HAL
open science

Résistance au feu des structures bois

Thomas Robinet, Jean Signoret

To cite this version:

Thomas Robinet, Jean Signoret. Résistance au feu des structures bois . Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. hal-01834357

HAL Id: hal-01834357

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01834357

Submitted on 10 Jul 2018

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

enstib

Projet de fin d'étude
- Promo 2015 -

Résistance au feu des structures bois

ROBINET Thomas - SIGNORET Jean

Enseignant responsable: M.KHELIFA

SOMMAIRE

Sommaire **2**

Remerciements **1**

Introduction **2**

- PARTIE 1 - Constat **3**

- PARTIE 2 - Sécurité et réglementation **4**

1. Réaction au feu 4
   1.1. Classement français *4*
   1.2. Classement européen *5*
2. Résistance au feu 10
   2.1. Classement français *10*
   2.2. Classement européen *11*
3. Application de l'harmonisation européenne en France 13

- PARTIE 3 - littérature **14**

1. Le comportement du bois exposé au feu 14
   1.1. Dégradation du bois sous l'influence de la chaleur, la pyrolyse *14*
   1.1. Vitesse de carbonisation *15*
2. Evolution des propriétés du bois 16
   2.1. Conductivité thermique *16*
   2.2. Densité *17*
   2.3. Chaleur spécifique *18*
3. Modélisation de la chaleur 19
   3.1. Principe de l'échauffement *19*
   3.2. Les conditions initiales aux limites *20*

- PARTIE 4 - Comportement thermique **23**

1. presentation des essais 23
   1.1. Poutres LVL testées dans un four sur mesure *23*
   1.2. Poutres LVL testées dans un four pilote *25*
2. Modélisation numérique 26
   2.1. Présentation du modèle *26*
   2.2. Paramétrages des essais *27*
3. Etude des simulations 29
   3.1. Résultats numériques *29*
   3.2. Comparaison entre modèle numérique et expériences *35*

CONCLUSION **40**

Bibliographie **41**

ANNEXES **43**

Abstract **50**

REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pas pu aboutir sans l'aide de notre encadrant de projet Mr Mourad KHELIFA qui a su prendre de son temps pour nous épauler et nous aider à avancer dans nos simulations. Sa motivation pour la réussite de ce projet nous a aidés à poursuivre nos efforts et garder notre pleine motivation. Nous remercions de plus Mr Marc OUDJENE pour le temps qu'il a pu nous accorder.

Nous tenons de plus à remercier Mr Adrien VERNET (chargé d'affaire ESP-ESPN Buisiness Ligne Nucléaire) pour avoir relu le contenu technique de notre rapport afin de vérifier nos propos et pour nous avoir orienté vers des axes d'amélioration qui ont été bénéfiques à la compréhension du logiciel Abaqus.

Il est nécessaire dans tout projet d'avoir une personne, compréhensive, à l'écoute, et qui sait vous redonner de la motivation dont vous avez besoin. Nous tenons donc à remercier nos conjointes et lectrices assidus Aurélie BICHOT et Mareva SECCI pour la patience dont elles ont fait preuve lors de leur relecture.

INTRODUCTION

La résistance au feu des structures bois est un sujet sensible pour les acteurs de la construction. Bon nombre de personnes pensent que ce matériau résiste peu en présence de températures élevées facilitant alors la propagation du feu. Les règlementations actuelles concernant les établissements recevant du public (ERP) deviennent de plus en plus exigeantes. Il est donc nécessaire de démentir cette mauvaise image qui peut porter préjudice à notre filière.

De par nos connaissances, le matériau bois résiste beaucoup mieux à un incendie en comparaison à l'acier ou le béton malgré sa combustion. La couche de charbon qui se crée lorsque le bois est soumis à de très fortes températures représente une très bonne isolation permettant de limiter la propagation du feu. De ce fait, les structures bois ont de très bonnes résistances lors d'un incendie même si les caractéristiques intrinsèques de ce matériau diminuent lors d'une augmentation de température.

Ce projet de fin d'étude se présente en plusieurs parties. Dans un premier temps, nous réaliserons une étude concise de la réglementation « bois feux » en France en reprenant et en expliquant les études réalisées auparavant dans ce domaine.
Dans un second temps, une bibliographie nous permettra de définir le comportement du bois exposé au feu ainsi que ses propriétés thermiques.
Une fois avoir approfondi le sujet nous nous pencherons alors sur la résolution de modèle en utilisant la méthode des éléments finis.
Cette étude se fera via le logiciel « ABAQUS ». Nous pourrons ainsi exploiter des thèses traitant de ce sujet afin de déterminer les paramètres d'étude de nos modèles.

Nous portons une attention toute particulière au but principal de ce projet. Ce sujet n'a pas pour objectif de démontrer la performance d'un assemblage bois, mais bien de nous approprier l'utilisation du logiciel ABAQUS en simulant le comportement de ce matériau en présence de feu. La prise en main de ce logiciel étant difficile, il nous est demandé de comprendre un maximum tout en rendant des comptes sur les difficultés rencontrées lors des modélisations ainsi que leurs résolutions ou leur non faisabilité.

- PARTIE 1 - CONSTAT

Nous pouvons répertorier en France 11769 interventions des sapeurs-pompiers par jour en 2013 soit 111 interventions de plus que l'année précédente. Les incendies toutes interventions prises en compte sont en diminution d'après les statistiques des services d'incendies et de secours (figure 1) :

	SDIS 2013	SDIS 2014
Nombre d'intervention sur l'année	+ 0,3	+1
Incendies	-3	-8
Accidents de circulation	-3	-2
Secours à victime - aides à personne	+2	+2
Risques technologiques	-1	+1
Opérations diverses	-5	-2

Figure 1 _ Comparaison SDIS 2013-2014 (en pourcentage)

Le nouveau rapport des services d'incendies et de secours étant disponible depuis le 12 décembre 2014, nous pouvons faire une comparaison entre les années 2012 et 2013 (les rapports apparaissent avec un an de délais depuis le rapport de 2011). On peut remarquer que le nombre d'interventions en France augmente. Cependant, nous observons moins d'interventions ayant pour cause des incendies d'année en année.

Regardons en détails les interventions des sapeurs-pompiers en rapport avec les incendies pour voir si cette tendance de diminution est bien présente (figure 2) :

	2011	2012	2013
Incendies (hors feux de forêts)	317909	306871	281908
Incendies (bâtiment)	92040	96718	97719
Incendies habitation	76106	81027	82698
Incendies ERP	6645	6513	6473

Figure 2 _ Les incendies dans le bâtiment

Notre comparaison permet de mettre en évidence la diminution en France des incendies car les feux sur la voie publique (-9% en 2013), les feux de végétations (-26% en 2013), et les autres feux (-5% en 2013) sont fortement réduits. Il n'y a cependant pas de diminution notoire dans le domaine de la construction. Au contraire, appart les établissements recevant du public, les incendies de bâtiment et d'habitation ne cessent d'augmenter d'année en année. Il est de ce fait important d'étudier le comportement au feu des structures bois.

- PARTIE 2 - SECURITE ET REGLEMENTATION

Avant de vous présenter l'ensemble des justifications de structures existantes, il est important de rappeler qu'il est possible de caractériser un matériau par deux propriétés bien distinctes.

1. REACTION AU FEU

C'est la contribution qu'un matériau peut apporter lors d'un incendie. On étudie de ce fait, la proportion qu'à un produit pour participer au développement du feu du fait de son caractère plus ou moins combustible.

Le phénomène de réaction au feu permet d'étudier les matériaux de revêtement (sol, mur, façade,..) et les éléments structurels surfaciques. La justification de la réaction au feu des éléments de structure tel que les poteaux et les poutres ne peut cependant pas être réalisée.

1.1. Classement français

La norme NF.P.92.507 permet de classer la réaction au feu des matériaux suivant 5 catégories (figure 3). Cette classification établie par le CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment) abouti à un procès-verbal qui est établi pour une durée de cinq ans.

La classification suivante est ainsi obtenue :

- M0 : incombustible
- M1 : non inflammable
- M2 : Difficilement inflammable
- M3 : Moyennement inflammable
- M4 : facilement inflammable

	Combustibilité	Inflammabilité	Exemples
M0	Incombustible	Ininflammable	pierre, brique, ciment, tuile, plomb, acier, ardoise, céramique, plâtre, béton, verre, laine de roche
M1	Combustible	Non inflammable	matériaux composites, PVC, dalles minérales de faux-plafonds, polyester, coton, bois ignifugé
M2	Combustible	Difficilement inflammable	moquette murale, panneau de particules
M3	Combustible	Moyennement inflammable	bois, revêtement sol caoutchouc, moquette polyamide, laine
M4	Combustible	Facilement inflammable	papier, polypropylène, tapis fibres mélangées

Figure 3 _ Classification « M »

Des exigences ont de plus été définies pour les établissements recevant du public (figure 4). Elles nous permettent de connaitre quel matériau insérer dans chaque partie de la structure. Nous aurons ainsi une réaction au feu de chaque élément le plus performant possible afin de respecter les normes.

Réaction au feu			M0	M1	M2	M3	M4
Plafonds		Locaux et dégagements		×			
		Résilles moins de 50%			×		
Revêtements intérieurs	Murs et cloisons	Locaux et dégagements			×		
	Escaliers encloisonnés	Murs		×			
		Plafonds		×			
		rampants		×			
		Marches et palier				×	

Figure 4 _ Classement « M » pour les ERP

1.2. Classement européen

La réaction au feu des structures bois a été validée en Europe sous le nom d' « euroclasse ». Son application a été effectuée en France lors de la publication au Journal Officiel du 31 décembre 2002 de l'arrêté du 21 novembre 2002. De nouveaux classements, de A1 à F remplacent les classements « M » dès lors que le produit est marqué CE (communauté européenne). C'est le cas de bon nombre de produits tel que les isolants, les panneaux à base de bois, les plafonds tendus ou suspendus, les revêtements de sols, les carreaux de plâtre… Les mises à jour incluant les transpositions de valeur selon le référentiel français en « euroclasses » n'ont pas toutes été réalisées. De ce fait, nous avons un classement incomplet.

La détermination se fait alors selon trois critères distincts. On parle pour le premier critère de notion de développement du feu. On mesure le dégagement thermique du produit et sa contribution potentielle à la propagation d'un incendie (pouvant aller jusqu'à l'embrasement). On obtient ainsi 6 niveaux de performance :

- **Euroclasse A1, A2** : Le matériau n'apporte aucune contribution au feu.
- **Euroclasse B** : La contribution au feu du matériau est très limitée. Cette classe est décrite comme l'euroclasse C mais avec des critères plus stricts. Dans des feux bien engagés, ces produits ne contribuent que très peu à la charge combustible et au développement du feu.
- **Euroclasse C** : La contribution au feu du matériau est limitée. Cette classe est décrite comme l'euroclasse D mais avec des critères plus stricts.
- **Euroclasse D** : La contribution au feu du matériau est acceptable. Le matériau satisfait aux critères de la classe E et résiste pour une période plus longue à l'attaque d'une petite flamme sans propagation substantielle et avec une formation limitée de gouttes enflammées. De plus, ils sont capables de subir l'essai SBI (objet isolé en feu).

