

Analyse par éléments finis de la pyrolyse du bois exposé au feu

V. D. Thi, D. L. Nguyen, M. Khelifa, M. Oudjene, Y. Rogaume

Université de Lorraine, LERMAB, EA 4370, 27 rue Philippe Séguin, 88026 Epinal, France,
{mourad.khelifa, marc.oudjene, yann.rogaume}@univ-lorraine.fr

Résumé — Ce travail porte sur le développement d'un modèle de comportement pour l'analyse de la pyrolyse du bois en situation d'incendie. Le modèle présenté est inspiré d'un modèle analytique unidirectionnel initialement présenté par Shen et al. [9] pour la pyrolyse du bois. Dans ce papier, le modèle est reformulé en utilisant l'approche éléments finis en 2D et implémenté dans le logiciel Matlab. La validation du modèle est effectuée sur la base d'un test expérimental issu de la littérature [7] et les résultats numériques en termes de la distribution de la température, la formation du charbon ainsi que la dégradation du module d'élasticité par le feu ont été comparés aux prédictions réglementaires selon l'Eurocode 5.

Mots clés — bois, pyrolyse, sécurité incendie, thermique, modélisation, éléments finis.

1 Introduction

La sécurité incendie des constructions est soumise à une évolution technique constante. En construction bois, les essences résineuses (épicéa, sapin..etc) sont les plus utilisées de nos jours. L'approche réglementaire, selon l'Eurocode 5, pour la vérification de la résistance au feu est basée sur des validations expérimentales réalisées sur ces mêmes essences. Contrairement à l'approche classique, selon Eurocode 5, qui considère implicitement la pyrolyse du bois par la modification progressive des propriétés thermo-physiques en fonction de la température, ce modèle tient compte explicitement des différentes sources d'énergie dues aux différentes réactions de la pyrolyse. Ainsi, la modélisation de la pyrolyse du bois exposé au feu est un sujet d'actualité en plein développement.

Bien que le bois soit un matériau combustible, les structures en bois résistent remarquablement au feu. En effet, le comportement du bois est particulièrement favorable lorsque les sections sont suffisamment dimensionnées pour permettre la formation d'une couche de bois carbonisé (charbon) qui assure la protection de la section centrale (bois sain) par ses propriétés isolantes. La combustion du bois est un phénomène complexe qui se déroule en trois étapes principales :

- le chauffage et la hausse progressive de température du bois qui s'accompagne du séchage : dans cette phase, la teneur hygroscopique joue un rôle important de temporisateur et le bois ne s'enflamme que quand son taux hygroscopique est à 0% et la température du bois stagne à 100°C tant que toute l'eau liée n'est pas évaporée ;
- puis la pyrolyse qui produit du charbon et dégage des gaz combustibles qui brûlent autour du bois : cette phase se distingue par l'inflammation du bois qui se produit en général à plus de 300°C ;
- enfin, la combustion lente du charbon.

L'aptitude du bois à résister à la propagation du feu est liée principalement à la couche de charbon qui limite le flux de chaleur entrant. D'un point de vue structural, le charbon n'a aucune résistance mécanique, ce qui fait que la perte de capacité résistante d'un élément en bois enflammé est essentiellement expliquée par une perte de section de bois. Par ailleurs, pour que la combustion du bois puisse progresser il faut qu'elle soit alimentée en oxygène, ce qui explique son développement en surface seulement. En effet, la conductivité thermique du bois, en particulier dans la direction transversale, est très faible étant donné sa porosité. L'inflammabilité et la résistance au feu (vitesse de combustion) des structures en bois dépendent de l'essence, la densité, le ratio surface exposée/volume, le type technologique du matériau

(bois massif, bois contrecollé...) et l'état hygroscopique du bois.

Pour toute section de bois enflammée, on distingue généralement trois couches successives (figure 1) :

- la couche de charbon, enflammée ;
- la couche de pyrolyse, avec des températures élevées impliquant des modifications chimiques mais sans flamme ;
- la couche de bois sain (non atteinte par le feu).

