



# Modélisation du vieillissement physique dans le bois vert

Jana Dlouha, Bruno Clair, Joseph Gril

## ► To cite this version:

Jana Dlouha, Bruno Clair, Joseph Gril. Modélisation du vieillissement physique dans le bois vert. 43ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Oct 2008, Palaiseau, France. 4p. hal-00546302

**HAL Id: hal-00546302**

**<https://hal.science/hal-00546302>**

Submitted on 5 Mar 2013

**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.

# Modélisation du vieillissement physique dans le bois vert

J. Dlouha<sup>1, 2</sup>, B. Clair<sup>1</sup> et J. Gril<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Montpellier, France ; <sup>2</sup> MZLU à Brno, Département des Sciences du Bois, République Tchèque

**Résumé :** Le phénomène du vieillissement physique caractéristique des polymères semi-cristallins a été décrit dans le bois vert (jamais séché) de trois feuillus tropicaux. L'hypothèse du taux de vieillissement uniforme proposé par Struik pour les polymères synthétiques a été vérifiée. Grâce à la représentation des résultats expérimentaux dans le plan complexe approché le modèle de Maxwell parabolique a été proposé pour décrire le phénomène et utilisé avec succès sur l'ensemble des éprouvettes.

**Mots-clé :** vieillissement physique – bois vert – modèle parabolique

## 1. Introduction

Le bois est un polymère complexe dont la partie cellulosique est organisée sous forme cristalline enveloppée d'une matrice amorphe composée d'hémicelluloses et de lignine. De nature hygroscopique, ses propriétés sont fonction à la fois de la température et de la teneur en eau. Dans les tissus vivants, cependant, les parois cellulaires sont à l'état saturé et la variation de la teneur en eau due au changement de la température reste négligeable devant l'effet de la température elle-même.

Pour prédire le comportement à long-terme à partir des essais de fluage, on a en général recours à une procédure accélérée basée sur le principe d'équivalence temps-température. Pour des matériaux précontraints tels que le bois [1], la déformation mesurée à des températures plus élevées est néanmoins une superposition de la libération des déformations bloquées et la déformation due au chargement lui-même ce qui complique l'interprétation de ces données.

Un traitement thermique au dessus de la température de la transition vitreuse  $T_g$  permettrait de libérer les déformations bloquées. Cependant, le refroidissement à une température en dessous de  $T_g$  peut déclencher le phénomène du vieillissement physique qui a déjà été observé dans le bois. Nakano [2] a décrit une perturbation transitoire des propriétés viscoélastique due au trempage (refroidissement rapide). Ishimaru [3] a étudié l'influence de la vitesse de refroidissement mais n'a pas décrit en détail le processus de vieillissement.

Dans cette étude, on propose d'étudier l'effet du temps de vieillissement (temps écoulé depuis le trempage après avoir chauffé au dessus de  $T_g$ ) sur les propriétés viscoélastiques du bois vert dans la direction

longitudinale en adoptant la procédure proposée par Struik.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1 Matériel

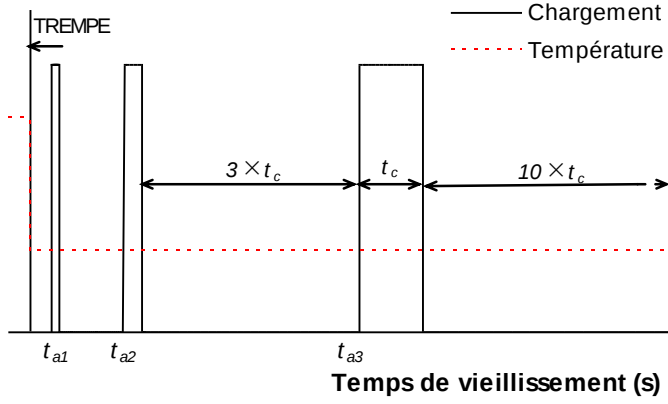
Le matériel végétal de trois essences tropicales a été utilisé pour l'étude (*Oxandra asbeckii* (Pulle) R.E. Fries, *Licania alba* (Bernoulli) Cuatrec. et *Virola michelii* Heckel). L'échantillon présentait des densités et structures anatomiques contrastées, comprenant également le « bois de tension » caractérisé par un niveau de précontraintes particulièrement élevé. L'axe longitudinal des éprouvettes de fluage a été orienté suivant les fibres ( $L=150 \times T=15 \times R=2 \text{ mm}^3$ ). Le nom des éprouvettes comprend les initiales de l'essence et le numéro de l'éprouvette.