- **Euroclasse E** : La contribution au feu du matériau est acceptable. Ce produit résiste cependant lors d'une courte période à l'attaque d'une petite flamme sans propagation substantielle. Des gouttes enflammées peuvent être observées.
- **Euroclasse F** : Ce classement admet que le matériau n'a aucune performance déterminée. Ceux sont des produits pour lesquels aucune performance de réaction au feu n'a été déterminée ou revendiquée par le fabriquant. Et qui ne peuvent être classés dans aucune des classes A, B, C, D ou E.

Le deuxième critère de classification « s » (smoke) permet de prendre en compte le dégagement de fumée provoqué par la combustion du matériau :

- **s1** : Dégagement de fumée très limitée
- **s2** : Dégagement de fumée limitée
- **s3** : Matériau ne répondant ni au critère S1 ni au critère S2

Le troisième et dernier critère permet de classer notre produit selon un classement « d » (droplets) pour la production de particules enflammées (gouttelettes) :

- **d0** : Pas de gouttelettes
- **d1** : Dégagement de gouttelettes persistant pendant au maximum 10 s (essai SBI)
- **d2** : Nombreuses gouttelettes (matériau n'entrant pas dans la caractérisation d0 ou d1)

1.2.1. Les scénarios d'incendie et la réaction au feu

Plusieurs critères de vérification ont été développés afin de classer avec précision les matériaux vis-à-vis de leur réaction au feu. L'harmonisation des classements européen a peut-être été fastidieux et mettra un certain temps à être totalement remplacer par nos classements français, mais la création de l'euroclasse est beaucoup plus performante que le classement « M ».

Cette nouvelle classification se base sur plusieurs scénarios mis au point afin d'évaluer le comportement au feu des matériaux, produits, et systèmes de construction. Ces essais ont pour objectif d'être transposés en caractéristiques ou paramètres mesurables en laboratoire. Les deux principaux scénarios qui ont été traduits en méthode d'essais sont les suivants :

- « **room corner** » : Scénario représentatif d'un foyer d'incendie se développant dans le coin d'une pièce.
- « **room corridor** » : Scénario qui reproduit l'extension du feu d'une pièce vers un couloir.

D'autres scénarios sont en voie d'élaboration afin de compléter l'ensemble des scénarios portant sur les produits de construction. Ces études recherchent à mieux définir les problématiques de gaines verticales (pour l'évaluation des produits linéaires tels que les conduits, les câbles électriques, etc..) ainsi que les problèmes de façades.

Les études qui se basent sur les deux scénarios existants ont permises de réaliser un schéma du développement d'un incendie (figure 5). Le schéma ci-dessous permet de différencier trois phases de développement, à chacune de ces trois phases correspond une méthode d'essai harmonisée.

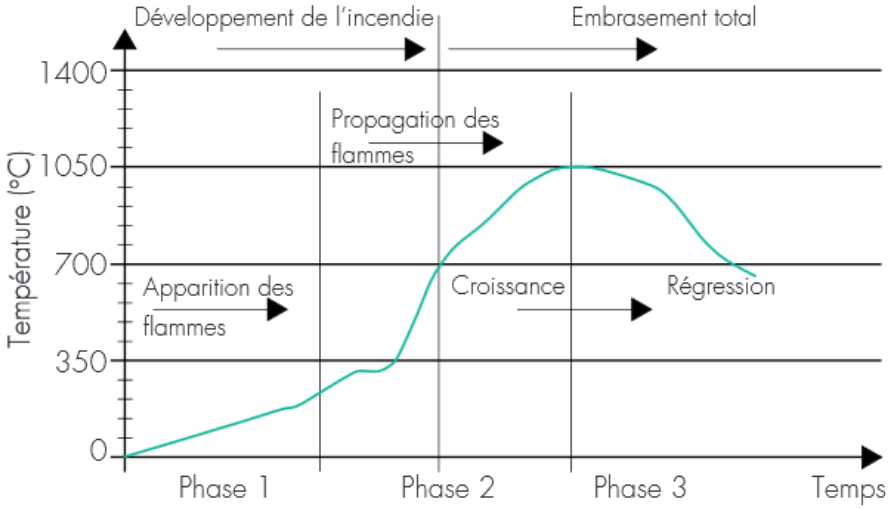


Figure 5 _ Schéma du développement d'un incendie

1.2.2. Phase 1 : Test de la petite flamme

Le test de la petite flamme (figure 6) est décrit par la norme EN ISO 11925-2. C'est le premier degré des différents tests pouvant être réalisés pour la bonne classification des matériaux dans un des 6 niveaux de performance. Tout produit voulant avoir une performance supérieure à E doit réussir ce test pour passer aux essais suivants pour être classé à un échelon supérieur.

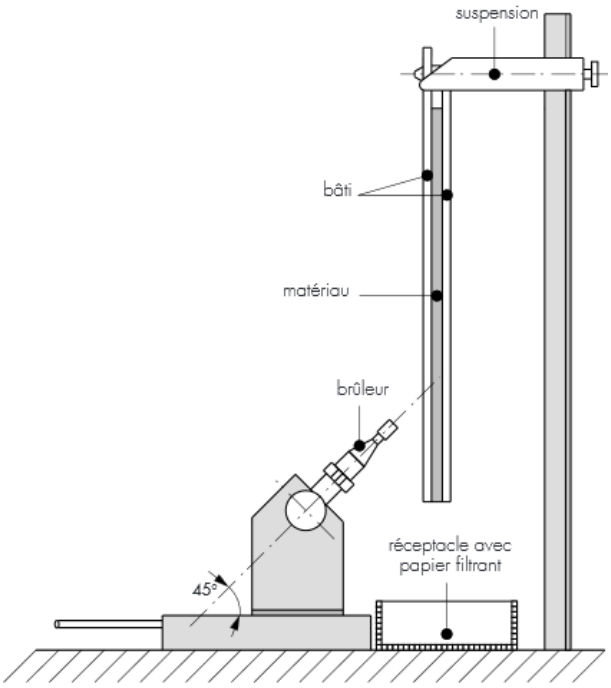


Figure 6 _ Essai à la petite flamme

Cet essai est composé de deux niveaux d'attaques thermiques. Pour chacun des niveaux est évaluée l'inflammabilité de l'échantillon disposé verticalement et soumis à une petite flamme (0.8 kW) attaquant le bord et/ou la surface du matériau avec un angle de 45°.

La source d'ignition est posée sur une plateforme mobile, de façon à appliquer et retirer la flamme de l'éprouvette aisément. Un réceptacle contenant deux couches de papier filtrant en dessous du produit à tester est nécessaire afin de récolter les éventuelles gouttelettes enflammées. La détermination de l'inflammabilité du papier filtrant sera ensuite possible.

Les essais pour un produit doivent être réalisés sur 6 éprouvettes de 250mm * 90mm de dimensions. Expliquons maintenant les deux niveaux à étudier :

- Niveau 1 : Après 15 secondes d'application de la flamme, la propagation verticale de cette dernière ne doit pas atteindre une ligne située à 150 millimètres au-dessus du point d'attaque du brûleur pendant au moins 20 secondes. Si le matériau tient les 20 secondes il est classé E.
- Niveau 2 : La flamme est appliquée une seconde fois pendant un temps de 30 secondes. Après ce laps de temps il faut vérifier si la ligne de référence située à 150 millimètres n'est pas atteinte avant 60 secondes. Si la ligne de référence n'est pas atteinte, le matériau reçoit le visa pour des essais au SBI pour une éventuelle attribution de classe B, C, ou D.

1.2.3. Phase 2: Test SBI (Single Burning Item)

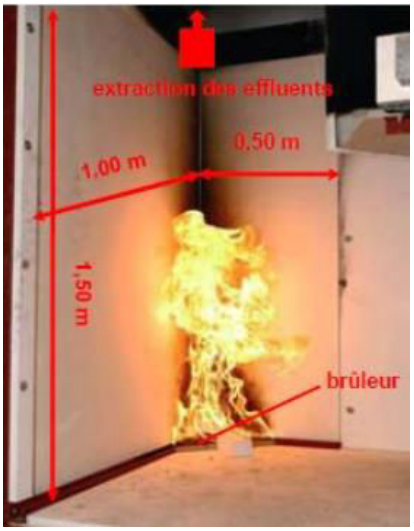


Figure 7 _ Principe de l'essai SBI

Le test SBI (figure 7) permet d'estimer la contribution d'un produit à l'extinction de l'incendie selon la norme NF EN 13823. En cas d'inflammation du produit, l'étude de l'effet de « flash over » est réalisée, autrement dit l'effet d'embrasement généralisé. Il a été considéré que les coins des habitations représentent la condition la plus sévère d'attaque par incendie. L'objet en feu est placé dans le coin d'une pièce en appliquant un flux de chaleur sur les parois avoisinants l'objet.

L'éprouvette d'essai est disposée contre deux parois verticales de dimensions inégales, formant un angle droit. Le plus petit panneau doit mesurer 0.5 m * 1.5 m, le plus grand 1m * 1.5m. L'éprouvette est exposée pendant 20 minutes aux flammes d'un brûleur triangulaire ayant une intensité de 30.7 ± 2 kW, située dans l'angle intérieur des deux parois. Un dispositif d'essai plus détaillé peut être spécifié dans certains cas.

Lors de cet essai trois critères différents sont mesurés :

- L'indice **FIGRA** (FIre Growth Rate) : C'est l'émission maximale de chaleur divisée par le laps de temps au bout duquel elle se produit. Cela représente le taux de croissance de l'incendie (croissance du débit calorifique).
- La longueur **LFS** (Lateral Flame Spread) : C'est l'extension latérale des flammes à la surface de l'éprouvette en mètre.
- L'indice **THR** (Total Heat Release) : Le dégagement thermique total durant les 600 premières secondes de l'essai est étudié : THR_{600s} exprimé en MJ (Mégajoule).

Ce test nous permet de déterminer l'euroclasse de notre échantillon :

- **Classement D** : Pas d'embrasement généralisé lors des 2 premières minutes de l'essai.
- **Classement C** : Pas d'embrasement généralisé lors des 10 premières minutes de l'essai.
- **Classement B** : Pas d'embrasement généralisé lors des 20 premières minutes de l'essai.