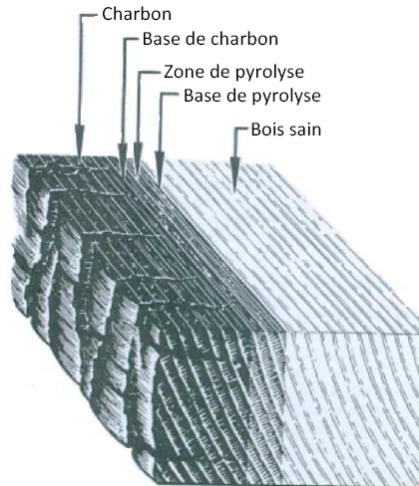


FIGURE 1 – Les différentes couches de bois dégradé par le feu (en situation d'incendie)

L'approche réglementaire selon l'Eurocode 5 pour la vérification d'une structure en bois sous l'action du feu est basée sur la résistance de la section résiduelle de bois après une durée d'action du feu, fonction de la classe de résistance souhaitée. La section résiduelle est obtenue en réduisant la section initiale de bois de la couche consommée et de la couche carbonisée (figure 1) sur chaque face exposée au feu. Dans cette approche, la dégradation des propriétés mécaniques du bois en fonction de l'élévation de température est directement prise en compte en majorant l'épaisseur de la couche consommée. Cependant, l'approche réglementaire se heurte à la complexité du phénomène de combustion du bois, en particulier les bois feuillus (forte densité) et ne reflète pas le comportement hygrothermique réel car la majorité des hypothèses et données utilisées ont été validées sur la base de tests expérimentaux réalisés sur les bois résineux, majoritairement utilisés en construction bois.

Dans cet objectif, un modèle numérique par éléments finis en 2D a été développé sur la base d'un modèle analytique 1D décrivant la pyrolyse du bois en tenant compte des trois principales phases de combustion : formation du charbon, des gaz et de la vapeur d'eau due au séchage du bois. Après présentation des équations du modèle ainsi que des aspects numériques, on présentera la validation du modèle par comparaison aux résultats de tests expérimentaux issus de la littérature. L'objectif ultime est l'implémentation, dans ABAQUS, d'un modèle de comportement hygro-thermo-mécanique permettant une meilleure prévision de la sécurité incendie des structures en bois soumises à une situation de risque au feu.

2 Modélisation éléments finis

2.1 Modèle mathématique de la pyrolyse du bois

Selon la loi de Fourier, le bilan énergétique dans un corps homogène soumis à une source de chaleur Q_r'' peut être exprimé, en 1D, comme suit :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + Q_r'' \quad (1)$$

Où : $T(^{\circ}\text{C})$ étant la température, λ (W/(m.K)), ρ (kg/m³) et C_p (J/(kg.K)) sont respectivement le coefficient de conductivité thermique, la densité, la chaleur spécifique et t (s) représente le temps d'exposition à la source de chaleur.

En se basant sur le modèle analytique unidirectionnel (1D) de la pyrolyse du bois humide, proposé par Shen et al. [9], tenant compte de la formation du charbon, des gaz et de la vapeur d'eau, l'expression du bilan énergétique en 2D s'écrit comme suit [10] :

$$\frac{\partial T (\rho_b C_b + \rho_c C_c + \rho_l C_l)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q_r'' \quad (2)$$

Où la source de chaleur Q_r'' représente la superposition des trois sources d'énergie induites par les trois réactions de pyrolyse à la température T : bois \rightarrow charbon (k_1), bois \rightarrow gaz (k_2) et liquide (eau liée) \rightarrow vapeur (k_3).

$$Q_r'' = k_1 \rho_b [\Delta h_1^0 + (C_c - C_b) (T - T_0)] + k_2 \rho_b [\Delta h_2^0 + (C_g - C_b) (T - T_0)] + k_3 \rho_l [\Delta h_3^0 + (C_v - C_l) (T - T_0)] \quad (3)$$

Les constantes Δh_1^0 , Δh_2^0 et Δh_3^0 sont données dans la table 1. ρ_b, ρ_l sont les densités du bois et du liquide, respectivement. C_b, C_c, C_l, C_g, C_v sont les chaleurs spécifiques du bois, du charbon, du liquide, des gaz et des vapeurs, respectivement.