Les tests de fluage ont été menés dans un bain thermo régulé, imposant une déformation initiale de 0.5%. L'évolution de la déformation a été mesurée par les jauges de déformation 3 fils protégées par du silicone. L'utilisation de deux jauges collées de chaque côté de l'éprouvette s'est avérée nécessaire pour prendre en compte une légère déflexion de la courbure initiale de l'éprouvette due vraisemblablement à une libération hétérogène des précontraintes.

### 2.2 Procédure expérimentale

Suite à une période de chauffage à 80°C durant 30 minutes, l'échantillon a été déplacé dans le bain thermo régulé de la machine de fluage contrôlé à 30°C et soumis

à une série de tests de fluage à différent temps écoulés après la trempe suivant la procédure utilisé préalablement par Struik sur le polymères synthétiques [4]. Cette procédure impose des durées de test de fluage  $t_c$  petites devant le temps de vieillissement  $t_a$  ( $t_c < 0.3 \times t_a$ ) ce qui permet de négliger le vieillissement physique du matériau au cours de l'essai (voir Fig. 1).



**Figure 1 :** Procédure expérimentale permettant d'étudier l'effet du temps de vieillissement sur les propriétés de fluage.

Pour éliminer l'effet des chargements antérieurs, le signal de déformation a été enregistré aussi pendant les périodes de recouvrement. La période de recouvrement devait alors être suffisamment longue ( $10 \times t_c$ ) pour permettre une extrapolation fiable du signal à la durée du test de fluage suivant (en échelle log).

### 2.3 Identification du modèle rhéologique

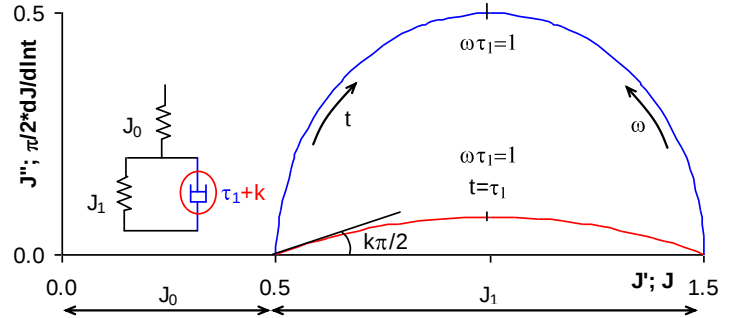
Pour identifier le modèle rhéologique correspondant, nous avons utilisé la représentation des données expérimentales dans un plan complexe. Pour un élément de Zener, la trajectoire décrite dans le plan complexe correspond à un demi-cercle. Si toutefois la réponse en fluage de l'amortisseur est proportionnelle à  $t^k$  avec  $k < 1$ , on parle de modèles paraboliques, représentés dans le plan complexe sous forme d'arcs de cercle (Figure 2). Ces modèles sont caractérisés par des spectres viscoélastiques d'autant plus larges que  $k$  est petit.