En plus des tests SBI et de la petite flamme il est proposé de mesurer deux indices supplémentaires pour affiner l'euroclassification :

- **La production de fumée** :
  - ***SMOGRA*** (SMOke Growth Rate) : La production maximum de fumée divisée par le laps de temps au bout duquel le phénomène de fumée se produit est mesurée.
  - ***TSP*** (Total Smoke Production) : Cela correspond à la production totale de fumée pendant les 600 premières secondes de l'essai « TSP_{600s} ».
- **La chute de gouttelettes ou particules enflammées** durant plus de 10 secondes, cette mesure se fait par évaluation visuelle des gouttelettes.

1.2.4. Phase 3 : Bombe calorimétrique et four de non combustibilité

Si les échantillons du matériau étudié passent les deux premières phases de test, des essais dans une bombe calorimétrique ou dans un four de non combustibilité peuvent être réalisés.

La méthode d'essai par le four de non combustibilité est réalisée suivant la norme NF EN ISO 1182. Tout matériau possédant un potentiel calorifique peut produire une réaction exothermique puisqu'il est en principe combustible. Suivant cet essai trois critères sont vérifiés : L'élévation de température
La perte de masse
La durée d'inflammation.

L'essai par bombe calorimétrique permet quant à lui de déterminer la quantité de chaleur maximale émise par la combustion complète d'un matériau. Cette quantité de chaleur est quantifiée par le potentiel calorifique qui est exprimé en MJ/kg. La validation de cet essai ne peut être effectuée si l'on vérifie le matériau par trois éprouvettes à tester dans différentes conditions : volume constant, atmosphère composée d'O_2, ainsi qu'un calorimètre calibré par combustion d'acide benzoïque certifié.

Une méthode de classification succincte a été insérée en *Annexe 1* pour synthétiser l'euroclassification. Un récapitulatif des critères requis pour la validation de chacune des euroclasses à de plus été ajouté en complément en *Annexe 2*.

2. RESISTANCE AU FEU

C'est la durée pendant laquelle un élément continue de remplir sa fonction malgré l'action de l'incendie. Cela permet de réaliser une étude de comportement au feu des éléments de structures puisque la réaction au feu ne prend pas en compte ces derniers.

La résistance au feu concerne donc les éléments porteurs (poteaux, poutres, structures de toitures, planchers), avec de plus les éléments de séparation ou de protection (cloisons, portes, plafonds, conduits, clapets, ventilateurs de désenfumage).

2.1. Classement français

La résistance au feu est répartie en trois catégories en France (figure 8) :

- **SF** (Stable au Feu) : L'élément de construction conserve ses capacités de portance et d'auto-portance pendant le temps indiqué.
- **PF** (Pare-Flammes) : L'élément est stable au feu et évite, durant le temps indiqué, la propagation du côté non exposé au feu, des gaz de combustion et des fumées.
- **CF** (Coupe-Feu) : L'élément est pare-flammes et permet d'éviter la propagation de la chaleur sur le côté non exposé au feu pendant le temps indiqué.

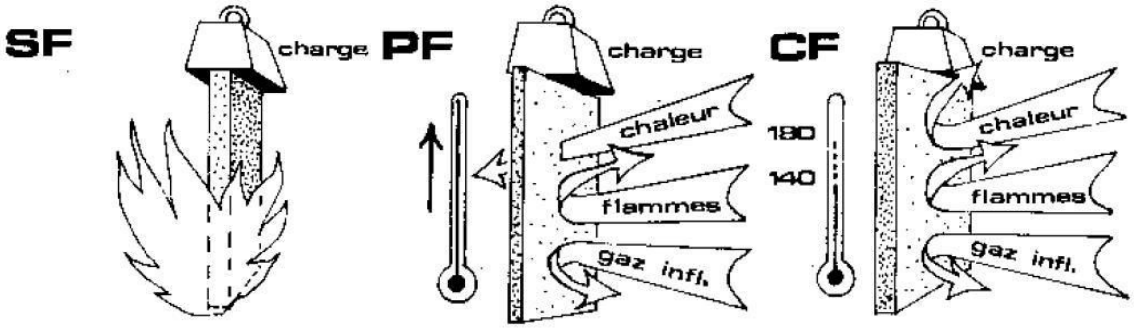


Figure 8 _ Représentation de la classification SF, PF, CF

La résistance au feu permet de justifier que les éléments de construction on une certaine capacité à conserver leur rôle isolant (PF ou CF) ou porteur (SF) assurant le temps nécessaire à l'évacuation, au sauvetage et à la lutte contre l'incendie. On évalue ainsi ces trois catégories suivant quatre critères distincts :

- La résistance mécanique : La résistance mécanique d'un élément est respectée si ce dernier continue à remplir sa fonction. On vérifie si ce dernier permet la stabilité de la structure ainsi que sa tenue propre.
- L'isolation thermique : Le critère est respecté si l'élément étudié ne dépasse pas 180°C en un point précis et 140°C sur l'ensemble de sa surface (porte par exemple).

- L'étanchéité aux flammes : L'étanchéité au feu est satisfaisante lorsque l'élément ne s'enflamme pas pendant la durée exigée.
- L'absence d'émission de gaz inflammables : Etude réalisée sur la face non exposée aux flammes.

On peut ainsi établir un tableau récapitulatif montrant les catégories SF, PF, et CF ainsi que les critères permettant de définir cette catégorie (figure 9). Nous indiquons de plus une liste d'éléments afin de donner une idée des matériaux pouvant être admis dans chacune des catégories.

Critères	Résistance mécanique	Isolation thermique	Etanchéité aux flammes	Absence d'émission de gaz inflammables	Eléments concernés
Stable au feu (SF)	X				Poteaux
					Poutres
Pare-flammes (PF)	X		X	X	Blocs-portes
					Murs et cloisons
Coupe-feu (CF)	X	X	X	X	Murs et cloisons
					Planchers
					Gaines
					Blocs-portes

Figure 9 _ Critères de validation des catégories SF, PF, CF

Les degrés de résistance au feu s'expriment en durée : ¼ d'heure, ½ heure, ¾ d'heure, et de 1 à 6 heures. La détermination du degré de résistance au feu s'effectue au moyen d'essais conventionnels.

2.2. Classement européen

Le classement de la résistance au feu tend à disparaitre au profit de la vérification harmonisée entre les pays européens. Ce nouveau classement a été publié en France lors de l'arrêté du 22 mars 2004 publié au journal officiel du 1er avril 2004. Les industriels français doivent donc se tenir au courant de ces nouveaux critères de vérification car, sauf cas particulier, ces essais sont désormais effectués selon la normalisation européenne.

Le classement européen de la résistance au feu est toutefois semblable à notre classement au niveau des différents contrôles même si les appellations changent.

- **R** : Facteur caractérisant la capacité portante d'un élément. On vérifiera son aptitude à conserver sa stabilité structurale pendant l'incendie.
- **E** : Test d'étanchéité au feu en vérifiant l'aptitude d'un élément à résister à une exposition au feu sur un de ses côtés sans qu'il y ait transmission sur le côté non exposé.
- **I** : Etude de l'isolation thermique de l'élément afin de savoir s'il peut résister à une exposition au feu sur un seul côté sans qu'il le transmette par transfert de chaleur important vers le côté non exposé. Pour cela il faut que la température sur la face non exposée ne dépasse pas les 140°C (ou 180°C en un point).

Des paramètres complémentaires optionnels et particuliers sont aussi mesurables pour justifier la performance d'un élément :

- **W** : L'élément ne laisse passer ou n'émet pas de rayonnement thermique supérieur à 15 kW/m².
- **M** : Aptitude d'un élément à résister à un impact.
- **C** : Aptitude d'une porte ou fermeture à se fermer automatiquement en obturant une ouverture en cas d'incendie.
- **S** : Aptitude d'un élément à réduire ou à éliminer le passage de gaz ou de fumées d'un côté à l'autre de l'élément.
- **G** : Résistance à la combustion de suie des cheminées et des produits connexes.
- **K** : Aptitude d'un revêtement de mur ou de plafond à assurer la protection des matériaux contre l'allumage, la carbonisation.

Des similitudes entre le classement REI et le classement SF, PF, et CF sont constatés. L'expression des degrés de résistance au feu s'exprimant toujours en durée est cependant plus étendu et plus précis (10,15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, ou 360 minutes). Un tableau permettant de comparer les deux classements a été réalisé afin de faciliter la compréhension (figure 10) :

Classement européen	Correspondance avec les exigences françaises
Exprimé en minutes	Exprimé en heures ou fraction d'heures
R = Capacité portante	SF = Stable au feu
E = Etanchéité au feu	PF = Pare-flammes
RE	PF + SF
EI	CF = Coupe-feu
REI	CF + SF

Figure 10 _ Comparatif Classement européen et français de la résistance au feu

Une correspondance des indices SF, PF, et avec le classement REI met en évidence la relation qui les lient. Lorsqu'un des trois indices est recommandé les produits qui font l'objet d'un classement R, E, ou I peuvent être mis en œuvre. Il faut cependant que le critère européen exprimé en minute soit supérieur ou égale à l'exigence demandée par le classement français qui s'exprime en fraction d'heure. On peut donc obtenir par exemple (figure 11) :

Produit	Classement européen	Exigences françaises
Porte	E 30 minutes	PF ½ heure
Plancher	REI 60 minutes	CF 1 heure et SF 1 heure
Mur porteur	R 90 minutes	SF 1heure et 30 minutes

Figure 11 _ Exemple comparatif de comparaison entre le classement européen et français

3. APPLICATION DE L'HARMONISATION EUROPEENNE EN FRANCE

Selon la directive 89/106/CEE du conseil des communautés européennes du conseil du 22 juillet 1993 un ouvrage doit être conçu et construit de manière à ce que, en cas d'incendie :

- La stabilité des éléments porteurs de l'ouvrage puisse être présumée pendant une durée déterminée,
- L'apparition et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de l'ouvrage soient limitées,
- L'extension du feu à des ouvrages voisins soit limitée,
- Les occupants puissent quitter l'ouvrage indemne ou être secourus d'une autre manière,
- La sécurité des équipes de secours soit prise en considération

Pour vérifier la réaction au feu de notre matériau bois l'arrêté portant sur la réaction au feu du 21 novembre 2002 nous propose la classification suivante pour les produits de construction.

Cet arrêté met en application le système d'euroclassification pour la réaction au feu des produits de construction. On procède donc à un classement allant de « A1 » à « F » qui remplace le classement « M ». Ce nouveau système de classification est obligatoire pour les produits possédants l'annotation marquage CE.