Les équations de conservation de masse pour le bois, le charbon, les gaz, le liquide et la vapeur sont données comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_b}{\partial t} = -(k_1 + k_2) \rho_b \\ \frac{\partial \rho_c}{\partial t} = k_1 \rho_b \\ \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = k_2 \rho_b \\ \frac{\partial \rho_l}{\partial t} = -k_3 \rho_l \\ \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = k_3 \rho_l \end{cases} \quad (4)$$

k_1, k_2, k_3 , sont les taux des réactions chimiques de la pyrolyse, ρ_c, ρ_g, ρ_v sont les densités du charbon, du gaz et la vapeur, respectivement.

Les taux des réactions chimiques, k_i , de la pyrolyse du bois humide sont régis par la loi d'Arrhenius au premier ordre comme suit :

$$k_i = A_i \exp \left(\frac{-E_i}{RT} \right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Où : A_i sont des constantes (voir Table 1), E_i sont les énergies d'activation et R la constante des gaz (=8.314 (J/mol.K)).

La conductivité thermique équivalente du solide ($\lambda = \lambda_x = \lambda_y$) est calculée tenant compte de l'effet de l'humidité (H) et de la couche de charbon (λ_c) formée, qui joue le rôle d'isolant, comme suit :

$$\lambda = \eta \lambda_c + (1 - \eta) \lambda_b \quad (6)$$

Avec : $\eta = \frac{\rho_c}{\rho_c + \rho_b}$, $\lambda_b = 0.166 + 0.369H$, $\lambda_c = 0.105$.

2.2 Conditions initiales et conditions aux limites

La résolution des équations différentielles du problème thermique nécessite des conditions initiales, en température, et des conditions aux limites. Ainsi, les conditions initiales de température sont données par :

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_0(x, y, t) \quad (7)$$

L'échange thermique du milieu environnement avec les surfaces d'exposition de l'échantillon s'effectue par convection et rayonnement et obéit à l'équation Eq.(8) :

$$-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial \underline{n}} = h_{conv}(T - T_\infty) + \sigma_{Boltz} \cdot \epsilon_{emis} (T^4 - T_\infty^4), \quad i = x, y \quad (8)$$

Où : \underline{n} est la normale à la surface exposée, h_{conv} (W/(m².K)) est le coefficient d'échange par convection et $\sigma_{Boltz} = 5.67.10^{-8}$ (W/(m².K⁴)) est la constante de Boltzmann et ϵ_{emis} est le coefficient d'émissivité.

2.3 Implémentation éléments finis

En utilisant l'approche éléments finis, l'interpolation nodale de la température sur un élément triangulaire à trois noeuds (T3) est obtenue par les fonctions de formes N_i comme suit [1] :

$$T(x, y, t) = \sum_{i=1}^3 N_i(x, y) T_i(t) \quad (9)$$

La méthode de Galerkin est utilisée pour la résolution de l'équation différentielle gouvernante (Eq.(2)). Les termes nonlinéaires de l'équation Eq.(2) sont linéarisés et calculés, à chaque pas de temps, de manière implicite. Ainsi l'équation Eq.(2) peut se mettre sous la forme :

$$[C_{ij}] \{ \dot{T}_j \} + [K_{ij}] \{ T_j \} = \{ F_i \} \quad (10)$$

En utilisant la discrétisation temporelle, l'équation Eq.(10) devient :

$$[C_{ij}] \left\{ \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} \right\} + [K_{ij}] \{ T_j^{n+1} \} = \{ F_i^{n+1} \} \quad (11)$$

