

Simulation numérique du comportement thermo-hydro-mécanique des assemblages bois réalisés avec des organes métalliques

L. BLERON, M. KHELIFA, N. VILA LOPERENA

Université de Lorraine, LERMAB, Ecole Nationale Supérieure des Technologie et Industries du Bois
ENSTIB, 27 rue du Philippe Séguin, 88 000 Epinal, France

Résumé

Le matériau bois est constitué de polymères sensibles à la température et à l'humidité. L'étude de son comportement thermo-hydro-mécanique est donc indispensable au développement de son usage dans le domaine de la construction. Dans cette étude, le comportement thermo-hydro-mécanique du matériau bois est analysé dans le cadre de la théorie de la mécanique non-linéaire des milieux continus. Une modélisation théorique basée sur la thermodynamique des processus irréversibles est utilisée pour traduire le couplage du comportement mécanique orthotrope avec l'effet de l'humidité sous l'action de hautes températures. L'intégration locale des équations constitutives est réalisée par un schéma implicite itératif utilisant des corrections plastiques. La validation de la procédure de calcul implémentée dans le code ABAQUS/Explicit est réalisée sur la simulation des assemblages bois connectés avec des organes métalliques.

Abstract

Timber is composed of polymers which are sensitive to temperature and moisture. Therefore to study its thermo-hydro-mechanical behaviour is indispensable to develop its usage on construction field. On this study, the thermo-hydro-mechanical wood behaviour is analyzed within the framework of non-linear mechanical theory Mechanical Continuous Media. A theoretical modelling based on thermodynamic of irreversible processes is used to translate the coupling of the orthotropic mechanical behaviour with moisture effect under high temperatures action. The local integration of constitutive laws is carried out with an iterative implicit outline using plastic corrections and the calculus procedure is implemented on ABAQUS/Explicit code. The model validation is done with the simulation of steel-to-timber connections.

Mots clefs: comportement thermo-hydro-mécanique du bois, élasticité, plasticité, orthotropie, assemblage bois-métal, grandes déformations, contact/frottement, MEF

Introduction

De nombreux pays ont imposé une vérification au feu de la résistance des structures en bois. En général, les normes réglementaires de la construction établissent les conditions que doivent satisfaire les éléments structuraux des bâtiments pour, en cas d'incendie, éviter l'effondrement de la structure pendant une période de temps donnée. L'incendie dans le cas des structures bois est souvent lié au phénomène de la combustion du matériau bois, d'où la nécessité d'étudier le comportement hydromécanique du matériau bois sous de hautes températures.

Pour qu'une structure bois garde sa stabilité, le comportement de ses assemblages doit être maîtrisé, car la distribution des efforts entre les éléments structuraux et la déformation globale de la structure sont influencées par le manque de rigidité au niveau des assemblages. C'est pour cette raison que plusieurs travaux ont été réalisés dans le domaine des assemblages, essayant de comprendre leur comportement et identifiant les facteurs qui influent le plus sur leur comportement ([1-5]). Notre travail est justement dédié à cet aspect : il s'agit de simuler virtuellement le comportement hydromécanique d'un assemblage bois avec organes métalliques sous hautes températures.

Les nouvelles contributions apportées dans ce papier par rapport à nos travaux déjà publiés dans [6-8] se résument à :

- le couplage du modèle macroscopique phénoménologique qui permet de décrire avec succès le comportement élastoplastique des assemblages bois tenant compte de l'orthotropie élastique et de l'écoulement plastique anisotrope du matériau bois avec effets de l'humidité sous hautes températures ;
- la généralisation des équations de Guitard [9] dans le domaine plastique en corrigeant la forme de la limite d'élasticité.

Le travail est structuré en trois parties. Dans la première partie, les principaux phénomènes physiques qui gouvernent un comportement élasto-plastique du matériau bois avec effet de l'humidité sous de hautes températures sont présentés. Dans la seconde partie, l'intégration numérique des équations constitutives du modèle est proposée. Enfin, la dernière partie compare des données expérimentales avec les résultats des simulations afin de valider le modèle proposé.