Pour représenter les résultats des essais quasistatiques dans le plan complexe approché (PCA), on a utilisé l'approximation d'Alfrey [5]:

$$J' \approx J(t_c) \quad (1)$$

$$J'' \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{dJ(t_c)}{d \ln t_c} \quad (2)$$

où  $J'$  est la partie réelle et  $J''$  la partie imaginaire de la complaisance complexe. Cette approximation est valable pour des spectres viscoélastiques étendus, soit ici pour des valeurs de  $k$  suffisamment petites devant 1 ce qui est en général le cas du bois ( $k = 0.1 \sim 0.5$ ) [6, 7].

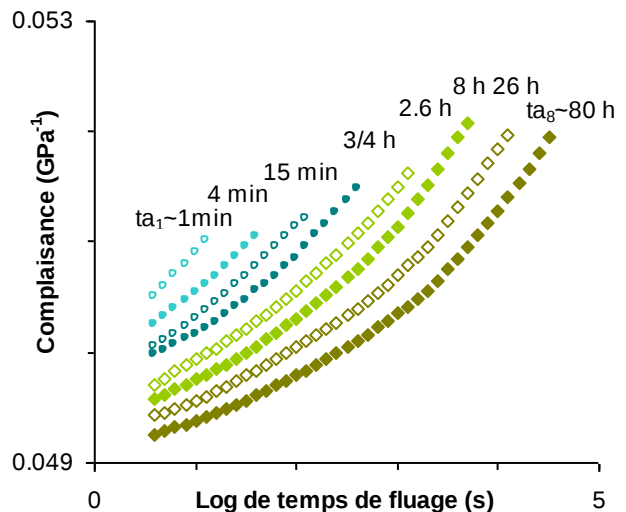


**Figure 2 :** Plan de la complaisance complexe pour le modèle de Zener ( $k=1$ ; en bleu) et son analogue comprenant l'élément parabolique pour  $k=0.2$  (en rouge).  $J'$  et  $J''$  représentent la partie réelle et imaginaire de la complaisance complexe ou leurs approximations;  $J_0$ : complaisance instantanée;  $J_1$ : complaisance différée;  $\omega$ : vitesse angulaire;  $\tau$ : temps caractéristique du mécanisme.

La représentation dans le plan complexe permet aussi de vérifier l'hypothèse d'équivalence temps-température (continuité entre les courbes correspondantes aux tests de fluage effectués à des temps de vieillissement différents).

### 3. Résultats

La Fig. 3 représente une série de courbes correspondant aux essais de fluage menés à des temps de vieillissement différents (temps écoulé depuis la trempe de 80 à 30°C).

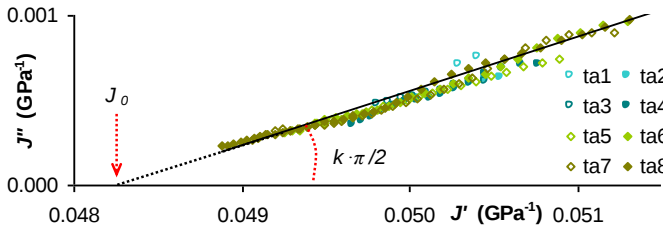


**Figure 3 :** Série de courbes de fluage correspondant aux tests effectués à des temps de vieillissement  $t_a$  différents (éprouvette Oa<sub>1</sub>).

Mis à part le premier essai, le décalage vertical entre les courbes successives reste quasiment constant ce qui supporte l'hypothèse d'un taux de vieillissement uniforme et indique que la perturbation de la structure moléculaire due au trempage persiste au bout de 3 jours. Une première tentative de construction d'une courbe maîtresse par décalage suivant l'axe temporel a donné un résultat satisfaisant mais pour une analyse approfondie et l'identification de la forme mathématique du modèle, on a utilisé la représentation des résultats expérimentaux dans le PCA.

### 3.1 Identification du modèle rhéologique

Comme on peut observer sur la figure 4, dans le PCA les courbes de fluage mesurées à des temps de vieillissement différent se superposent. Ceci indique qu'une simple correspondance temps-temps de vieillissement peut être suffisante pour décrire le phénomène.