Finalement, l'évaluation de la température à chaque instant t s'effectue en utilisant l'équation Eq.(12) suivante :

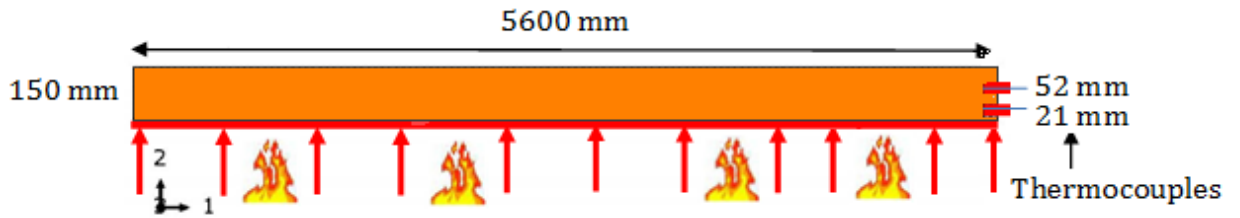
$$([C_{ij}] + \Delta t [K_{ij}]) \{ T_j^{n+1} \} = \Delta t \{ F_i \} + [C_{ij}] \{ T_j^n \} \quad (12)$$

3 Validation du modèle

Une poutre en bois lamellé-collé, de 600 mm x 150 mm de section et 5600 mm de long, reposant sur deux appuis simples est soumise au feu conformément à la norme ISO 834-1 [7] sur sa surface inférieure (figure 2). La poutre ne supporte aucun autre chargement mécanique, elle est soumise uniquement à son poids propre. La teneur en humidité initiale de la poutre est de 12%. La densité initiale $\rho_0 = 460$ kg/m³. Les autres propriétés physiques et thermiques utilisées dans les calculs sont données dans la Table 1.

En raison de la symétrie, seule la moitié de la section transversale, de la poutre décrite en figure 2, a été discrétisée à l'aide de 3600 éléments finis triangulaires, à interpolation linéaire en déplacements.

La figure 3 montre la distribution de la température ainsi que les différentes couches formées sur la section de bois enflammée, après environ 50 minutes d'exposition au feu. L'évolution de la température



(a)



(b)

FIGURE 2 – Illustration de la poutre soumise au feu étudiée : (a) Modèle éléments finis et (b) Test expérimental (Source : [7])

TABLE 1 – Propriétés physiques et thermiques utilisées pour l'analyse

	Réaction de Pyrolyse		Séchage		
	k_1 :bois \rightarrow charbon	k_2 :bois \rightarrow gaz	k_3 :eau \rightarrow vapeur		
A (1/s)	$1.38 \cdot 10^5$	$1.44 \cdot 10^4$	$5.13 \cdot 10^{10}$		
E(kJ/mol)	106.5	88.6	88		
Δh_i^0 (kJ/kg)	-420	-420	-2440		
Propriétés du bois					
λ (W/(m.K))	C_p (J/(kg.K))	ρ_i (kg/m ³)	ϵ_{emis}	T_0 (°C)	E (MPa)
Eq. (6)	$C_b = 1950$	Eq.(4)	0.78	20	12000
	$C_c = 1390$				
	$C_g = 2400$				
	$C_l = 4180$				
	$C_v = 1580$				

à l'emplacement des thermocouples en fonction du temps est illustrée sur la figure 4. On remarque que les prédictions de la simulation numérique sont assez satisfaisantes par comparaison aux résultats expérimentaux, et bien meilleures que les prédictions de l'Eurocode 5.