1 Modélisation thermo-hydro-mécanique du matériau bois

Des progrès considérables ont été réalisés dans la modélisation théorique des phénomènes thermomécaniques qui régissent le matériau. La plupart de ces modèles sont développés dans le cadre de la mécanique des milieux continus. L'approche thermodynamique des processus irréversibles a permis la construction des modèles vérifiant l'inégalité de Clausius-Duhem qui n'est rien d'autre que la combinaison du premier et de deuxième principe de la thermodynamique [6-8].

1.1 Comportement hydro-mécanique du matériau bois

La loi d'élasticité s'exprime par :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\hat{\Lambda}}} : \underline{\underline{\varepsilon}}^e = \underline{\underline{\hat{\Lambda}}} : (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}^p - \underline{\underline{\varepsilon}}^{th}) \quad (1)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$ étant le tenseur de Cauchy, $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$ étant le tenseur de déformations élastiques, $\underline{\underline{\varepsilon}}$ étant le tenseur de déformations totales, $\underline{\underline{\varepsilon}}^p$ étant le tenseur de déformations plastiques, $\underline{\underline{\varepsilon}}^{th}$ étant le tenseur des déformations thermiques, $\underline{\underline{\hat{\Lambda}}}$ étant l'opérateur des propriétés élastiques intégrant les modules de Young E_1^m , E_2^m , E_3^m , des modules de Coulomb G_{12}^m , G_{23}^m , G_{13}^m et les coefficients de Poisson ν_{12} , ν_{23} , ν_{13} suivant les directions (1), (2) et (3) présentées dans la figure 1. L'opérateur $\underline{\underline{\hat{\Lambda}}}$ est donné par :

$$\underline{\underline{\hat{\Lambda}}} = \underline{\underline{C}}^{-1} \quad (2)$$

Avec :

$$\begin{aligned} C_{1111} &= 1/E_1^m ; & C_{2222} &= 1/E_2^m ; & C_{3333} &= 1/E_3^m ; \\ C_{1212} &= 1/G_{12}^m ; & C_{2323} &= 1/G_{23}^m ; & C_{1313} &= 1/G_{13}^m ; \\ C_{1122} &= -\nu_{12}/E_2^m ; & C_{2233} &= -\nu_{23}/E_3^m ; & C_{1133} &= -\nu_{13}/E_3^m \end{aligned} \quad (3)$$

Guitard dans [9] a adopté les corrections suivantes :

$$\begin{aligned} E_1^m &= E_1 [1 - 0,015(h - 12)] ; & E_2^m &= E_2 [1 - 0,03(h - 12)] ; & E_3^m &= E_3 \times [1 - 0,03(h - 12)] ; \\ G_{12}^m &= G_{12} \times [1 - 0,03(h - 12)] ; & G_{23}^m &= G_{23} \times [1 - 0,03(h - 12)] ; & G_{13}^m &= G_{13} \times [1 - 0,03(h - 12)] \end{aligned} \quad (4)$$

h étant le taux d'humidité relative du bois.

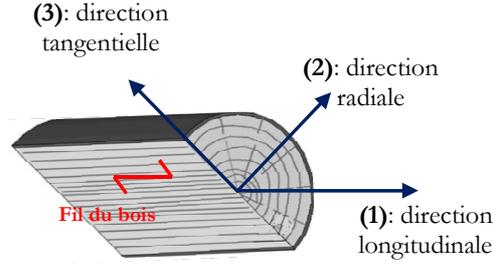


FIG. 1 – Coordonnées locales du matériau bois

Le critère de plasticité est celui défini par Hill [10] :

$$f_p = \sqrt{\underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{H}} : \underline{\underline{\sigma}}} - Q \times r - \sigma_{\text{yield}} [1 - \alpha_h (h - 12)] = 0 \quad (5)$$

σ_{yield} étant la limite élastique du matériau, α_m étant un paramètre de l'humidité, h étant le taux d'humidité relative du bois, r étant un paramètre d'érouissage isotrope, Q étant le module d'érouissage isotrope et $\underline{\underline{H}}$ étant l'opérateur d'anisotropie de Hill défini par les six constantes F , G , H , L , M et N .