L'euroclassification peut être réalisée selon l'annexe 3 de l'arrêté si les produits utilisés font partis des produits énumérés dans l'annexe. Il est aussi expliquer le classement des différents produits en cas d'application de revêtements tel que les peintures ou le papier peint. On peut ainsi justifier un produit en spécifiant qu'une euroclasse D peut être satisfaisante pour une exigence M3 mais on ne peut dire qu'une exigence M3 est suffisante pour une euroclasse D.

Une multitude de solutions est donc disponible pour justifier la réaction au feu d'un élément bois :

- Le marquage CE (euroclassification)
- Un rapport d'essai par un organisme notifié (coût élevé)
- Une certification produit
- Une euroclassification en se rapportant à l'annexe 3 qui permet d'éviter de réaliser des essais

Pour la résistance au feu seul des ajustements ont été nécessaires pour harmoniser les normes. La réaction au feu quant à elle à nécessité beaucoup de temps de mise en œuvre (1992 à 2000) puisque les essais étaient très différents d'un pays à l'autre.

Les classifications françaises tendent à disparaitre. Lorsque le marquage CE d'un produit n'est pas encore en vigueur, le choix est laissé à l'industriel de faire évaluer par un laboratoire agréé soit le classement M, soit l'euroclasse. Le classement de la résistance au feu pour les matériaux d'aménagement n'est quant à lui pas restreint à la classification des produits par l'euroclasse, pour les matériaux de construction ce classement est cependant fortement demandé.

- PARTIE 3 - LITTERATURE

Les performances mécaniques des structures bois diminuent sous une exposition au feu. Le bois voit diminuer sa section car il se transforme en charbon à une vitesse qui dépend de l'humidité, du flux de chaleur et de la densité. De même sous l'effet de la chaleur, les propriétés thermomécaniques du bois varient.

1. LE COMPORTEMENT DU BOIS EXPOSE AU FEU

1.1. Dégradation du bois sous l'influence de la chaleur, la pyrolyse

Lorsqu'il est exposé au feu, le bois se dégrade sous l'effet d'une décomposition chimique qui transforme ses constituants en gaz volatils laissant des résidus de carbonisation. Une combustion spontanée en surface du bois peut survenir pour des températures de 300°C à 430 °C mais aussi lors d'une exposition prolongée à une température approximant les 150°C.

D'autre part l'importance de la dégradation thermique dépend de la température et de la durée d'exposition.

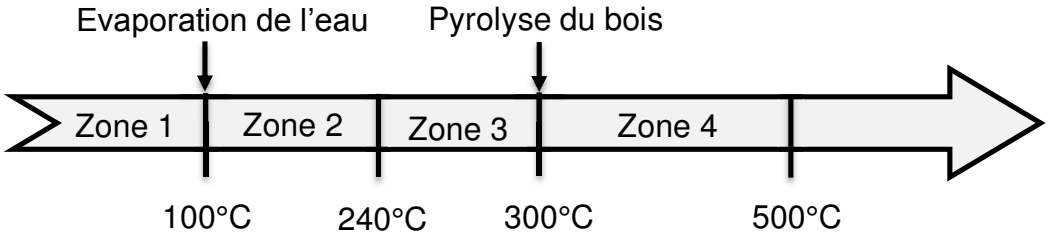


Figure 12 _ Zones de dégradation en fonction de la température

Pour des températures inférieures à 100°C (zone 1), l'effet instantané de la chaleur sur les caractéristiques du bois est réversible. De plus l'exposition prolongée à des températures supérieures à 65°C fait apparaître des altérations rémanentes des caractéristiques mécaniques.

Le bois subit une perte rapide de son eau libre puis de son eau liée lorsque la température de celui-ci atteint 100°C. La température augmente peu tant que l'eau ne s'est pas totalement évaporée. Une rapide augmentation de la température engendre une perte lente de poids solide jusqu'à 240 °C par le phénomène de pyrolyse (zone 2). À partir de températures avoisinant les 300°C (zone 3) la pyrolyse du bois dégage des gaz inflammables. A cette température, le bois est considéré comme étant carbonisé. Les couches de carbonisation se superposent donc par conduction de la température dans le bois.

La combustion du bois libère, entre 150°C et 200°C des gaz composés de dioxyde de carbone incombustible et de monoxyde de carbone combustible. Au-dessus de 200°C, la teneur en CO augmente. La combustion des gaz accroît l'augmentation de température. Dès lors que la température atteint 500°C, la production de charbon augmente au détriment de celle des gaz (zone 4).

Par conséquent lors d'une exposition à une chaleur intense prolongée, le bois se dégrade en charbon de bois, en gaz non inflammables (vapeur d'eau et CO_2) puis en gaz combustibles (CO, H_2 et hydrocarbures).

La figure 13 présente la coupe d'une section de bois ayant subi une exposition au feu. Différentes parties sont identifiées : une couche carbonisée, une couche de bois pyrolysé (environ 5 mm) et le cœur de la section intact.

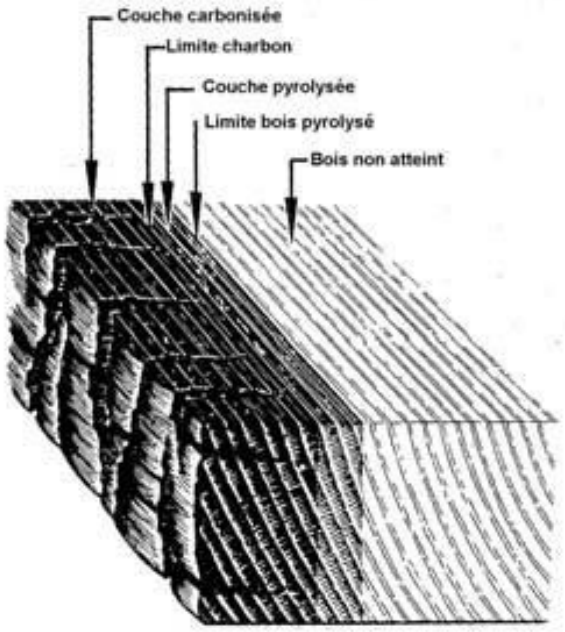


Figure 13 _ Zones de dégradation dans une coupe de bois pour des températures élevées

La température au sein du cœur de la section reste très basse par rapport à celle de la surface. Ce phénomène est lié non seulement à la faible conductivité de la couche de charbon (plus faible que celle du bois) mais aussi à la présence du front de vapeur à la limite de la couche pyrolysée annihilant l'augmentation trop importante dans le bois non atteint.

1.1. Vitesse de carbonisation

La carbonisation du bois diminue de façon considérable ses performances mécaniques tandis que le bois sous cette couche de charbon conserve ses propriétés d'origine. Il est donc essentiel de connaître la vitesse de propagation de la couche carbonisée au travers s'une section de bois afin d'en estimer une durée de stabilité au feu. Tout bois pyrolysé peut être considéré comme du charbon du fait de l'altération de ses propriétés. La vitesse de carbonisation ou vitesse de combustion β correspond donc à l'épaisseur de charbon formé en une minute par la chaleur. Ce paramètre dépend de la masse volumique du bois, de l'intensité du flux de chaleur externe et de la teneur en humidité. La valeur de β varie entre 0,5 et 1 mm/min selon les essences, le type de produits et de la géométrie de la section. De plus lorsque la section résiduelle est inférieure à 40-60 mm, la vitesse β augmente.

L'Eurocode 5 (EN 1995-1-2) donne deux types de vitesse :

- β_0 (vitesse unidimensionnelle), utilisée dans le cas de sections larges exposées au feu sur une seule face.
- β_n (fictive), utilisée dans le cas de sections réduites exposées au feu sur plusieurs faces. Cette vitesse prend en compte l'effet des arrondis en coin.

Ces valeurs correspondent à des profondeurs de carbonisation respectivement de $d_{char,0}$ et $d_{char,n}$ mesurées suivant la figure 14.

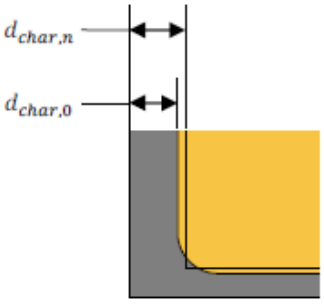


Figure 14 _ Profondeurs de carbonisation unidimensionnelle et fictive

2. EVOLUTION DES PROPRIETES DU BOIS

La réponse thermique du bois exposé au feu est régie par l'équation de diffusion de chaleur [5] qui prend en compte les données thermophysiques : conductivité, chaleur spécifique et densité. De même le comportement mécanique dépend de propriétés mécaniques : modules d'élasticité, limites élastiques. La définition de ces propriétés comme données d'entrée est donc nécessaire à l'analyse thermomécanique.

Nous proposons par la suite en partie 3 de modéliser le comportement au feu d'un élément de bois lamifié (LVL) en pin radiata de Nouvelle-Zélande sous une exposition au feu telle qu'étudiée dans la thèse de A.MENIS.

2.1. Conductivité thermique

La conductivité est définie en rapport avec l'orthotropie matérielle du bois. Cependant les valeurs en direction radiale et tangentielle sont très proches. Ainsi une valeur moyenne est fréquemment retenue en considérant l'hypothèse d'isotropie perpendiculaire. La conductivité longitudinale est quant à elle deux fois plus élevée.

La figure 15 donne l'évolution de la conductivité en fonction de la température (à une humidité initiale de 12%) selon l'annexe de l'Eurocode 5, FRANGI (2001) et selon une nouvelle proposition qui tend davantage vers la conductivité réelle. Cette dernière prend les valeurs de conductivité proposées par FRANGI jusqu'à 550°C et de l'Eurocode 5 pour des températures plus élevées. La croissance rapide de la courbe à partir de 800°C correspond à l'augmentation des échanges thermiques, dans la couche de carbonisation, due à la convection et au rayonnement au travers des fissures.

Pour des températures inférieures à 300°C, les valeurs de conductivité sont celles du bois tandis qu'au-dessus de 300°C, elles correspondent à celles du charbon.

