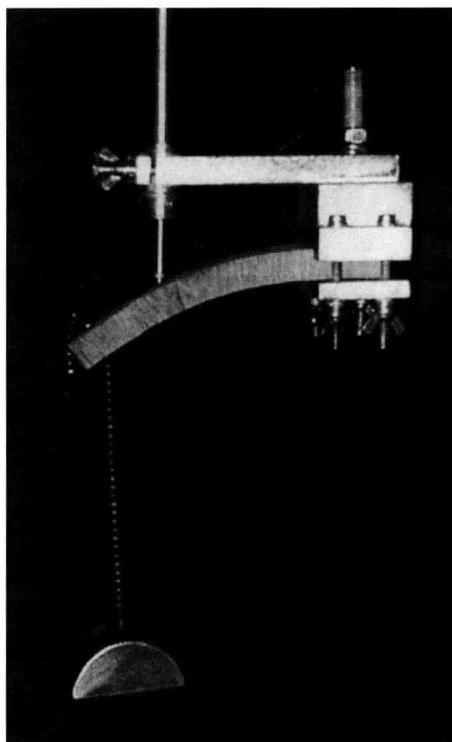


Figure 7. Une éprouvette de chêne et son support après un test de fluage à 120 °C.

un angle de l'ordre de 20° avec l'horizontale pour une déflexion de 10 mm) ;

- imprécision dans la reproductibilité des essais telle que constatée dans l'essai de la *figure 7*.

Cependant, une analyse plus fine des courbes permet de se prononcer en faveur d'un léger défaut de linéarité (au sens de la réponse du matériau en fonction du chargement) : la déflexion mesurée avec la charge la plus faible laisse entrevoir plus nettement une asymptote horizontale, c'est-à-dire une déformation finie pour des temps très longs.

La *figure 9* montre un test effectué sur de l'épicéa. L'échantillon non chargé se déforme sous son poids propre, ce qui confirme le caractère très prononcé du fluage sur du bois vert porté à haute température. Par ailleurs, la forme de la courbe de fluage est très intéressante : l'augmentation significative de la flèche à 60–70 °C, observée sur tous les échantillons de chêne, n'est pas présente pour l'épicéa. Ce phénomène peut être attribué à la différence des lignines présentes dans ces deux espèces.

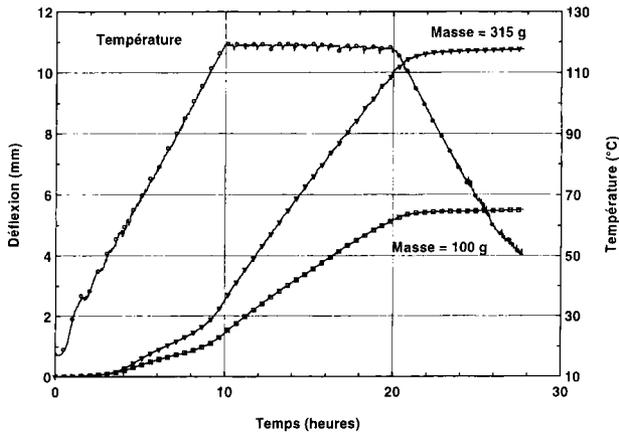


Figure 8. Fluage à haute température (chêne, 120 °C) : effet du niveau de chargement de l'éprouvette.

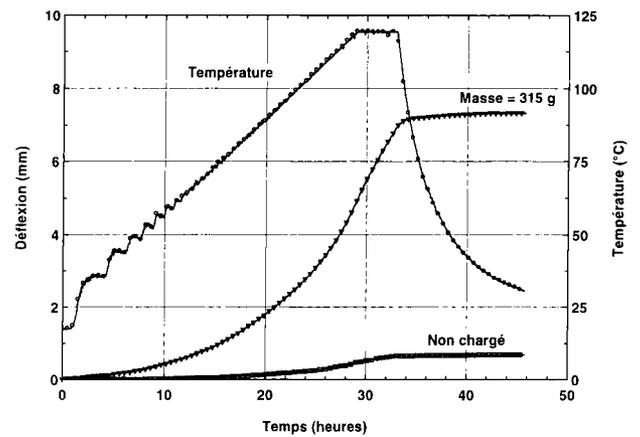


Figure 9. Fluage à haute température (épicéa, 120 °C) : une éprouvette chargée, une éprouvette non chargée.

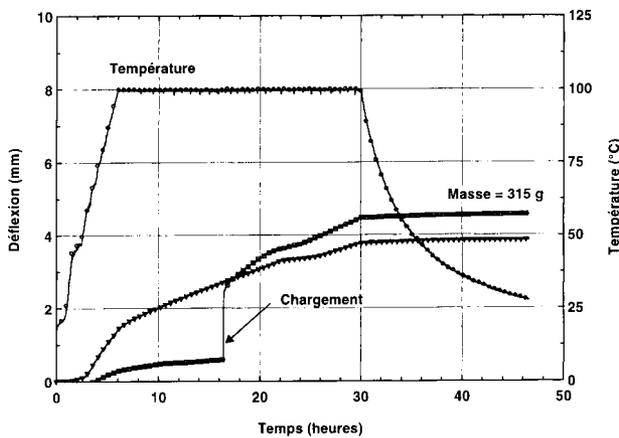


Figure 10. Fluage à haute température (chêne, 120 °C) : chargement en cours d'essai.