La figure 5 montre la formation du charbon (section résiduelle) en fonction du temps, en considérant la carbonisation du bois à la température de 300°C. Dans les cinq premières minutes d'exposition, environ, la section de bois ne diminue pas, cela correspond à la phase de chauffage et de séchage. Après inflammation et pendant toute la durée de pyrolyse la section de bois diminue linéairement selon l'Eurocode 5, étant donné que la vitesse de combustion est considérée constante. Tandis que le modèle élément fini prédit une évolution nonlinéaire de la section résiduelle, et plus importante sur environ 50 minutes d'exposition.

L'évolution du module d'élasticité en fonction de l'incrément de température ($T - T_0$) et de l'incrément d'humidité ($H - H_0$) est obtenue avec l'Eq.(13) [8].

$$E_i = E_{i,0} (1 + a_1 (\rho - \rho_0) + b_1 (T - T_0) + c_1 (H - H_0)) \quad (13)$$

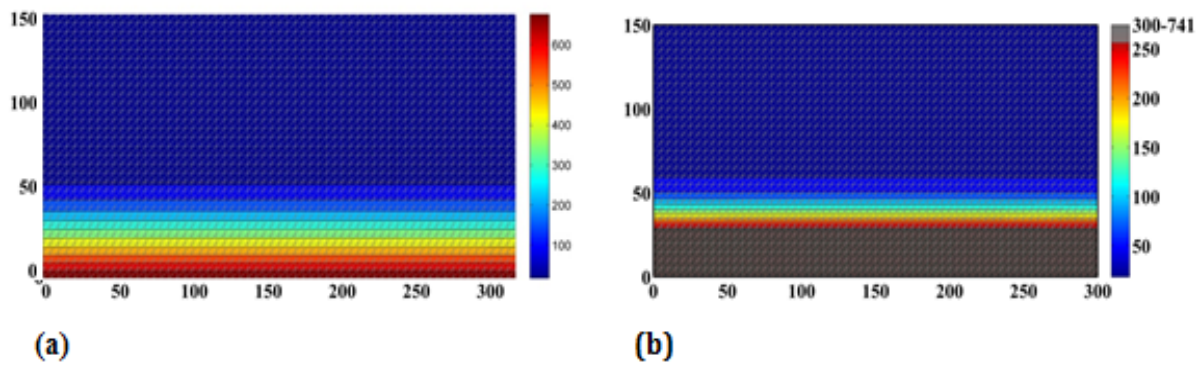


FIGURE 3 – (a) Distribution de la température dans la section transversale, (b) Formation des différentes couches (charbon, base de pyrolyse, bois en cours de séchage, bois sain)