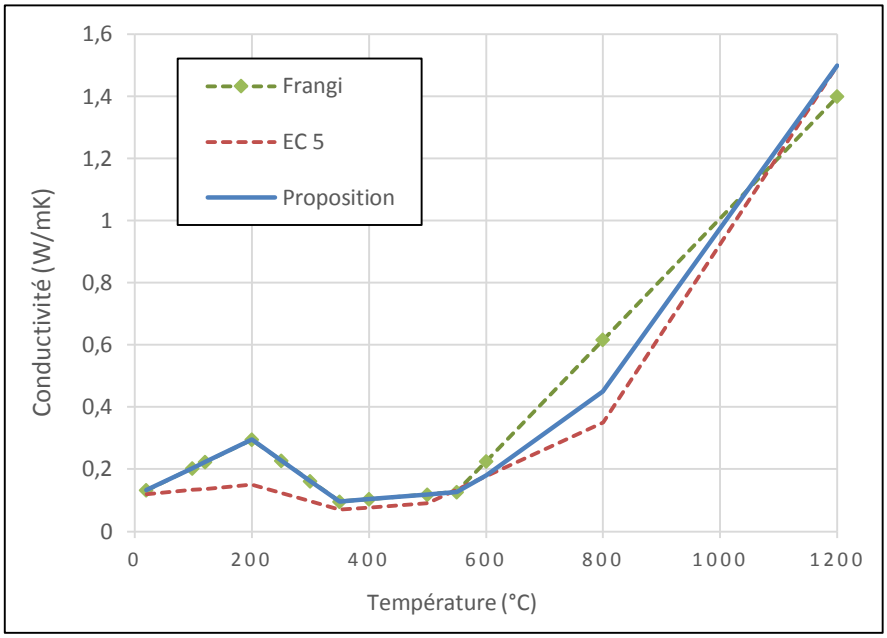


Figure 15 _ Evolution de la conductivité d'un résineux (humidité initiale à 12%) en fonction de la température

2.2. Densité

La densité, tout comme l'humidité du bois est un paramètre influant sur la vitesse de carbonisation et donc sur le gradient de température dans la section. La teneur en eau ralentit l'élévation de la température du bois car elle fait varier sa densité. Cependant cette densité vient à diminuer lorsque le bois est exposé au feu du fait de l'évaporation et de la carbonisation. L'Eurocode 5 donne l'évolution de la densité en fonction de la température que nous prenons en compte dans l'analyse thermique (figure 16). Jusqu'à 200°C, la densité varie peu. Entre 200°C et 350°C, la pyrolyse du bois dégrade les constituants chimiques ; ce qui se traduit pas une chute de la densité de près de 60%. Au-delà de 300°C, le charbon prend la place du bois (densité trois plus faible).La densité est considérée nulle à 1200°C (combustion totale). D'autre part, le saut de densité entre 99 et 120°C correspond à l'évaporation de l'eau, d'où la variation de 1,12 à 1 sur la figure.

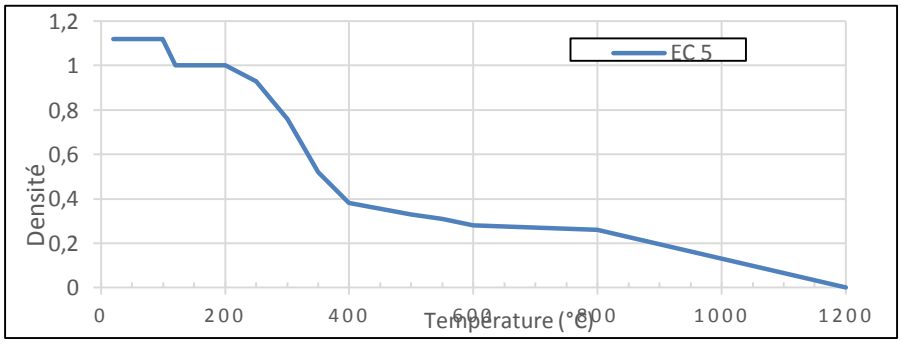


Figure 16 _ Evolution de la densité en fonction de la température

La masse volumique à 12% du LVL de pin radiata est considéré égale à 570 kg/m^3 à température ambiante. Ainsi la masse volumique anhydre est de 450 kg/m³.

2.3. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est considérée dans le respect des valeurs données dans l'Eurocode 5 (figure 17). L'augmentation brutale de la chaleur spécifique entre 99°C et 120°C correspond à l'évaporation de l'humidité contenue dans le bois.

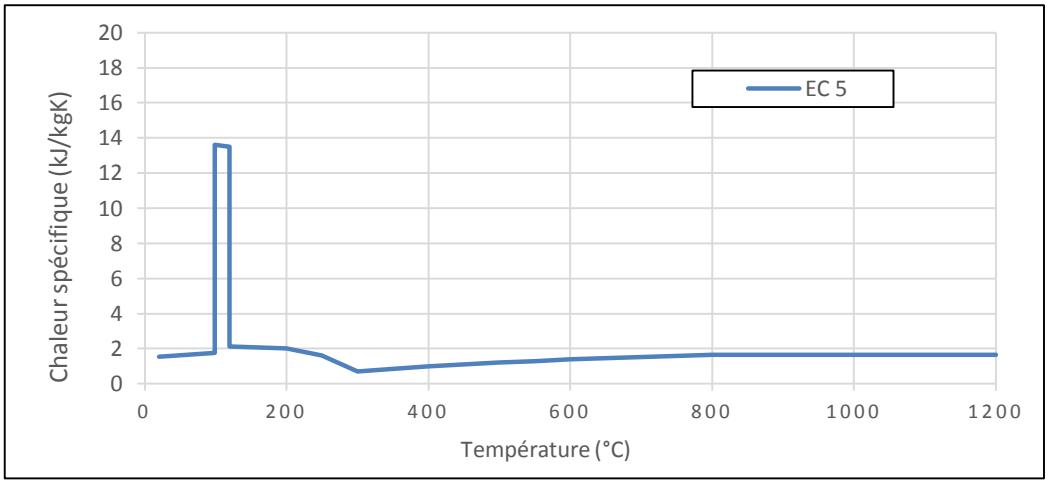


Figure 17 _ Evolution de la chaleur spécifique du bois en fonction de la température

3. MODELISATION DE LA CHALEUR

3.1. Principe de l'échauffement

La création de nos différents modèles ne prend pas en compte la combustion du bois en tant que source d'énergie interne. On étudie donc trois modes de transfert de chaleur : la conduction, le rayonnement, et la convection.

La conduction correspond à un mode de transfert d'énergie interne dans un milieu hors équilibre. Le maintien de ce déséquilibre, ou le retour à l'équilibre se traduit par un flux thermique (ou flux de chaleur) émis des régions chaudes vers les régions froides. Ce flux thermique $\emptyset_{\Sigma}$ est associé à un vecteur noté $\vec{\varphi}$ appelé vecteur de densité de flux thermique instantané dont la norme représente le flux thermique surfacique en W.m^{-2}. La puissance thermique transférée par conduction s'écrit donc :

$$\emptyset_{\Sigma} = \iint_{\Sigma} \vec{\varphi}.\overrightarrow{dS} \qquad [1]$$

La densité de flux thermique utilisée dans la formule du flux thermique ci-dessus correspond au phénomène de conduction au sein d'un solide décrit par la loi de Fourier. Ce transfert de chaleur caractérise une évolution intrinsèquement irréversible. Il est proportionnel à la conductivité thermique λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) du milieu et au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda.\overrightarrow{gradT} \qquad [2]$$

Le signe moins dans la loi de Fourier traduit l'orientation de $\vec{\varphi}$ vers les basses températures.

Comme nous nous situons en absence de source interne de chaleur dans notre matériau, le premier principe de la thermodynamique (lors de toute transformation il y a conservation de l'énergie) nous permet d'écrire la relation suivante :

$$-div\varphi + \rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad [3]$$

Dans l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope, les caractéristiques thermiques λ et $\rho.c$ ne sont dépendantes que de la température. Nous avons ainsi associé les équations [2] et [3] afin d'obtenir une équation de diffusion de la chaleur de la forme : $-div\{-\lambda(T).\overrightarrow{gradT}\} + \rho(T).c(T).\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ [4]

Le bois est cependant un matériau anisotrope dont la conductivité, la densité, et la chaleur spécifique dépendent de la température. L'équation [4] est modifiée en conséquence :

$$\frac{\partial}{\partial x}.\lambda_x(\theta).\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}.\lambda_y(\theta).\frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}.\lambda_z(\theta).\frac{\partial \theta}{\partial z} = c(\theta).\rho(\theta).\frac{\partial T}{\partial t} \quad [5]$$

Une équation avec des dérivées partielles linéaires du second ordre est obtenue. Elle n'a de sens physique que pour des conditions définies, appliquées à un domaine d'espace-temps également défini. Il est donc primordial de connaître la répartition initiale des températures en tout point du milieu ainsi que la variation des actions thermiques de ce milieu.

Il est donc nécessaire de prendre en considération des conditions aux limites qui sont de deux types : les transferts par convection et ceux par rayonnement.

3.2. Les conditions initiales aux limites

3.2.1. Le transfert par convection

Lors de nos études numériques, seule la quantité de chaleur entre le fluide (feu) et la paroi solide du bois est étudiée. Le transfert convectif suppose la présence d'un milieu matériel. L'étude thermique du matériau bois permet d'affirmer que la convection est bien présente lors de l'échauffement du bois. Il se produit un transfert de matière dans un fluide initialement, ou maintenu, hors équilibre. Le flux thermique convectif noté φ est donc défini comme une chaleur transférée par unité de temps et de surface qui peut dans de nombreux cas être décrit par la loi de Newton :

$$\varphi = h(\theta_p - \theta_f) \quad [6]$$

Avec h : Coefficient d'échange par convection ;
θ_p : Température de surface de la paroi ;
θ_f : Température du fluide (gaz) qui entoure le corps solide.

La convection s'applique à chaque cellule (figure 18).

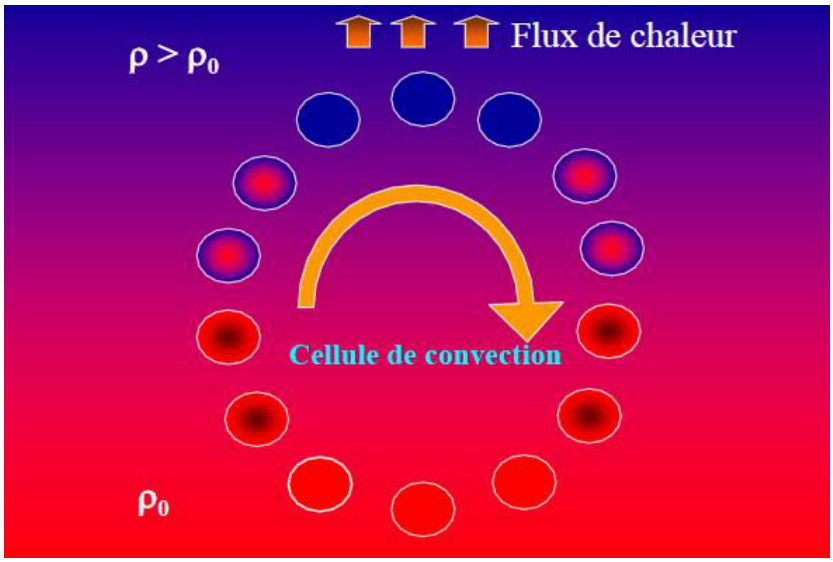


Figure 18 _ Modélisation de l'effet de convection sur une particule chaude

Le phénomène que nous étudions s'apparente à un phénomène de convection naturelle. En effet nous appliquons sur le matériau bois un gradient de température qui induit un mouvement dans le fluide. Celui-ci est dû à la variation de masse volumique résultant des différences de températures aux frontières, ainsi que par l'application de la pesanteur. Le coefficient de convection naturelle que nous allons utiliser dans nos études est celui d'un fluide de type gaz : entre 5 à 30 $W.m^{-2}.K^{-1}$. La valeur couramment utilisée pour simuler les essais conventionnels est recommandée par l'Eurocode 1 partie 1.2. Elle est fixée à 25 $W.m^{-2}.K^{-1}$.