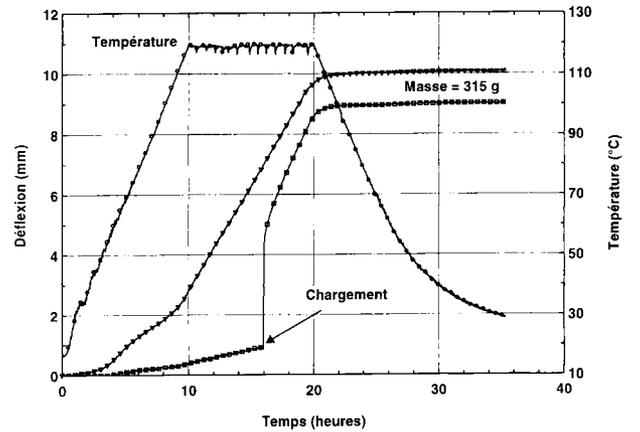


Figure 11. Fluage à haute température (chêne, 120 °C) : chargement en cours d'essai.

Afin de mieux identifier le comportement rhéologique du bois, le dispositif expérimental a été muni d'un passage étanche qui permet de modifier le chargement au cours de l'essai. Les figures 10 et 11 montrent deux essais pour lesquels l'une des éprouvettes fut chargée pendant le palier à température constante. Lors du chargement de l'échantillon, la température est déjà élevée, ce qui explique la vitesse de fluage très importante. En conséquence, son comportement rejoint très rapidement celui de l'éprouvette qui fut chargée au début de l'expérience. Cette observation est conforme au principe de superposition de Boltzmann, applicable seulement pour

un milieu visco-élastique linéaire [1] associé au concept de thermoactivation des mécanismes différés. La comparaison de ces deux essais permet également de comparer le fluage à température constante à 100 °C et à 120 °C. Les vingt degrés supplémentaires ont peu d'effet sur la forme des courbes, mais beaucoup d'effet sur leur amplitude. En effet, chaque essai montre une phase d'évolution linéaire de la déflexion lorsque le plateau thermique est atteint. De plus, le comportement pour des temps plus longs fait apparaître, à 100 °C, un changement de forme analogue à celui qui fut observé sur la figure 6. Du point de vue de l'amplitude, la déflexion mesurée à 100 °C est

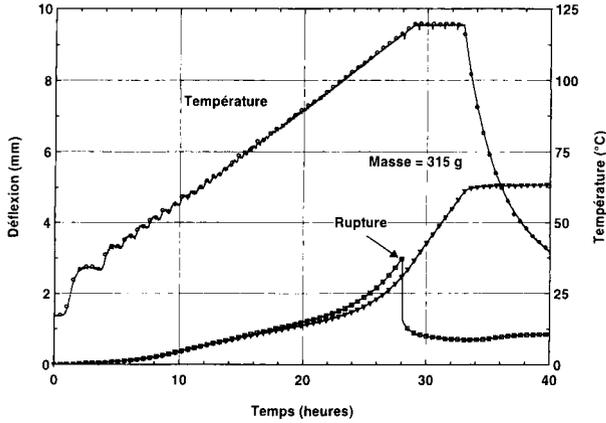


Figure 12. Fluage à haute température (chêne, 120 °C) : déchargement en cours d’essai consécutif à la rupture de l’extrémité de l’échantillon.

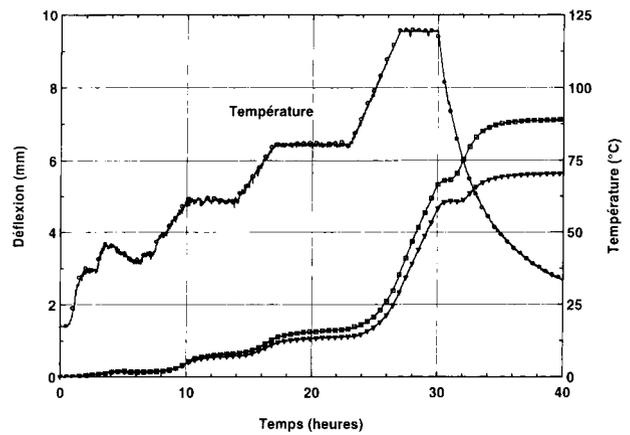


Figure 13. Fluage à haute température (chêne, 120 °C) : échelons successifs de température.

de l’ordre de 4 mm après 25 h de palier (figure 10) plutôt que 16 mm à 120 °C (figure 6). L’analyse de la partie linéaire montre la même différence : 0,1 millimètre par heure à 100 °C contre 0,8 mm h à 120 °C.

La configuration de la figure 12 était involontaire. Après 28 h, l’extrémité d’une éprouvette a cassé. Cet aléa a libéré la charge mais la mesure de la flèche qui, rappelons-le, est effectuée à 70 mm de l’encastrement, est restée opérationnelle. Ce test montre qu’une grande partie de la déformation est recouverte en moins d’une heure. Le comportement ultérieur ressemble en fait à celui d’une éprouvette soumise à son poids propre.

Enfin, nous présentons un essai pour lequel la régulation en température se fait par rampes linéaires suivies de paliers successifs (figure 13). Cette procédure, facile à mettre en œuvre grâce au régulateur, permet d’observer le fluage à température constante pour différents niveaux température. Ce type d’essai sera utilisé à la fin de ce travail afin de tester la pertinence des lois de comportement identifiées sur les essais à température linéairement croissante dans le temps.