**Figure 4:** PCA des courbes de fluage pour l'éprouvette Oa<sub>1</sub>.

Les courbes apparaissent sous forme des segments de droite, aucune phase de stabilisation n'est visible. D'après Huet [8], un tel comportement peut être modélisé comme un assemblage en série d'un ressort et d'un élément parabolique ; une analogie du modèle de Maxwell. Le comportement de ce modèle peut être décrit par une loi puissance :

$$J(t_c) = J_0 \left[ 1 + \left( \frac{t_c}{\tau} \right)^k \right] \quad (3)$$

où  $J(t_c)$  est la complaisance de fluage,  $J_0$  la complaisance initiale,  $\tau$  le temps de doublement (il n'existe pas de temps caractéristique pour ce type de modèle) et  $k$  le paramètre puissance. Les valeurs de  $J_0$  et  $k$  peuvent être directement déduites du graphique.

Supposons que le temps de vieillissement influence seulement le temps de doublement. On peut alors écrire :

$$J(t_c; t_a) = J_0 \left[ 1 + \left( \frac{t_c}{\tau(t_a)} \right)^k \right] \quad (4)$$

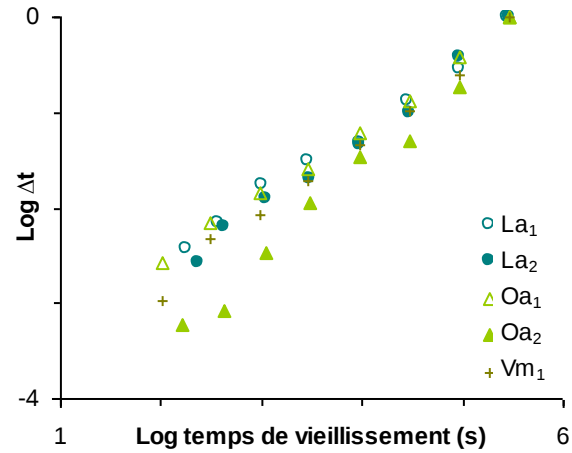
Dans cette équation la relation  $\tau(t_a)$  n'est pas imposée. Sous l'hypothèse d'un taux de vieillissement uniforme, on peut écrire :

$$\log \tau(t_a) = \log \tau_0 - \mu \left[ \log(t_a) - \log(t_{a0}) \right] \quad (5)$$

où  $t_{a0}$  est le temps de vieillissement de référence et  $\tau_0$  le temps de doublement à  $t_{a0}$ . La combinaison des équations 4 et 5 nous permet de prédire les données expérimentales à l'aide de 4 paramètres :  $J_0, k, \mu, \tau_0$ .

### 3.2 Vérification de l'hypothèse du taux de vieillissement uniforme

Dans un premier temps, une optimisation des  $\tau_i$  a été effectuée prenant en compte l'équation 4. Ainsi, on a pu étudier la relation  $\tau(t_a)$ . Les résultats de cette optimisation pour l'ensemble des éprouvettes sont montrés sur la figure 5. On peut constater qu'une approximation linéaire est acceptable.

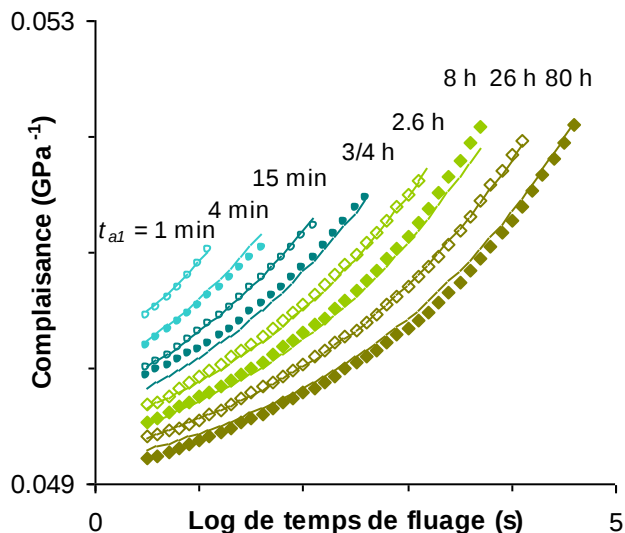


**Figure 5:** Variation des temps de doublement  $\tau$  en fonction du temps de vieillissement en double échelle logarithmique.