3.2.2. Le transfert par rayonnement

Ce mode de transfert est le seul à pouvoir se propager dans le vide. Il trouve son origine dans le mouvement des charges électriques présentes dans la matière. Le spectre d'émission est continu ; plus la température est grande et plus son spectre est décalé vers des fréquences élevées.
La référence pour le rayonnement de tout matériau est le corps noir. Ce dernier est un objet censé absorber toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sans en réfléchir ni en transmettre. La lumière qui est une onde électromagnétique est absorbée dans sa totalité, de ce fait l'absorption de toutes ces couleurs devrait rendre le corps qui absorbe ces longueurs d'ondes noir, d'où son nom. Si nous prenons en compte qu'un tel corps pourrait émettre de la lumière sous l'effet d'augmentation de sa température, la qualification de corps noir ne peut être correcte puisque le corps émettrait de la lumière.
Le rayonnement purement thermique est donc appelé spectre du corps noir et ne dépend que de la température (figure 19):

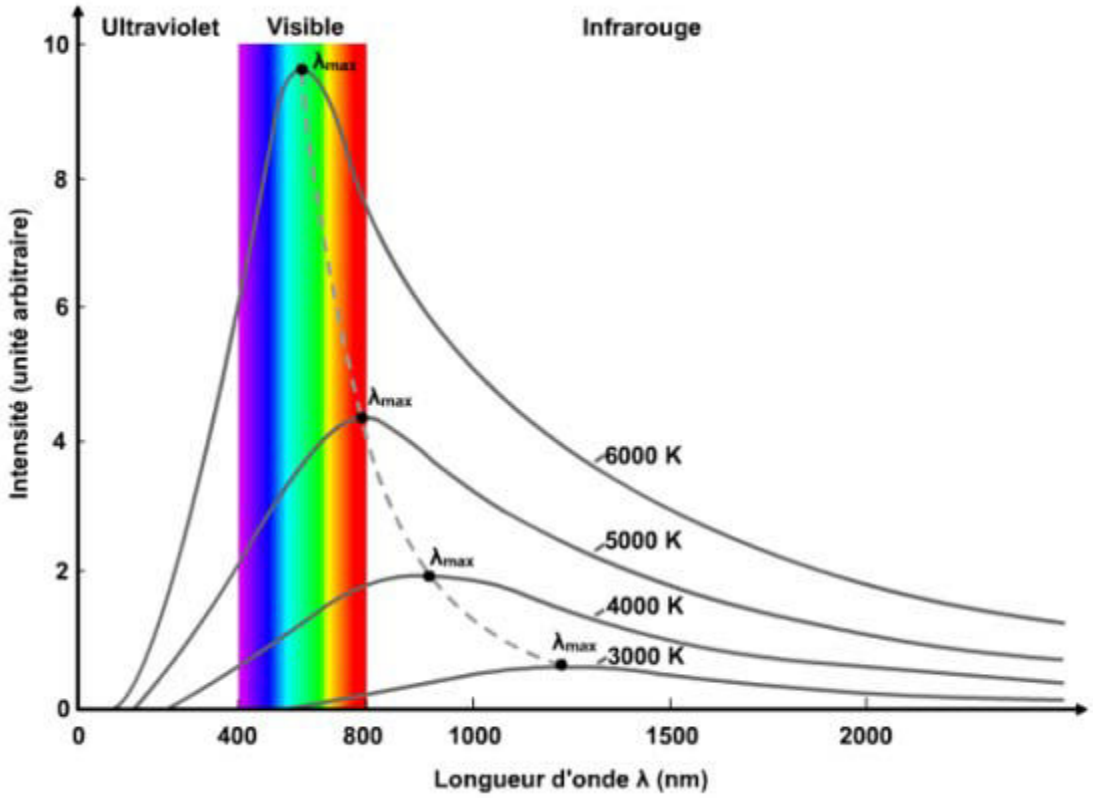


Figure 19 _ Spectre de rayonnement thermique

Notre matériau bois, de température absolue « T_p », placé dans une enceinte à la température «T_f », recevoit par rayonnement un flux net dont la densité est donnée par la relation suivante :

$$\varphi_s^t = \varepsilon_{eff}.\sigma.[(T_p^t)^4 - (T_f^t)^4] \quad [7]$$

Dans l'équation [7] apparait l'émissivité du solide. Ce paramètre dépend de la nature physico-chimique du matériau, de l'état de surface et varie avec la longueur d'onde, la direction d'émission et la température de surface. L'émissivité pour tout corps noir est égale à 1. Dans notre optique d'étude de la résistance au feu des structures bois, l'émissivité est liée aux propriétés radiatives du bois et à son positionnement dans l'enceinte chauffante.

Pour nos différentes simulations l'émissivité a été admise à 0,8. Il est cependant possible de la calculer d'après l'équation suivante :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_p}+\frac{1}{\varepsilon_f}-1} \quad [8]$$

Avec ε_p l'émissivité du bois considéré comme un corps noir

ε_f l'émissivité de l'enceinte chauffante mesurée lors des expériences

La superposition des deux conditions de surface est ainsi possible afin de déterminer la densité du flux thermique :

$$\varphi_s^t = h.\left(\theta_p^t - \theta_f^t\right) + \varepsilon.\sigma.\left[\left(\theta_p^t\right)^4 - \left(\theta_f^t\right)^4\right] \quad [9]$$

Pour l'homogénéité des résultats les températures sont données en Kelvin. L'action thermique engendrée par les gaz chauds du four évolue selon la courbe normalisée ISO R834.

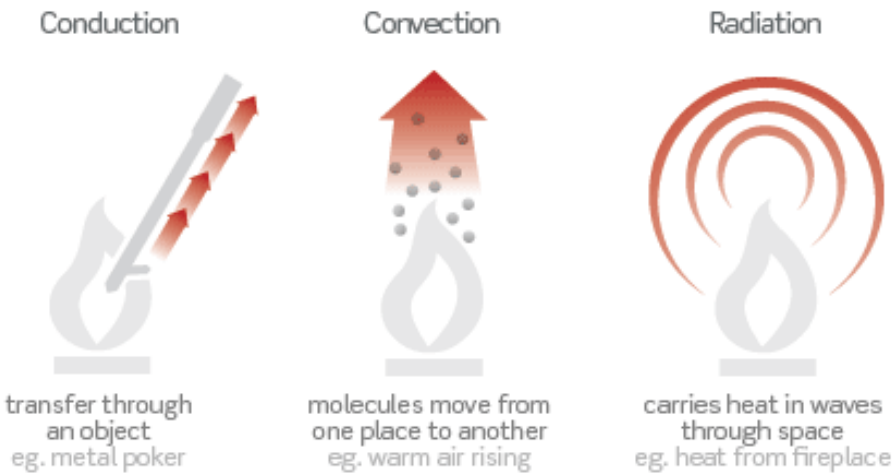


Figure 20 _ Apparition des différents mécanismes lors de l'échauffement

- PARTIE 4 - COMPORTEMENT THERMIQUE

Pour la présentation de ces essais, seul le comportement thermique est étudié. De ce fait nous ne prenons pas en compte les paramètres mécaniques du matériau bois. Pour cette partie nous nous référons aux thèses de : A.MENIS, W.P.LANE, et B.H.JONES quant à l'exploitation des essais et des résultats expérimentaux.

1. PRESENTATION DES ESSAIS

1.1. Poutres LVL testées dans un four sur mesure

Trois expériences d'exposition au feu réalisées sur des éléments de LVL en pin radiata non chargés ont été réalisées au laboratoire d'ingénierie du feu de l'université de Canterbury, Christchurch de Nouvelle-Zélande par la doctorante A.MENIS. [2008]. Le but étant d'observer la répartition de température au sein de la section, l'échantillon est exposé au feu sur ses quatre faces.

Ces essais sont effectués dans un petit four sur mesure constitué d'un cylindre de diamètre et de longueur 500 mm dont l'armature est composée principalement d'acier (figure 22). L'ouverture carrée de section 180*180mm est recouverte par deux plaques d'acier inoxydable d'épaisseurs respectives 0,9 et 2 mm séparées par 100 mm d'isolant minéral Kaowool. L'enceinte est chauffée par trois bobines de chauffage en spirale fixées à l'intérieur du cylindre. Des mesures sont effectuées grâce à trois thermocouples afin de déterminer la température moyenne à l'intérieur du four (figure 21).

Figure 22 _ Four sur mesure

Figure 21 _ Intérieur du four

Afin de respecter les dimensions du four, les échantillons ont une section de 146×60×1000 mm comprenant pour chacun d'entre eux 15 thermocouples positionnés parallèlement au fil du bois (figure 23). La section est réalisée en collant quatre sections de 73×30×1000 mm, ce qui permet de protéger les thermocouples du contact direct avec le feu, et d'étudier le front de température dans le matériau. La colle utilisée pour la fixation des 4 échantillons est une résine phénol-formaldéhyde. Cette dernière est utilisée pour la création des poutres donc elle ne modifie pas les propriétés thermiques de l'élément d'origine. Nous notons qu'aucune étude n'a été effectuée pour savoir si la résine modifie ou non le gradient de température dans le bois.

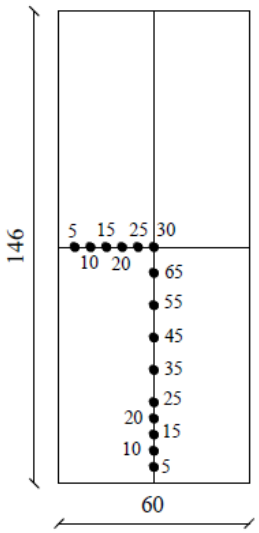


Figure 23 _ Emplacement des thermocouples

La température dans le four ne suit pas l'ISO 834 pour ne pas endommager les parois intérieures de ce dernier (figure 24).