4. Modélisation du comportement mécanique

4.1. Déflexion de la poutre isocontrainte

La configuration de la poutre (figure 5) est définie à l’aide des paramètres suivants :

- ℓ largeur de la poutre à l’encastrement (m)
- h hauteur de la poutre (m)

- L point d’application de la charge compté à partir de l’encastrement (m)
- L_0 point de mesure de la déflexion compté à partir de l’encastrement (m)
- F charge = mg (N)
- E module d’Young apparent de l’échantillon.

La géométrie de la poutre est telle que son moment d’inertie par rapport à l’axe neutre varie linéairement en x :

$$I(x) = \frac{(L - x) \ell h^3}{12L} \tag{1}$$

L’approche classique de la résistance des matériaux [18], permet de montrer que cette variation linéaire du moment d’inertie est compensée par la variation linéaire du moment fléchissant. En effet, en négligeant l’effet de l’angle dû à la déflexion au niveau de l’application de la charge, et en supposant que la courbure de la ligne élastique ne dépend que de la valeur du moment fléchissant (effet de l’effort tranchant négligé), on obtient un rayon de courbure ρ constant

$$\frac{1}{\rho} = \frac{12FL}{\ell h^3 E} \tag{2}$$

En supposant un encastrement parfait, la déflexion mesurée en $x = L_0$ s’exprime par :

$$H = \rho \left(1 - \cos \left\{ \arcsin \left(\frac{L_0}{\rho} \right) \right\} \right) \tag{3}$$

Cependant, puisque l'angle entre la ligne neutre et l'horizontale a été négligé dans l'expression (2), la formule (3) doit également considérer que la déflexion H reste petite. Les fonctions trigonométriques peuvent se simplifier pour obtenir l'expression suivante :

$$H = \frac{6FL_0^2L}{\ell h^3 E} \quad (4)$$

En dépit des hypothèses formulées pour son établissement, l'expression (4) sera utilisée pour identifier les paramètres de la loi de comportement à partir des courbes expérimentales. La géométrie de l'éprouvette nous autorise à négliger l'effet du cisaillement (direction longitudinale dans le sens de l'épaisseur). Par ailleurs, la *figure 14* reporte les valeurs calculées à partir des formules (3) et (4) avec les dimensions de la configuration expérimentale. L'approximation des petits déplacements a un effet imperceptible en deçà de 10 mm de déflexion. Elle reste correcte jusqu'à 15 mm.

En revanche, nous ne pouvons plus confondre coordonnée curviligne de la ligne élastique et axe Ox pour des déflexions très importantes. L'essai de la *figure 6* ne pourra donc pas être interprété avec cette expression, d'autant que de telles déflexions, la charge n'est plus appliquée perpendiculairement à l'extrémité de l'échantillon.

La déflexion mesurée à température ambiante pour une charge F donnée permet d'évaluer le module d'Young de l'éprouvette. Pour du chêne vert, nous obtenons une déflexion de l'ordre de 0,42 mm pour les conditions suivantes :

ℓ	50 mm
h	15 mm
L	125 mm
L_0	70 mm
F	10 N

L'utilisation de la formule (4) donne un module d'Young très proche de 500 MPa, valeur conforme à la littérature [4].

4.2. Comportement viscoélastique, température constante

Plusieurs modèles sont proposés dans la littérature pour décrire le comportement mécanique différé du bois. Les essais étant effectués sur du bois vert sans séchage (grâce à l'autoclave), les effets mécanosorptifs sont éliminés.

Dans un premier temps, l'interprétation se fera en terme de comportement viscoélastique linéaire. La forme

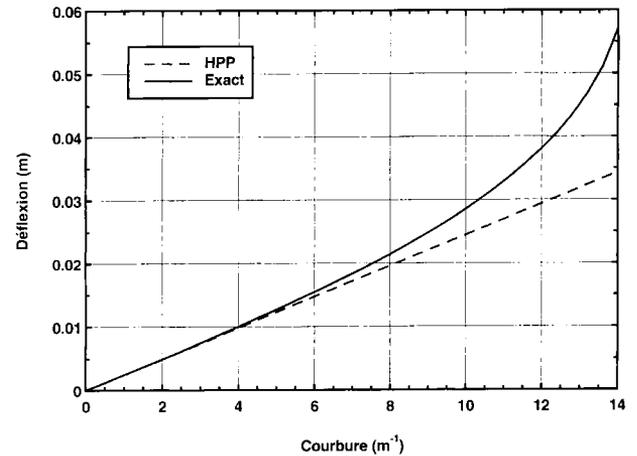


Figure 14. Zone de validité de l'approximation des petits déplacements.

générale de ce comportement fait intervenir une fonction fluage tensorielle. Le tenseur des déformations à l'instant t fait intervenir toute l'histoire du chargement du matériau sous la forme d'un produit de convolution :

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t J_{ijkl}(t-t') \frac{d\sigma_{kl}}{dt'} dt' \quad (5)$$