Sous l'hypothèse d'un taux de vieillissement uniforme, on procède à une optimisation des paramètres du modèle  $J_0, k, \mu, \tau_0$  résumés dans le tableau 1. Cette modélisation repose sur les équations 4 et 5 et donne une correspondance très satisfaisante entre les valeurs de complaisance mesurées et modélisées comme on peut voir sur la figure 6.

|                 | $\mu$ | $k$  | $J_0$ | $\log \tau_0$ |
|-----------------|-------|------|-------|---------------|
| La <sub>1</sub> | 0.72  | 0.18 | 0.041 | 11.4          |
| La <sub>2</sub> | 0.80  | 0.14 | 0.033 | 12.4          |
| Oa <sub>1</sub> | 0.75  | 0.19 | 0.048 | 10.7          |
| Oa <sub>2</sub> | 0.97  | 0.13 | 0.033 | 13.8          |
| Vm <sub>1</sub> | 0.80  | 0.14 | 0.086 | 9.3           |

**Tableau 1:** Tableau récapitulatif des paramètres du modèle parabolique pour l'ensemble des éprouvettes.



**Figure 6:** Correspondance obtenue entre les valeurs de complaisance mesurées et modélisées (éprouvette Oa<sub>1</sub>).

#### 4. Conclusion

L'application de la procédure de Struik qui permet d'étudier le phénomène du vieillissement physique a permis de confirmer sa présence dans le bois vert. Deux hypothèses fortes ont pu être vérifiées : l'équivalence temps-temps de vieillissement et l'uniformité du taux de vieillissement. Se basant sur la représentation des résultats expérimentaux dans le PCA, une loi puissance a été proposée pour modéliser le comportement viscoélastique et s'est révélé très satisfaisante pour l'ensemble des éprouvettes. Compte tenu de l'aptitude de la procédure proposée par Struik à décrire le phénomène, on peut supposer que le niveau pertinent pour chercher ses sources se situe au niveau moléculaire.

1. Archer, R.R., *Growth stresses and strains in trees*. 1986, Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag. 240 p.
2. Nakano, T., *Effects of quenching on relaxation properties of wet wood*. Journal of wood science, 2005. **51**(2): p. 112-117.
3. Ishimaru, Y. *Mechanical properties of wood in unstable states caused by changes in temperature and/or swelling*. in *Proceedings of the Second international conference of the European society for wood mechanics*. Stockholm, Sweden. May 25th - 28th 2003. 2003.
4. Struik, L.C.E., *Physical aging in amorphous glassy polymers*. Annals of the New York Academy of Sciences, 1976. **279**: p. 78-85.
5. Alfrey, T., *Mechanical behaviour of high polymers*. 1948, New York: Interscience publisher.

6. Huet, C. and P. Navi. *Multiparabolic multitransition model for thermo-viscoelastic behavior of wood*. in *Mechanics of wood and paper materials. The winter annual meeting of the ASME - Dallas, Texas, nov. 25-30, 1990*. 1990.
7. Bardet, S. and J. Gril, *Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements*. Comptes rendus mécanique, 2002. **330**(8): p. 549-556.
8. Huet, C., *Représentation des modules et complaisances complexes dans les plans complexes arithmétique et logarithmique*. Cahiers du Groupe Français de Rhéologie, 1967. **5**(1): p. 237-258.