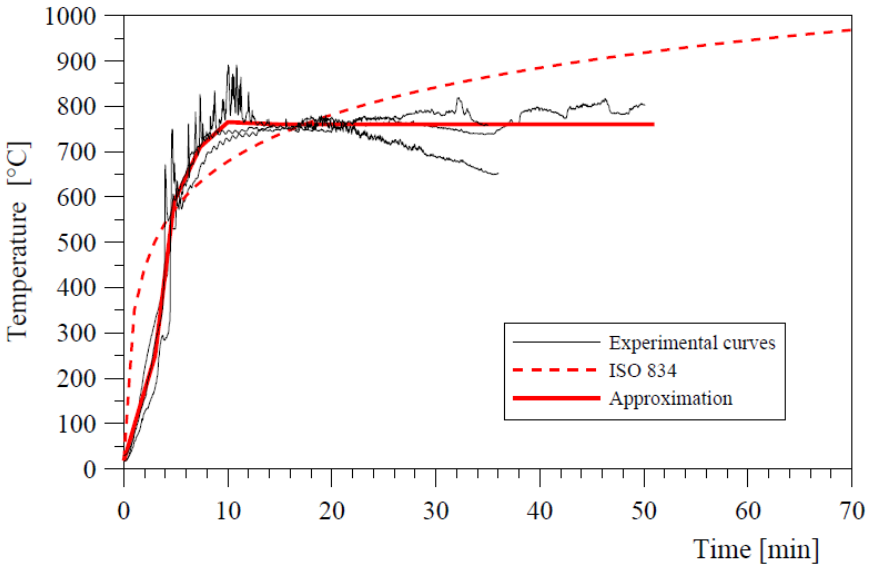


Figure 24 _ Evolution de la température dans le four pendant le test

1.2. Poutres LVL testées dans un four pilote

Des analyses thermiques ont été réalisées afin de simuler des essais au feu sur des éprouvettes de poutre LVL. Chacune des poutres a été testée dans le four pilote du centre de recherche sur l'incendie Branz en nouvelle Zélande lors de la thèse de W.P.LANE [2005]. Deux sections différentes ont été testées : une section A (300×105mm) et une section B (360×133mm). Le champ supérieur des poutres a été protégé par deux panneaux de plaque de plâtre afin de s'approcher au maximum d'un cas provenant de la réalité dans le bâtiment. On peut apparenter ce test à un essai d'exposition au feu sur une solive de plafond apparente.

Figure 26 _ Poutre en LVL après 1 heure 00 minutes et 27 secondes d'allumage

Figure 25 _ Poutre en LVL après 1 heure 23 minutes et 20 secondes d'allumage

Ces essais ont été vérifiés numériquement par A.MENIS [2012] par la modélisation des sections issue d'un modèle d'éléments finis avec le logiciel Abaqus. Les propriétés utilisées pour les poutres en LVL sont les mêmes que celles présentées lors de l'essai précédent (1.1). Il est spécifié dans la thèse de la doctorante que les caractéristiques des deux plaques de plâtre ont été modélisées d'après les propriétés thermophysiques proposées par B.H.JONES [2001].

La thèse réalisée par le doctorant Jones a pour objectif de démontrer la performance des assemblages de plaques de plâtre en présence de feu de longue durée simulée selon la courbe de feu standard ISO 834. Après des essais et des validations par le logiciel d'étude aux éléments finis SAFIR des tableaux de variation de densité, chaleur spécifique, et conductivité ont été présentés pour conclure ces études. Nous les avons insérés en annexe afin de faciliter l'accès à ces données.

La température utilisée en entrée pour la simulation est la courbe ISO 834. Les sections ont été soumises à deux conditions d'exposition, une exposition double face près de l'angle de la coupe ainsi qu'une exposition simple face.

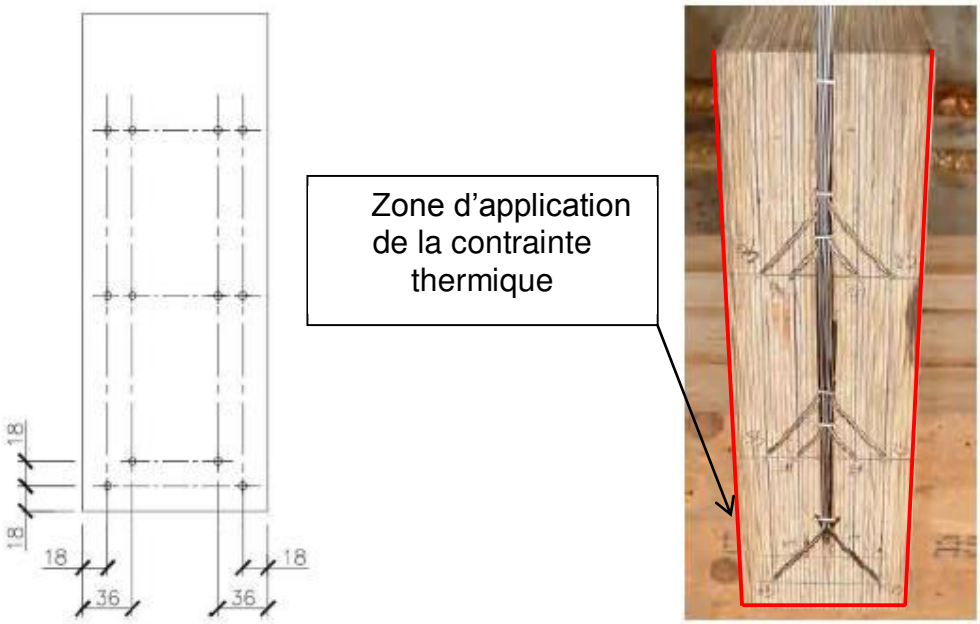


Figure 27 _ Mise en place des thermocouples pour la prise de mesure des températures en exposition simple et double face

2. MODELISATION NUMERIQUE

2.1. Présentation du modèle

Les analyses numériques ont été réalisées à l'aide de modèles à deux dimensions. La dimension du modèle a été choisie pour suivre le même chemin de réflexion que la doctorante A.MENIS. En dimension 2D les modèles sont plus aisés à représenter sur Abaqus. Les études thermiques que nous avons réalisées prennent en compte chaque facteur de combustion du bois. Ces phénomènes étant complexes à modéliser, il est préférable de rester sur des études en 2D. Le type d'élément choisi pour l'analyse thermique est l'élément de la bibliothèque Abaqus « DC2D4 ».

Chacun des modèles réalisés possèdent plusieurs symétries, ce qui nous permet de diminuer les sections à étudier et ainsi alléger les temps de calculs. Nous avons donc modélisé seulement un quart de la section pour l'échantillon testé dans le four sur mesure et une moitié de la section transversale pour la poutre LVL comprenant les deux plaques de plâtre. Les maillages utilisés ont été choisis en accord avec les recherches de MENIS. Les maillages sont réalisés de manière à obtenir des valeurs de température, aux nœuds coïncidant avec l'emplacement des thermocouples, comparables avec les valeurs relevées de l'expérience.

Le maillage a été créé uniformément avec des éléments de taille 2.5×2.5mm pour le quart de section exposé au feu dans le four sur mesure (figure 28).

La moitié de section pour la poutre LVL dans le four pilote a été divisée en éléments de différentes tailles en modélisant un maillage dense dans les parties les plus exposées au feu. Ces parties se situent à proximité des bords où les flux de chaleur provenant de deux côtés augmentent l'effet de la température sur le matériau. Nous avons de plus divisé la poutre LVL selon nos besoins afin de récupérer la température aux nœuds à 18 et 36 mm.

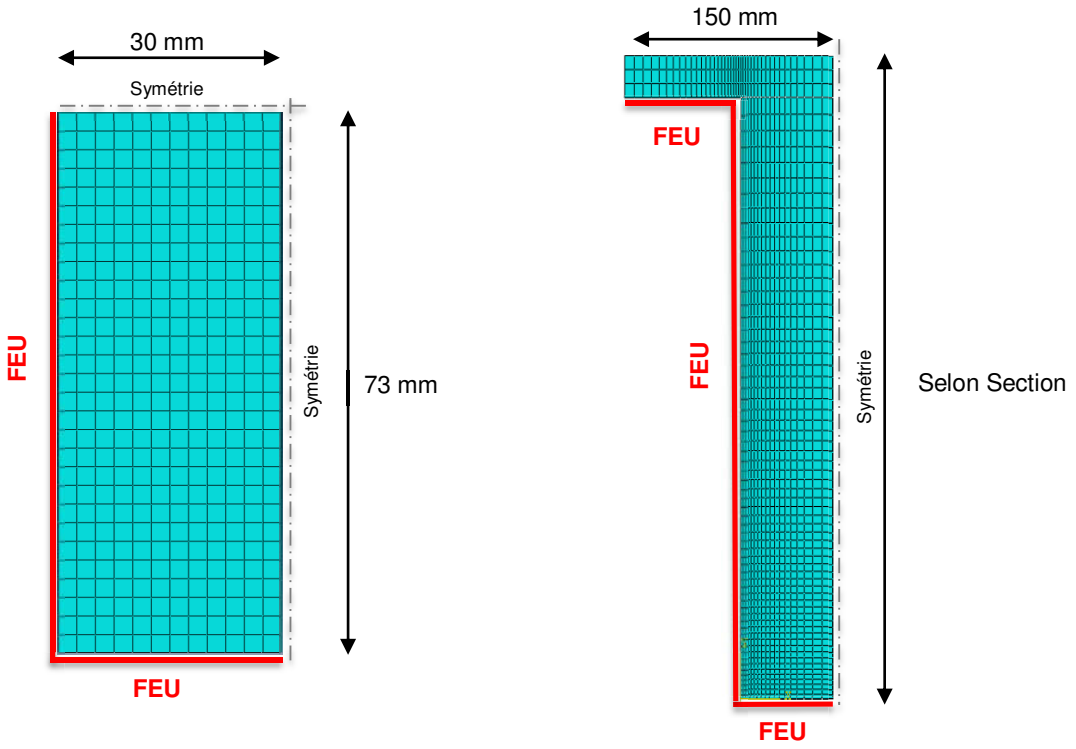


Figure 28 _ Model 2D de la section d'un échantillon LVL

2.2. Paramétrages des essais

L'exposition au feu a été modélisée en utilisant la température enregistrée dans le four. Nous avons pris en compte les conditions aux limites de rayonnement et de convection en insérant dans la fonction « interactions » d'Abaqus l'émissivité ε et le coefficient de convection h sur les faces exposées au feu (figure 28). Le bois est un matériau anisotrope dont la conductivité, la densité, et la chaleur spécifique dépendent de la température. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces variations de facteur dans le logiciel. Abaqus permet à l'utilisateur de mettre en œuvre une variation de ces quantités en fonction de la température. Il faut toutefois que la variation de température soit linéaire pour intégrer ces variables.