Les modèles rhéologiques les plus souvent proposés pour exprimer la fonction fluage sont les modèles « puissance » et les modèles « exponentiel ». La forme la plus générale de la loi exponentielle exprime la fonction de fluage sous la forme d'un spectre continu de temps de retard. En se limitant à des chargements unidirectionnels, nous obtenons :

$$J(t) = J_0 + \int_0^{\infty} A(\tau) \left(1 - \exp\left(-t/\tau\right) \right) d\tau \quad (6)$$

Ce spectre continu est impossible à caractériser expérimentalement. Dans la pratique, on se limite à des temps caractéristiques discrets en nombre fini. Ceci revient à modéliser le milieu par des éléments de Kelvin placés en série (*figure 15*)

Avec cette approche discrète, la fonction fluage devient :

$$J(t) = J_0 + \sum_{n=1}^N a_n \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \right\} \quad (7)$$

Pour un test où une charge s constante est appliquée en échelon au temps $t = 0$, la déformation s'écrit :

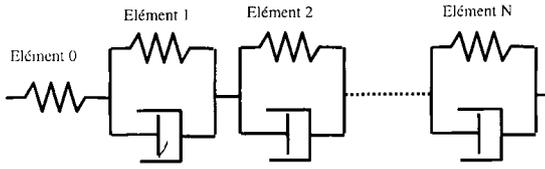


Figure 15. Eléments de Kelvin placés en série.

$$\varepsilon(t) = \sigma \left(\frac{1}{E} + \sum_{n=1}^N a_n \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \right\} \right) \quad (8)$$

Chaque élément n fait intervenir deux paramètres : a_n , inverse d'un module de rigidité et τ_n constante de temps.

L'effet de la température sera modélisé classiquement en supposant que a_n reste constant et que seul τ_n dépend de la température selon une loi d'Arrhénius.

$$\tau_n = \tau_n^\infty \exp\left(\frac{\Delta W_n}{RT}\right) \quad (9)$$

ΔW_n est l'énergie d'activation ($J \cdot mol^{-1}$)

R est la constante des gaz parfaits ($8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

T est la température absolue (K)

τ_n^∞ est le temps de retard pour une température « infinie ».

Finalement, chaque élément est défini par trois paramètres : a_n , τ_n^∞ et ΔW_n .

En pratique, τ_n^∞ est difficile à interpréter. Dans les tableaux de résultats, il sera remplacé par τ_n^{20} temps de retard caractéristique à 20 °C :

$$\tau_n^{20} = \tau_n^\infty \exp\left(\frac{\Delta W_n}{R \times 293}\right) \quad (10)$$

4.3. Comportement viscoélastique, température variable

Lorsque la température varie au cours de l'essai, la formule (8) n'est plus valable. Il faut exprimer le fluage en taux de déformation :

$$\frac{d\varepsilon_{tot}}{dt} = \sum_n \frac{d\varepsilon_n}{dt} \quad (11)$$

avec
$$\frac{d\varepsilon_n}{dt} = (\sigma a_n - \varepsilon_n) \frac{1}{\tau_n(T)}$$

Cette expression suppose qu'il n'existe pas de couplage thermo-mécanique autre qu'une accélération des méca-

nismes lorsque la température augmente. En pratique, la déformation totale sera calculée à partir d'incrémentes finis de temps. L'intégration se fait en faisant l'hypothèse, pleinement justifiée sur des incréments de l'ordre de la minute, que le temps caractéristique τ_n est constant pendant l'incrément de temps. En revanche, ne connaissant pas a priori la valeur de la constante de temps, notamment à haute température, nous utiliserons la formule suivante, qui assure une intégration exacte :

$$\delta\varepsilon_n = (\sigma a_n - \varepsilon_n) \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-\delta t}{\tau_n(T)}\right) \right\} \quad (12)$$

Les expressions (10) et (12) permettent de calculer la réponse de la poutre en fonction du chargement initial et des caractéristiques estimées pour chaque élément de Kelvin. En effet, le caractère linéaire des équations permet facilement d'étendre l'expression obtenue pour la poutre Cantilever utilisée expérimentalement au cas du comportement viscoélastique. Les paramètres définissant la loi de comportement (trois paramètres indépendants par élément de Kelvin) sont déterminés par identification en minimisant l'écart entre la courbe simulée et la courbe mesurée. Nous avons minimisé cet écart au sens des moindres carrés :

$$\text{critère} = \frac{\sum_{\text{Points expérimentaux}} (\text{flèche mesurée} - \text{flèche calculée})^2}{\text{Nombre de points}} \quad (13)$$

Cette procédure a été utilisée pour dépouiller deux des essais présentés ci-dessus. Notons que la déflexion initiale est négligeable par rapport au comportement différé : l'élément 0, qui correspond au comportement élastique instantané n'est pas identifié.

Prenant en considération le caractère global du critère, sa minimisation est obtenue à l'aide de la méthode du simplexe [13]. Cependant, la minimisation à l'aide d'éléments de Kelvin n'est jamais facile. Avec trois paramètres par éléments, les pièges posés par les minima locaux deviennent nombreux dès que le nombre d'éléments augmentent. Les valeurs estimées injectées dans l'algorithme doivent donc être suffisamment proches des valeurs optimales. Le contrôle graphique est indispensable, ainsi que la valeur finale du critère. La stabilité de la solution doit également être vérifiée (différentes valeurs initiales, injection des valeurs identifiées comme valeurs initiales). Afin de bien représenter les petites déformations mesurées à basse température, les valeurs estimées initiales ont été déterminées en identifiant uniquement la partie de la courbe concernée.