$$\begin{aligned} H_{1111} &= G + H; & H_{2222} &= F + H; & H_{3333} &= G + F; \\ H_{1212} &= 2N; & H_{2323} &= 2M; & H_{1313} &= 2L; \\ H_{1122} &= -H; & H_{2233} &= -F; & H_{1133} &= -G \end{aligned} \quad (6)$$

Le pseudo-potentiel plastique choisi :

$$F_p = f_p + \frac{Q}{2b} \times R^2 = \sqrt{\underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{H}} : \underline{\underline{\sigma}}} - Q \times r - \sigma_{\text{yield}} [1 - \alpha_h (h - 12)] + \frac{Q}{2b} \times R^2 \quad (7)$$

$$\text{Avec: } R = Q \times r \quad (8)$$

R représente la contrainte due à l'érouissage isotrope et b est un coefficient d'érouissage isotrope.

Les relations complémentaires sont définies comme :

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\lambda} \frac{\partial f_p}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\lambda} \frac{\underline{\underline{H}} : \underline{\underline{\sigma}}}{\|\underline{\underline{\sigma}}\|} = \dot{\lambda} \underline{\underline{n}} \quad (9)$$

$$\dot{r} = -\dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial R} = -\dot{\lambda} [1 - br] \quad (10)$$

$\underline{\underline{n}}$ étant la normale à la surface de charge, $\dot{\lambda}$ étant le multiplicateur plastique défini par la condition de consistance.

1.2 Comportement thermique

La résolution d'un problème thermique consiste à chercher un champ de températures $T(x,y,z;t)$ tel que :

$$\rho \times C_p \dot{T} - \lambda_{\text{cond}} \times \text{div}(\bar{\text{grad}}(T)) - q = 0 \quad \text{en tout point du solide} \quad (11)$$

Associé aux conditions aux limites illustrées par la figure 2 :

$$\begin{cases} T = T_0 \text{ sur } (S_0) \\ \lambda_{\text{cond}} \times \underline{\underline{n}}_T \times \bar{\text{grad}}(T) = q_0 + h_{\text{conv}} \times (T - T_0) + \sigma_{\text{Boltz}} \times \varepsilon_{\text{emis}} \times (T^4 - T_0^4) \text{ sur } (S_q) \\ (S) = (S_0) \cup (S_q) \end{cases} \quad (12)$$

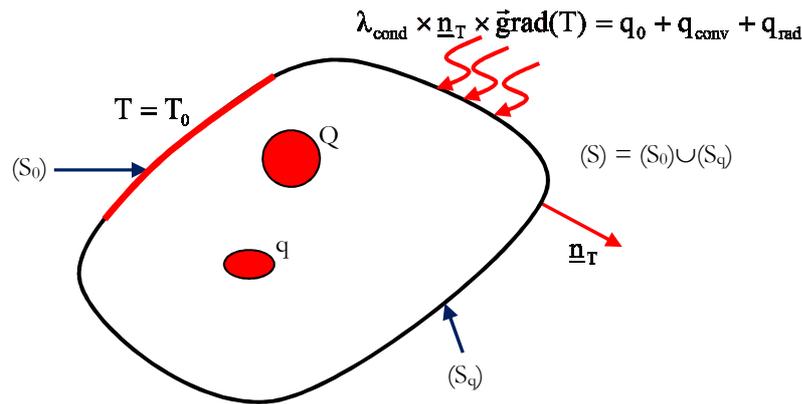


FIG. 2 – Chargement thermique et conditions aux limites

(S) étant la surface du solide ; (S₀) étant la surface exposée aux températures initiales ; (S_q) étant la surface exposée aux flux de chaleur ; \underline{n}_T étant la normale à la surface du solide (S) ; Q étant une source de chaleur ponctuelle définie par la puissance thermique reçue par le système ; q étant une source de chaleur volumique définie par la puissance thermique générée par unité de volume.