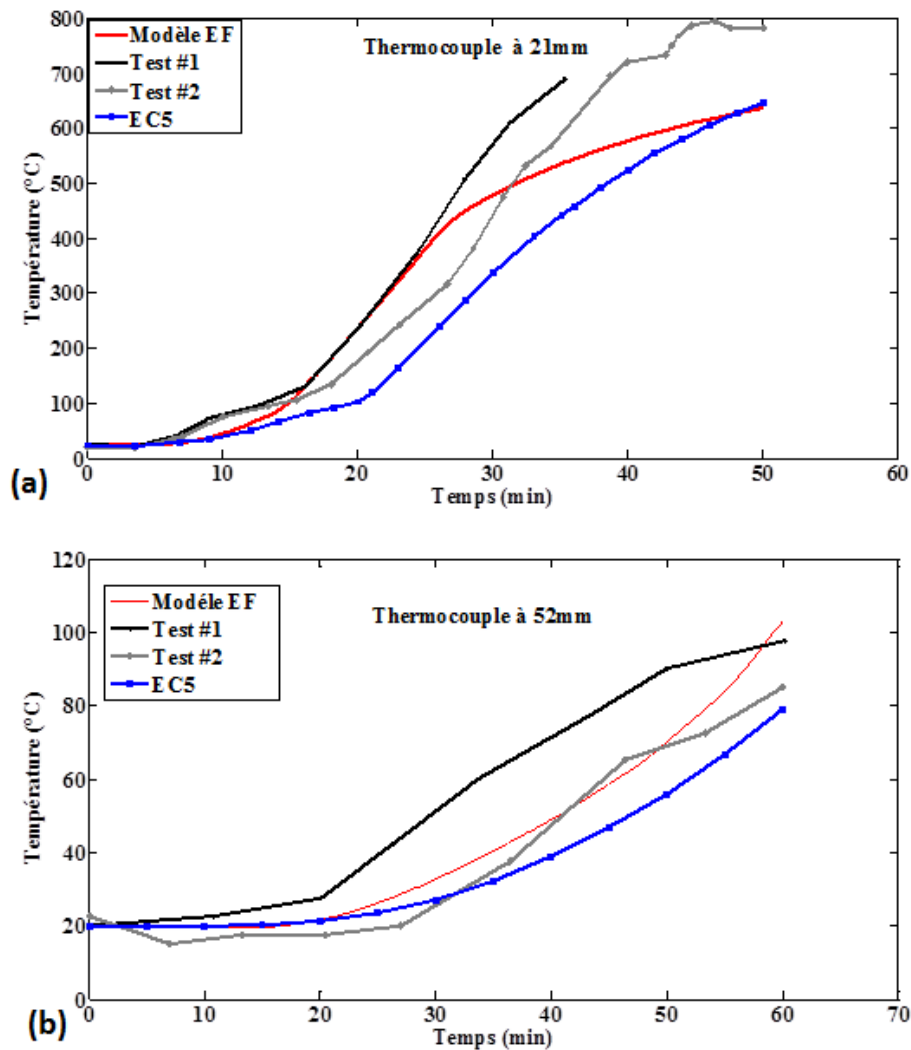


FIGURE 4 – Evolution des températures en fonction du temps : (a) Thermocouple à 21 mm et (b) Thermocouple à 52 mm

Où $a_1 = 3.10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$, $b_1 = -7.10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ et $c_1 = -2.6$ sont des constantes issues de la littérature et identifiées pour un bois ayant une densité de 550 kg/m^3 [8].

La figure 6 montre la comparaison entre l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température suggérée par l'Eurocode 5 et celle simulée par éléments finis. On remarque qu'au-delà des 100°C ,