La figure 16 montre que la réponse de l'épicéa est déjà très bien représentée avec seulement un élément de Kelvin. Avec deux éléments, la correspondance entre

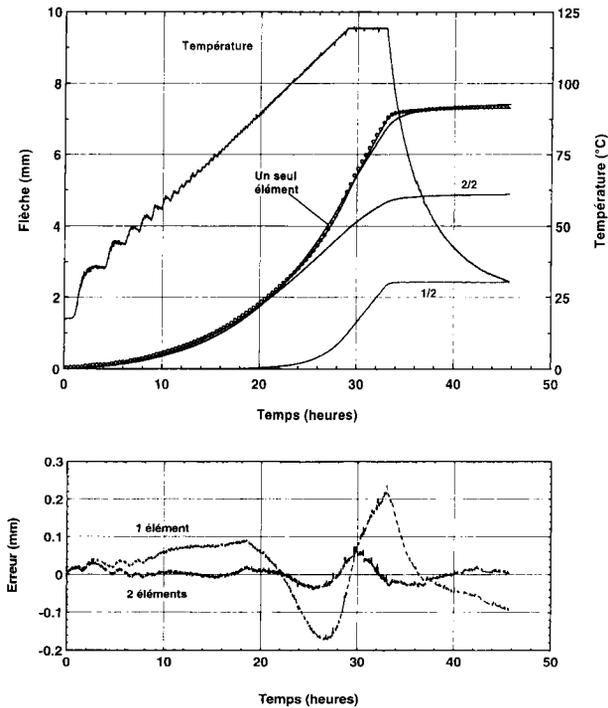


Figure 16. Modèle de fluage identifié sur un essai d'épicéa (un et deux éléments de Kelvin).

courbe mesurée et courbe calculée devient excellente. Les erreurs résiduelles (valeur mesurée – valeur calculée) permet de mieux cerner la qualité de lissage obtenue avec deux éléments (figure 16). Il faut toutefois noter que les valeurs identifiées avec deux éléments produisent une réponse similaire avec une stratégie sensiblement différente (tableau I). Le deuxième élément ressemble beaucoup à l'élément unique du cas précédent. Il est cependant plus rigide et représente donc potentiellement une déformation complètement relaxée plus petite. Le premier élément a lui une rigidité très faible et une énergie d'activation beaucoup plus importante. En consé-

quence, il se déclenche plus soudainement à des températures plus élevées et pour une réponse pratiquement linéaire en temps lorsque le plateau en température est atteint.

Le comportement simulé pour des temps très longs ou des températures plus élevées serait donc significativement différent entre le modèle à un élément et le modèle à deux éléments.

En raison du pic observé à 60-70 °C, la réponse obtenue dans le cas du chêne ne peut assurément pas être simulée à partir d'un seul élément de Kelvin (voir erreur résiduelle sur la figure 17). Ce constat est quantifié par la forte valeur du critère obtenu dans ce cas (tableau II). Avec deux éléments, la réponse est correctement retrouvée (figure 17). Étant donnée la très faible valeur de la rigidité relaxée identifiée pour le premier élément (tableau II), le milieu simulé s'apparente à un modèle de Burgers, généralement utilisé pour modéliser un fluide. Ce constat logique provient de la variation linéaire de la flèche au cours du temps durant le palier de température à 120 °C. La contribution respective de chaque élément est tracée sur la figure 17. Le premier élément produit un écoulement similaire à celui d'un fluide qui serait activé lorsque la température est suffisamment élevée.

La figure 17 et le tableau II proposent également les résultats obtenus en identifiant la courbe expérimentale à l'aide de trois éléments de Kelvin. L'observation des valeurs et des courbes montre que le troisième élément n'apporte pas d'information nouvelle. En fait, les éléments 2 et 3 du modèle à trois éléments sont utilisés pour améliorer le pic de déformation observé sur les mesures au voisinage de 60 – 70 °C. Ce pic était simulé par l'élément 2 seulement dans le modèle à deux éléments.

Ce transfert d'un à deux éléments de Kelvin pour représenter le même pic permet de bien comprendre le couplage qui existe entre les trois paramètres qui définissent un élément de Kelvin :

a_n , inverse d'une rigidité, détermine la déformation obtenue lorsque l'élément est complètement relaxé.

τ_n^∞ et ΔW_n doivent être interprétés simultanément. Ils déterminent la plage de température pour laquelle l'élément peut se relaxer (cette notion ne peut pas être disso-

Tableau I. Valeurs identifiées pour l'épicéa (essai de la figure 9) : un et deux éléments de Kelvin.

Nombre d'éléments (valeur du critère)	n	Module relaxé ($1/a_n$) MPa	Temps à 20 °C τ_n^{20} (h)	Énergie d'activation kJ/mole
1 ($7,1 \cdot 10^{-3}$)	1	4,09	$1,47 \cdot 10^{+3}$	40
2 ($3,4 \cdot 10^{-4}$)	1	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{+11}$	130
	2	11,7	$4,21 \cdot 10^{+2}$	39

ciée du temps d'observation). Cependant, en augmentant ΔW_n et en diminuant τ_n^∞ simultanément, il est possible de garder le même niveau de température, mais avec un déclenchement plus brutal de la relaxation.