A l'instant initial $t = t_0$;

$$T(x, y, z; t_0) = T_0(x, y, z) \quad (13)$$

Le résidu R(T) de l'équation (11) est défini par :

$$R(T) = \rho \times C_p \dot{T} - \lambda_{\text{cond}} \times \text{div}(\vec{\text{grad}}(T)) - q \quad (14)$$

Le résidu R(T) est nul si T est solution de l'équation (11).

2 Résultats et discussions

Dans cette section, nous mettons en application la routine de calcul (Vumat), implémentée dans le code ABAQUS/Explicit, pour simuler des assemblages de type bois/métal avec des organes métalliques. L'objectif essentiel est de montrer les aptitudes de cette approche couplée "thermo-hydro-mécanique" à prédire la résistance au feu des assemblages bois. La validation se fait sur la simulation d'un essai d'assemblage à plusieurs organes.

Les résultats des tests sont tirés de [11]. La géométrie des éprouvettes et les conditions aux limites sont données sur la figure 3. Les organes d'assemblage (boulons et broches) sont de diamètre 16mm, espacés de 112mm suivant la direction longitudinale du bois et de 64mm suivant la direction perpendiculaire au sens des fibres du bois. L'épaisseur de la plaque est de 8mm.

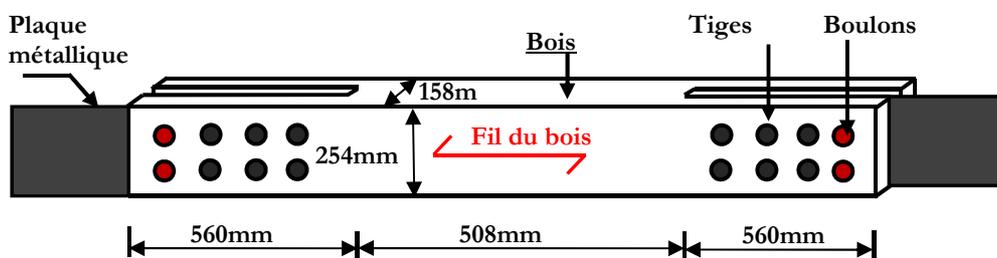


FIG. 3 – Assemblage à plusieurs organes

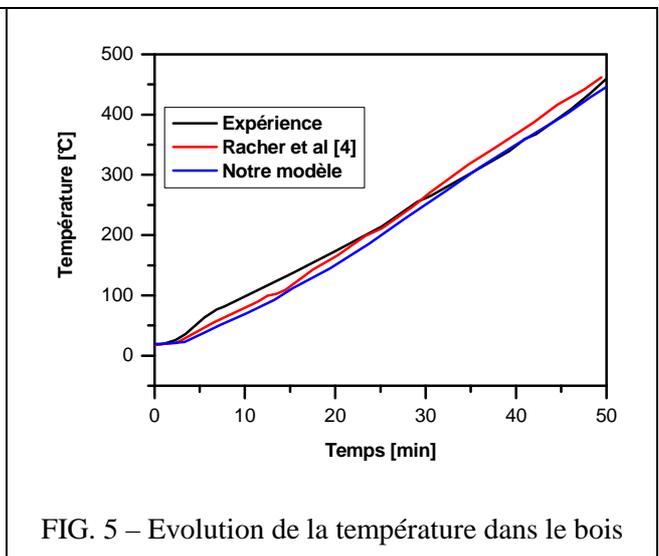
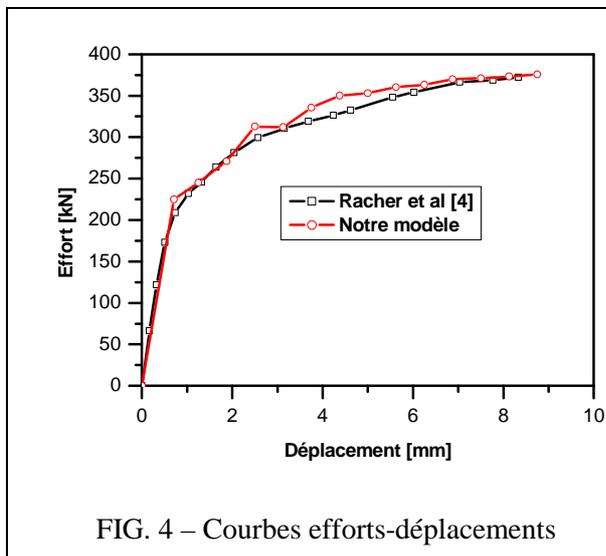
Pour la simulation, un quart de l'assemblage est simulé. Le modèle éléments finis utilise un maillage de 54776 éléments de type C3D8RT. Le coefficient de frottement entre l'ensemble des composants (éprouvette en bois, plaque et organes) est $\mu=0,21$.