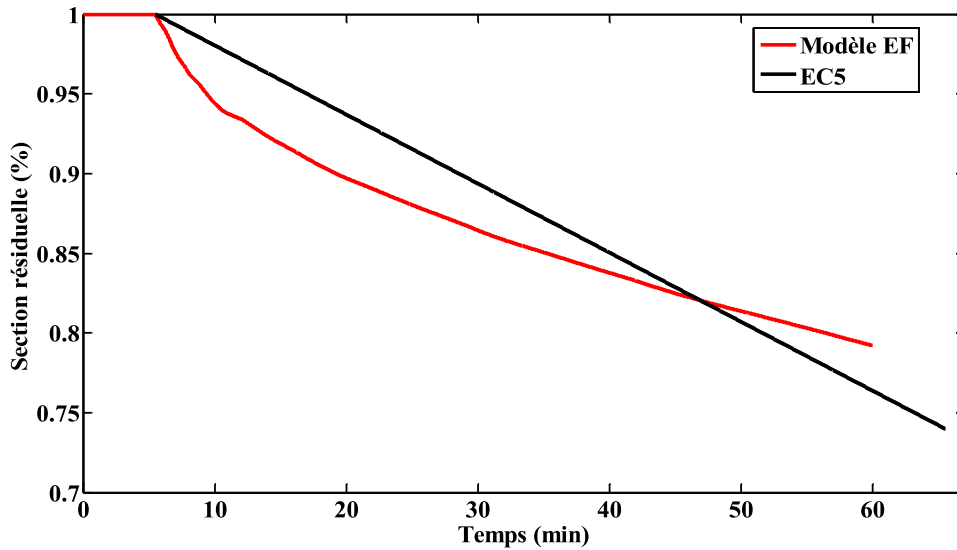


FIGURE 5 – Section résiduelle : comparaison modèle EF/ Eurocode 5

l’Eurocode 5 dégrade le module d’élasticité pour des température relativement faibles. Par ailleurs, la simulation numérique montre un point de singularité au voisinage 100°C, environ. Ce point de singularité correspond à la phase de séchage (100°C). En effet, dans cette phase l’élévation de température génère un séchage qui à son tour provoque une augmentation du module d’élasticité et la dégradation de celui-ci par la température dans cette phase est plus que compensée par l’effet du séchage. Ce qui est cohérent avec la littérature (théorie).

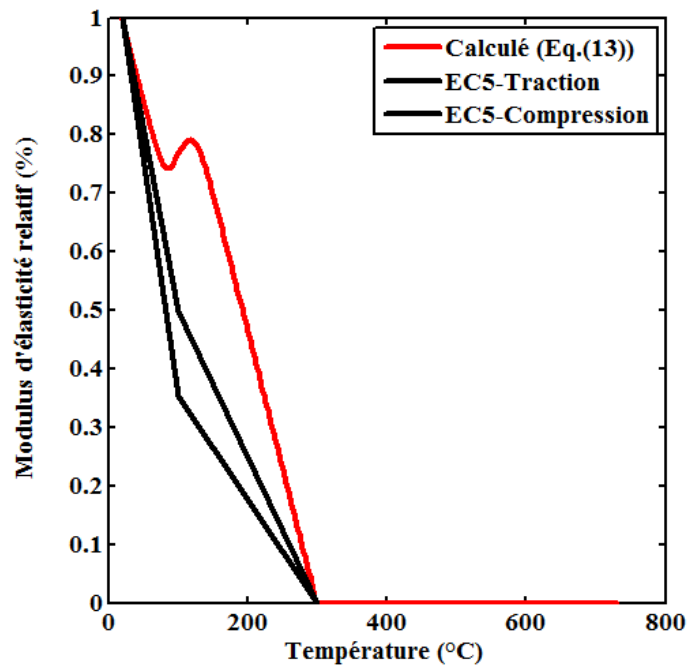


FIGURE 6 – Evolution du module d’élasticité en fonction de la température : comparaison modèle EF/ Eurocode 5

Références

- [1] Batoz J.-L., G. Dhatt. *Modélisations des structures par éléments finis*, Vol. 2 poutres et plaques, Hermès, 484 pages, 1990.
- [2] EN 1995-1-2. *Design of timber structures. Part 1-2 : General - Structural fire design*, Eurocode 5, European Committee for Standardization, 2004.
- [3] Fredlund B. *Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire*, Fire Safety J., Vol. 20, 39-69, 1993.
- [4] ISO 834-1. *Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1 : General requirements*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [5] Janssens ML. *Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire*, Fire Mater., Vol. 28, 199-207, 2004.
- [6] Knudson R.M, Schniewind A.P. *Performance of structural wood members exposed to fire*, Forest Prod. J., Vol. 25(2), 23-32, 1975.
- [7] Menis A. *Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements*, PhD Thesis, Università degli studi di Cagliari, Italy, 2012.
- [8] Mirianon F., Fortino S. and Toratti. T. *A method to model wood by using ABAQUS finite element software - Part 1 : Constitutive model and computational details*, VTT PUBLICATIONS 687, Espoo 2008.
- [9] Shen D.K, Fang M.X, Luo Z.Y, Cen K.F. *Modeling pyrolysis of wet wood under external heat flux*, Fire Safety J., Vol. 42, 210-217, 2007.
- [10] Thi V.D., Khelifa M., El Ganaoui M., Rogaume Y. *Finite element modelling of pyrolysis of wet wood subjected to fire*, Fire Safety Journal, Vol. 81, 85-96, 2016.