Pour revenir au *tableau II*, le pic à 60–70 °C est représenté soit avec un élément peu rigide qui a une faible énergie d'activation (déclenchement réparti sur une forte plage de température), soit avec deux éléments plus rigides ayant des énergies d'activation plus élevées (déclenchement plus rapide).

Parlons enfin d'un élément qui n'est que très partiellement relâché au cours de la simulation (premier élément du modèle à deux éléments du *tableau I* par exemple). Dans ce cas, un fort couplage existe entre a_n et τ_n^∞ : la courbe de fluage est définie seulement par le rapport des deux (équation 11 avec $\varepsilon_n \approx 0$) : seul le rapport a_n / τ_n^∞ est précis pour cet élément.

4. Utilisation du modèle

L'intérêt du paragraphe précédent est de proposer une loi de comportement pour du bois vert jusqu'à 120 °C. Le modèle proposé utilise des éléments de Kelvin thermoactivés placés en série. Bien entendu, en augmentant le nombre d'éléments, le nombre de paramètres identifiés augmente considérablement (trois par élément). Il est donc possible de lisser n'importe quelle courbe expérimentale. Ce paragraphe est destiné à donner un peu de crédit aux valeurs identifiées. La première étape consiste à utiliser les paramètres identifiés pour simuler une autre expérience, en l'occurrence l'essai de la *figure 13* (quatre rampes suivies de quatre paliers à 40 °C, 60 °C, 80 °C et 120 °C).

La réponse a été simulée en utilisant la température mesurée de l'échantillon et le modèle à trois éléments identifié sur l'expérience de la *figure 8* (*tableau II*).

Le résultat est quantitativement correct (*figure 18*). En particulier, la valeur finale de la flèche est parfaitement retrouvée¹.

1. L'augmentation expérimentale de la flèche pendant le refroidissement doit être attribuée à un phénomène particulier : pendant le refroidissement, qui est obtenu par les pertes thermiques, l'atmosphère dans l'étuve n'est plus tout à fait saturée. L'échantillon est refroidi par évaporation puis condensation sur les parois. Cet assèchement peut provoquer un effondrement des parois sous l'action des forces capillaires (collapse), voire un séchage jusqu'au point de saturation des parois (couplage mécanosorptif). Dans les deux cas, les zones concernées sont les zones périphériques, qui sont également le plus sollicitées.

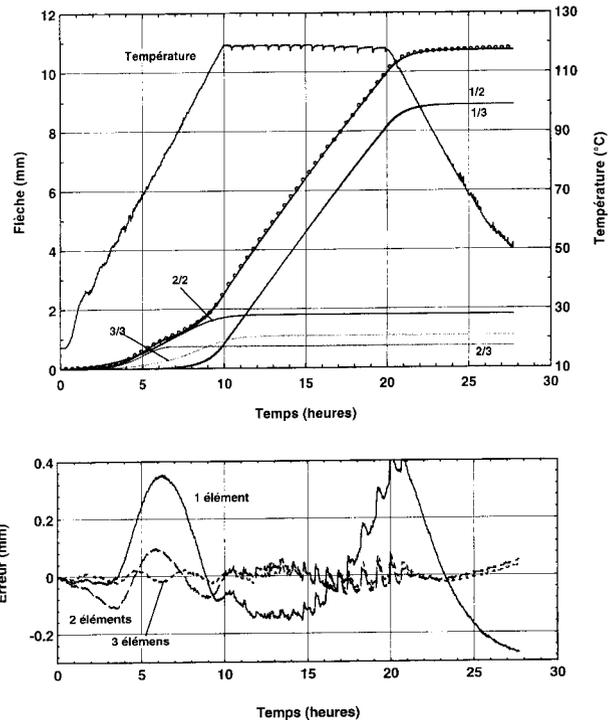


Figure 17. Modèle de fluage identifié sur un essai de chêne (deux et trois éléments de Kelvin).

L'augmentation expérimentale de la flèche pendant le refroidissement doit être attribuée à un phénomène particulier : pendant le refroidissement, qui est obtenu par les pertes thermiques, l'atmosphère dans l'étuve n'est plus tout à fait saturée. L'échantillon est refroidi par évaporation puis condensation sur les parois. Cet assèchement peut provoquer un effondrement des parois sous l'action des forces capillaires (collapse), voire un séchage jusqu'au point de saturation des parois (couplage mécanosorptif). Dans les deux cas, les zones concernées sont les zones périphériques, qui sont également le plus sollicitées.

En revanche, la forme de la courbe n'est pas satisfaisante. Les paliers très nets de déformation mesurés durant les plateaux isothermes sont dégénérés en variation de vitesse de fluage. L'identification des paramètres à partir d'une courbe mesurée pendant une rampe de montée linéaire en température semble donc privilégier des énergies d'activation faibles, pour des éléments de Kelvin qui se relaxent sur une large plage de température.