Les paramètres du modèle conduisant aux résultats des simulations sont :

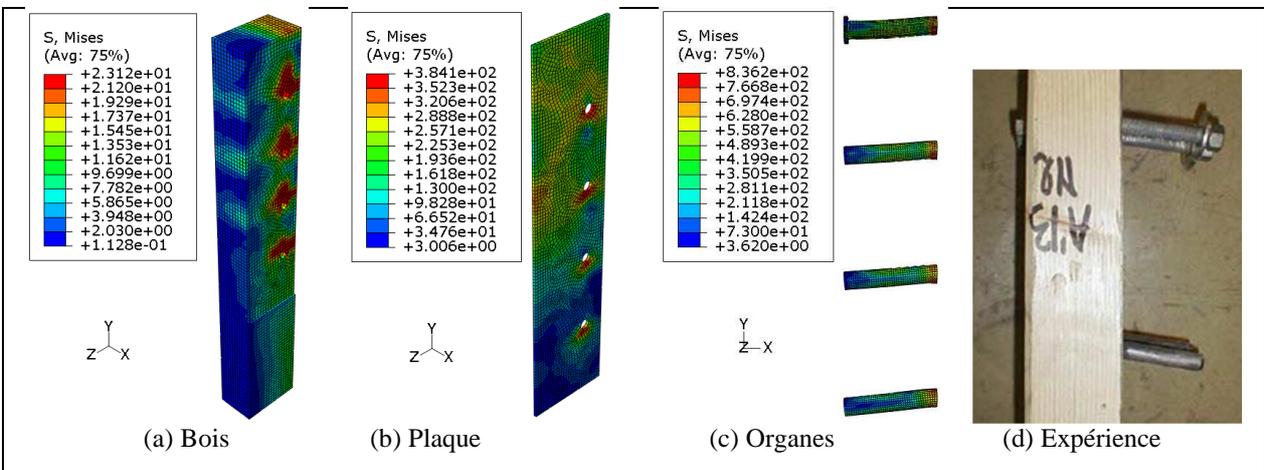
Bois : $E_1 = 10000\text{MPa}$; $E_2 = E_3 = 340\text{MPa}$; $G_{12} = G_{13} = 625\text{MPa}$; $G_{23} = 295\text{MPa}$; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,4$; $\nu_{23} = 0,02$; $\sigma_{\text{yield}} = 21,8\text{MPa}$; $Q = 2,1\text{MPa}$; $b = 1,7$; $F = G = H = 0,5$; $L = M = N = 1,5$; $T_0 = 21^\circ\text{C}$; $\rho = 460\text{ kg/m}^3$; $C_p = 1900\text{ J/Kg.K}$; $\lambda_{\text{cond}} = 0,12\text{ W/m.K}$; $\alpha_{\text{th}} = 4,5 \cdot 10^{-8}\text{ K}^{-1}$
 Acier : $E = 210000\text{MPa}$; $\nu = 0,3$; $\sigma_{\text{yield}} = 350\text{MPa}$ (plaque) ; $\sigma_{\text{yield}} = 420\text{MPa}$ (tiges et boulons)

Les résultats des simulations sont comparés à ceux de l'expérience (Fig. 4). Le comportement est linéaire jusqu'à un déplacement vertical $v=0,73\text{mm}$ ($F=223,8\text{kN}$). Au-delà de cette limite, le comportement devient non-linéaire. L'effort maximal estimé par la simulation est $F=377\text{kN}$ ($v=8,8\text{mm}$). Les résultats des simulations en (2D) obtenus par Rachet and al dans [4, 11] sont presque identiques à ceux obtenus par notre procédure de calcul en (3D).