Suite à ce constat, nous avons effectué la procédure inverse : identification des paramètres à partir des paliers

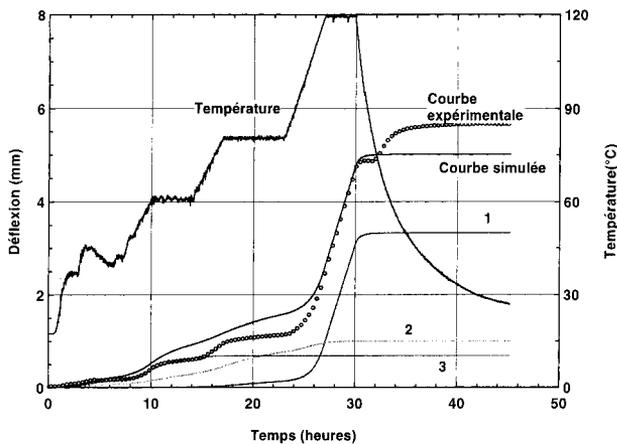
Tableau II. Valeurs identifiées pour le chêne (essai de la figure 8) : un, deux et trois éléments de Kelvin.

Nombre d'éléments (valeur du critère)	n	Module relaxé ($1/a_n$) MPa	Temps à 20 °C τ_n^{20} (h)	Énergie d'activation kJ/mole
1 ($3,3 \cdot 10^{-2}$)	1	3,04	$1,37 \cdot 10^{+3}$	40
2 ($1,9 \cdot 10^{-3}$)	1	$1,8 \cdot 10^{-7(1)}$	$1,05 \cdot 10^{+14(1)}$	118
	2	37,2	64,4	41
3 ($3,8 \cdot 10^{-4}$)	1	$1,05 \cdot 10^{-7(1)}$	$0,81 \cdot 10^{+14(1)}$	111
	2	61,9	368	56
	3	90,2	293	95

(1) Seul le rapport a_n / τ_n^{20} est précis pour ces éléments

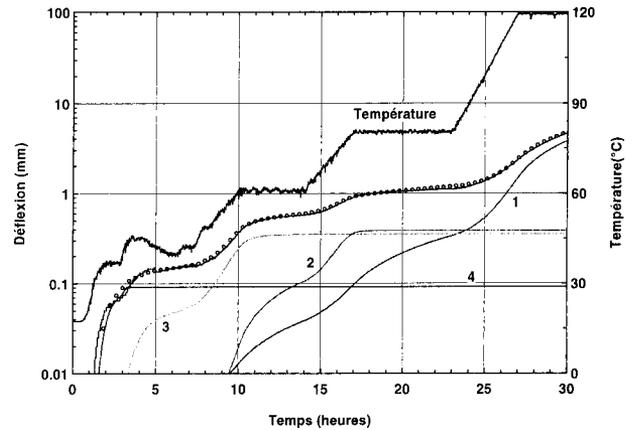
Tableau III. Valeurs identifiées pour le chêne (essai de la figure 13) : quatre éléments de Kelvin.

Nombre d'éléments (valeur du critère)	n	Module relaxé ($1/a_n$) MPa	Temps à 20 °C τ_n^{20} (h)	Énergie d'activation kJ/mole
4 ($4,0 \cdot 10^{-4}$)	1	4,42	$2,37 \cdot 10^{+5}$	93
	2	160	$2,34 \cdot 10^{+5}$	191
	3	175	$4,33 \cdot 10^{+3}$	172
	4	675	$2,67 \cdot 10^{+2}$	261

**Figure 18.** Simulation d'un essai de fluage à paliers successifs à l'aide du modèle à trois éléments de Kelvin de la figure 16.

successifs, puis simulation de la rampe suivie du plateau unique à 120 °C.

L'analyse précédente est avérée : l'expérience avec des paliers successifs permet d'identifier parfaitement jusqu'à quatre éléments de Kelvin (tableau III). Chacun de ces éléments a une énergie d'activation beaucoup plus élevée que toutes les valeurs obtenues jusqu'à présent. Les rigidités sont également plus importantes (excepté la

**Figure 19.** Modèle de fluage identifié sur un essai de chêne à paliers successifs (quatre éléments de Kelvin).

première valeur). Cela signifie que, durant chaque palier, l'un des éléments se relaxe entièrement sur une plage restreinte de température. Ce constat est imposé par la forme de la déflexion expérimental.

Pour permettre une lecture plus précise aux faibles valeurs de température, la déflexion est tracée en échelle logarithmique (Fig. 19). La qualité du lissage est parfaite.

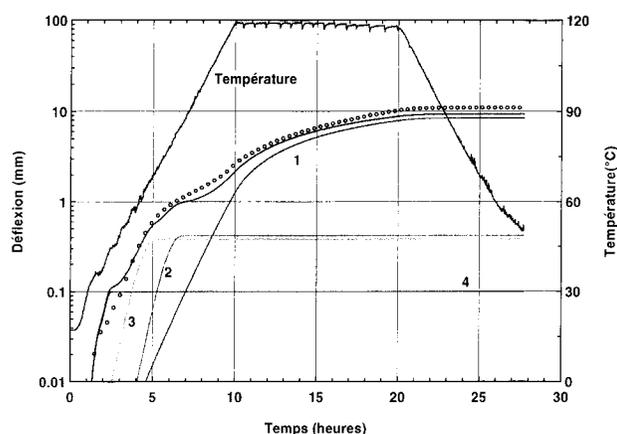


Figure 20. Simulation d'un essai de fluage à température linéairement croissante à l'aide du modèle à quatre éléments de Kelvin de la figure 18.

Utilisé pour simuler l'essai de la figure 8, ce modèle à quatre paramètres donne d'excellents résultats (figure 20). Seul le quatrième élément induit un pic de déformation entre 2 et 3 h qui n'a pas été observé. Cependant, en raison des problèmes de régulation rencontrés à basse température (mauvaises conditions de convection naturelle) la température réelle de l'échantillon peut être différente de celle du capteur de surface pourtant utilisée dans le calcul. Le reste de la courbe est très bien représenté, y compris le fluage observé durant le plateau à 120 °C.