La Fig. 5 donne l'évolution de la température à la surface exposée à la source de chaleur. On voit clairement que la température varie linéairement par rapport au temps et les résultats des simulations sont proches de l'expérience.



Les figures 6 représentent la distribution de la contrainte équivalente dans le bois, dans la plaque et dans les organes métalliques à l'instant final ($v=8,8\text{mm}$). On peut constater que les organes ($\sigma=863\text{MPa}$) sont beaucoup plus sollicités que la plaque métallique ($\sigma=384\text{MPa}$) et que le bois possède une contrainte équivalente ($\sigma=24,74\text{MPa}$), ce qui est conforme aux observations expérimentales.



Conclusion et perspectives

L'objectif principal de cette étude consiste en la mise au point d'une méthodologie numérique de prévision de la capacité portante des assemblages bois réalisés par des organes métalliques sous de hautes températures. Une approche locale basée sur le couplage entre le comportement hydro-thermo-mécanique a été proposée. Les aspects théoriques et numériques de la modélisation sont traités en détail, en utilisant l'intégration numérique des équations constitutives du modèle par des méthodes implicites.

L'application de la procédure de calcul a été faite sur la simulation d'un assemblage à plusieurs organes métalliques. Les résultats des simulations approchent avec succès la capacité portante de l'assemblage, la distribution du champ de température dans le matériau bois ainsi que les modes de ruptures des organes d'assemblage.

A l'issue de cette étude, on peut affirmer qu'une approche incrémentale a été mise au point pour prédire la capacité portante d'un assemblage quelconque en bois réalisé par des organes métalliques sous de hautes températures. Certains points sont perfectibles pour enrichir la méthodologie incrémentale :

- appliquer la procédure de calcul à l'analyse des différents modes de ruptures des assemblages bois-métal ;
- utiliser des modèles micro-macro seuls capables de traduire naturellement les évolutions microstructurales des matériaux subissant de larges déformations plastiques. Ces aspects sont actuellement en cours de développement au LERMAB.

Références bibliographiques

- [1] Xu B.H., Bouchaïr A., Taazount M., Vega E.J., Numerical and experimental analyses of multiple-dowel steel-to-timber joints in tension perpendicular to grain, *Engineering Structures* 31 (2009) 2357-2367
- [2] Cristovao L. Santos, Abilio M.P. De Jesus, José J.L. Morais, José L.P.C. Lousada, Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 171-182
- [3] Eckart Resch, Michael Kaliske, Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering, *Computers and Structures* 88 (2010) 165-177
- [4] Racher P., Laplanche K., Dhima D., Bouchaïr A., Thermo-mechanical analysis of the fire performance of dowelled timber connection, *Engineering Structures* 32 (2010) 1148-1157
- [5] Audebert M., Dhima D., Taazount M., Bouchaïr A., Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire, *Engineering Structures* 33 (2011) 3257-3268
- [6] Oudjene M., Khelifa M., Segovia C. and Pizzi A., "Application of Numerical Modelling to Dowel-Welded Wood Joints", *Journal of Adhesion Science and Technology* 24, 359-370, 2010.
- [7] Oudjene M. and Khelifa M., "Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction". *Materials & Design*, Volume 30, Issue 10, Pages 4081-4087, 2009.
- [8] Oudjene M. and Khelifa M., "Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings", *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 11, Pages 3359-3366, 2009.
- [9] Guitard D., "Mécanique du matériau bois et composites", CEPADUES 274, Editions, 1987.
- [10] Hill, R., A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Royal Soc, London Proc.* p.281, 1948
- [11] Laplanche K., Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois : approche expérimentale et modélisation, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, 2006.