Ce jeu croisé d'identification-simulation permet de conclure que des plateaux à différents niveaux de température permettent une identification plus précise des paramètres du modèle que nous avons choisi ici (éléments de Kelvin placés en série). Par ailleurs, puisqu'il repose sur la relaxation complète de chaque élément, il procure un modèle beaucoup plus robuste.

Ces observations nous amène à relativiser la pertinence de la représentation du comportement viscoélastique du bois à partir d'un ensemble discret de constantes de temps. De toute évidence, le matériau bois doit être modélisé à partir d'un spectre continu. Le lissage de courbes expérimentales à l'aide d'éléments de Kelvin est simplement d'autant plus représentatif du comportement, donc de sollicitations différentes, que le nombre de paliers est important. Ceci sous-entend que, à chaque palier en température, un élément de Kelvin pourra être identifié avec suffisamment de précision.

6. Conclusion

Un dispositif de fluage sur du bois vert a été mis en place. Grâce à l'utilisation d'un autoclave et d'un régulateur programmable, il permet de choisir toute évolution temporelle de température entre la température ambiante et 130 °C, en restant sous condition de vapeur saturante. De nombreux essais ont été effectués, essentiellement sur du chêne sollicité en direction tangentielle. Ces essais confirment l'effet considérable de la température sur le fluage du bois vert : la flèche obtenue après un séjour prolongé à 120 °C est environ 100 fois celle mesurée avec la même charge à température ambiante.

L'objectif de ces mesures étant une meilleure caractérisation du comportement mécanique différé du bois, une deuxième partie est consacrée à l'analyse des courbes expérimentales brutes. Le matériau est modélisé à l'aide d'un ou plusieurs éléments de Kelvin thermoactivés placés en série. Cette analyse a permis de préciser la différence de comportement entre le chêne et l'épicéa.

Enfin, l'utilisation des paramètres identifiés à des fins de simulation d'autres expériences a permis de bien définir les possibilités du modèle. La principale conclusion est que le modèle peut être fiable, précis et robuste à condition que le protocole expérimental servant à l'identification présente des paliers successifs en température.

L'intérêt majeur de ce travail est de proposer des paramètres de lois de comportement valables pour du bois vert jusqu'à 120 °C. C'est une étape importante pour la modélisation macroscopique de procédés faisant appel à des niveaux élevés de température : séchage, formage, étuvage...

References

- [1] Findley W.N., Lai J.S., Onaran K., Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials, North-Holland Publishing Co., Amsterdam 1976.
- [2] Genevaux J.-M., Le fluage à température linéairement croissante : Caractérisation des sources de viscoélasticité anisotrope du bois, thèse de l'Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, 1989.
- [3] Gril J., Couplages et blocages en rhéologie du bois, Habilitation à diriger des recherches, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier II, pp. 88, 1997.
- [4] Goring D.A.I., Thermal Softening of Lignin, Hemicellulose and Cellulose, Pulp and Paper Magazine of Canada, 1963, T 517-527.
- [5] Guitard D., Mécanique du matériau bois et composites, Cepadues Editions, 1987, pp. 238.
- [6] Irvine G.M., The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurements by differential thermal analysis, Tappi J. 67 (1984) 118-121.

- [7] Kelley S.S., Rials T.G., Glasser W.G., Relaxation behaviour of the amorphous components of wood, *J. Mater. Sci.* 22 (1987) 617–624.
- [8] Le Govic C., Panorama des travaux scientifiques mondiaux sur le fluage du bois sans défaut (Effet de la température et de l'humidité), CTBA Paris, 1992.
- [9] Le Govic C., Hadjhamou A., Rouger F. et Felix B., Modélisation du fluage du bois sur la base d'une équivalence Temps-Température, pp. 349-356 ; actes du 2^e colloque Sciences et Industries du bois, Nancy, avril 1987 ; *Arboror*, Nancy, 1988.
- [10] Maeda H., Fukada E., Effect of bound water on piezoelectric, dielectric and elastic properties of wood, *J. Appl. Polym. Sci.* 33 (1987) 1187–1198.
- [11] Mudry M., Panorama des travaux scientifiques mondiaux sur la mécanique et la rhéologie du bois, Rhéologie des matériaux anisotropes, 19^e congrès du Groupe français de rhéologie, Cepadues Éditions, 1984, 353 – 410.
- [12] Ostberg G., Salmen L., Terlecki J., Softening temperature of moist wood measured by differential scanning calorimetry, *Holzforschung* 44 (1990) 223–225.
- [13] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., *Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1992, pp. 402–406.
- [14] Ranta-Maunus A., The viscoelasticity of wood at varying moisture content, *Wood Sci. Technol.* 9 (1975) 189–205.
- [15] Salmen L., Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions, *J. Mater. Sci.* 19 (1984) 3090–3096.
- [16] Schniewind A.P., Recent progress in the study of the rheology of wood, *Wood Sci. Technol.* 2 (1968) 188–206.
- [17] Schniewind A.P., Barrett J.D., Wood as linear orthotropic viscoelastic material, *Wood Sci. Technol.* 6 (1972) 43–57.