Les paramètres de chaleurs spécifique, conductivité, et densité ont été intégrés dans les annexes afin de pouvoir reproduire les modélisations. Les propriétés thermiques sont proches suivant la direction radiale et tangentiel de ce fait nos modèles intègrent les propriétés d'un matériau isotrope.

La variation de la chaleur spécifique n'a pas pu être totalement intégrée dans nos modèles. La variation des valeurs est telle que le logiciel ne peut converger vers une valeur (erreur de calcul induit). Nous avons donc dû en approximer une partie afin d'être en mesure de l'insérer (figure 29).

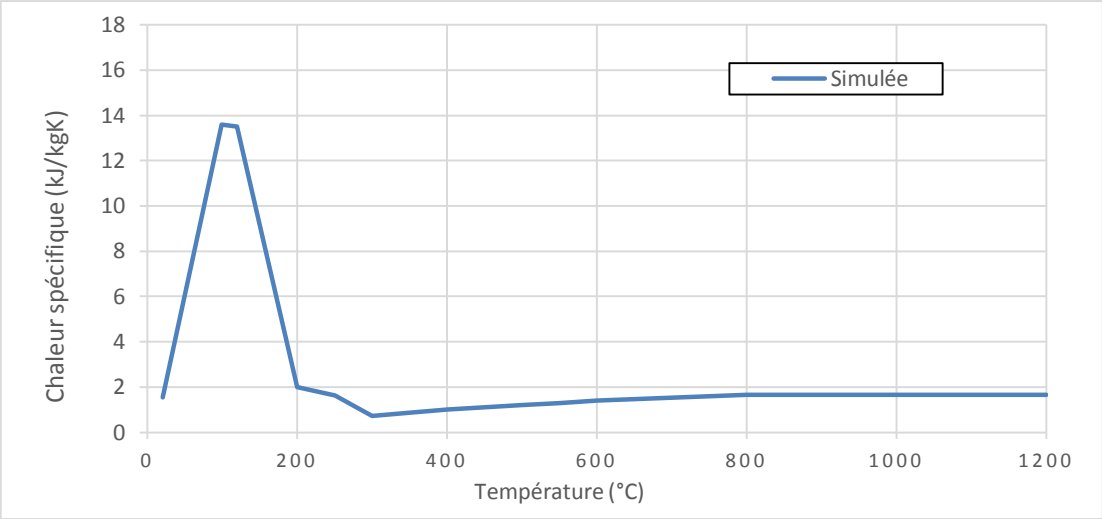


Figure 29 _ Chaleur spécifique prise en compte dans le modèle

Les résultats expérimentaux réalisés lors de la thèse permettent d'admettre que la teneur en humidité et la densité ont une influence significative sur le taux de carbonisation. La distribution de température est donc aussi directement affectée à l'intérieur de la section de bois. La prise en compte de la teneur en humidité de 12% de chaque échantillon de LVL est donc indispensable dans nos modèles.

Nous prenons pour valeur de masse volumique, celle à température ambiante qui est de 570 kg/m³. Dans notre interprétation nous avons estimés qu'à la température ambiante la masse volumique du bois est de 570 kg/m³ ce qui équivaut au ratio de « $1+\omega$ ». Le coefficient ω définit la teneur en humidité du matériau bois. A la température de 120°C l'humidité contenue dans le bois est totalement dissipée, il nous faut donc diminuer de 120 kg/m³ la masse volumique du bois. Le reste des valeurs est une simple application de ratio qui est à multiplier par la masse volumique anhydre de 450 kg/m³. Nous obtenons ainsi la courbe suivante :

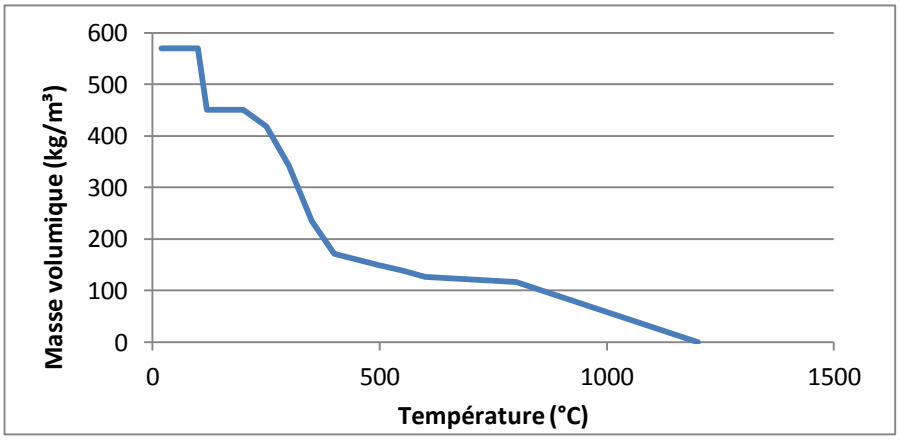


Figure 30 _ Evolution de la masse volumique du bois exposé au feu

3. ETUDE DES SIMULATIONS

3.1. Résultats numériques

3.1.1. Elément de LVL testé dans le four sur mesure

Grâce à la simulation sur le logiciel Abaqus, l'évolution de la température peut être observée en détail dans la section et tout au long de l'exposition au feu. De plus, suivant la sensibilité de l'incrémentation et du maillage choisi, nous pouvons affiner nos résultats. La température d'entrée implémentée dans le modèle est linéaire en deux parties (figure 33) pour éviter de forcer la répartition de la température dans le matériau bois. En effet ce sont les propriétés thermiques qui régissent le comportement interne de ce dernier.

L'évolution dans la section résiduelle peut être observée en étudiant le mouvement de la courbe d'isotherme à 300°C. Celle-ci représente la frontière entre le bois carbonisé et le bois qui ne l'est pas. La figure 31 visualise la progression de la carbonisation dans la section à différents temps d'exposition au feu. La couleur rouge représente l'isotherme à 300°C, le vert, les couches de pyrolyse (bois dégradé) tandis que le bleu correspond au bois encore non atteint (proche de la température ambiante).

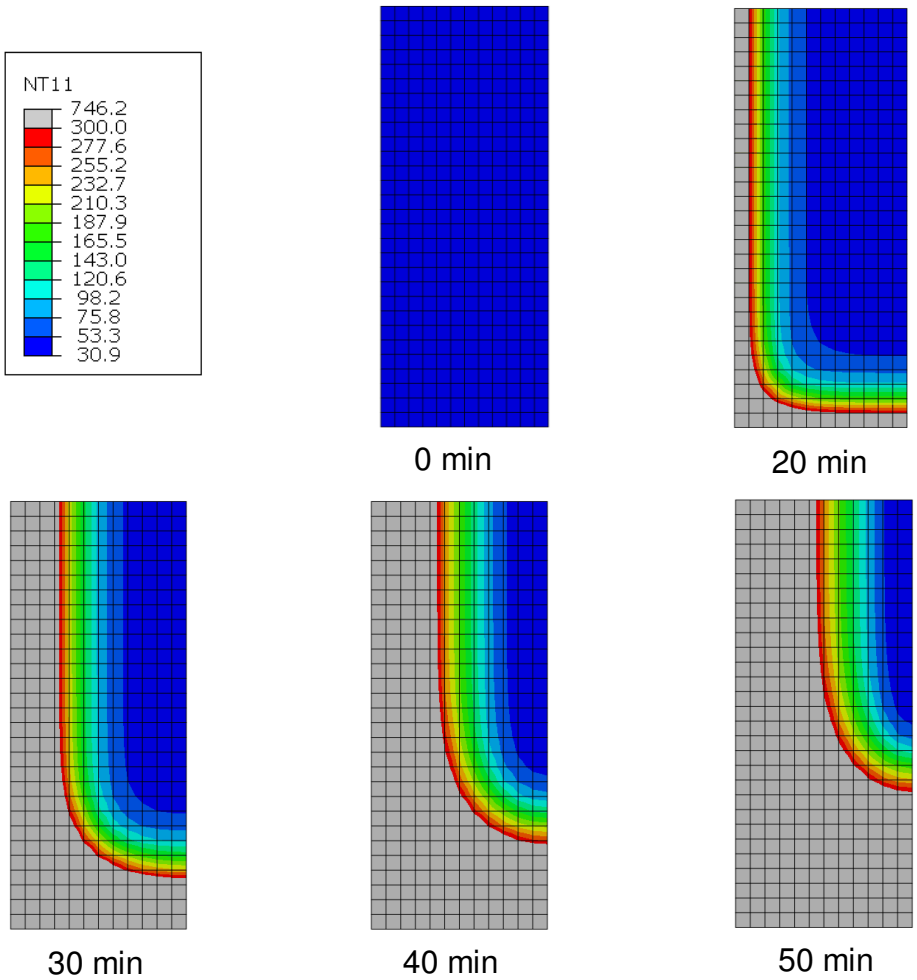


Figure 31 _ Graphique d'évolution de la section résiduelle à différents temps d'exposition (température en degrés Celsius)

Bien que nous considérons pour le modèle un matériau isotrope, la propagation de la température dans le matériau est plus rapide dans la direction verticale que dans la direction horizontale. D'autre part, la différence de profondeur de carbonisation entre 50 et 20 min est facilement mesurable sur le logiciel et vaut 20 mm. Cette profondeur permet de calculer une vitesse de combustion moyenne approximative de 20÷30 = 0,67 mm/min. Cette valeur est proche de la vitesse théorique de carbonisation du LVL (partie 3) et donnée par l'Eurocode 5.

Après 50 min, la section est réduite de trois quarts en largeur et de plus de la moitié dans la hauteur (figure 32). Ainsi l'élément a grandement perdu de sa resistance mécanique, c'est pourquoi il n'est pas pertinent de chercher à représenter l'évolution de la température pour de trop grandes profondeurs. Nous observons donc l'évolution de la température entre la surface et une profondeur de 30 à 35 mm.

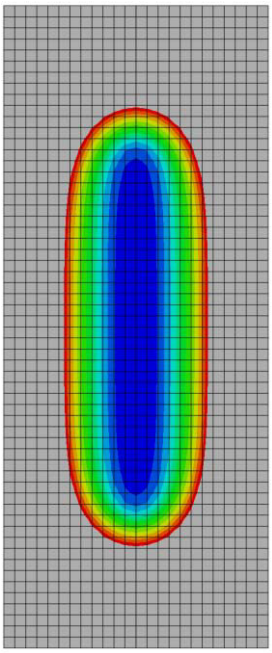


Figure 32 _ Section résiduelle de l'élément à 50 min d'exposition

La figure 33 donne l'évolution de la température à différentes profondeurs de la section dans les directions horizontale et verticale au niveau de l'emplacement des thermocouples.

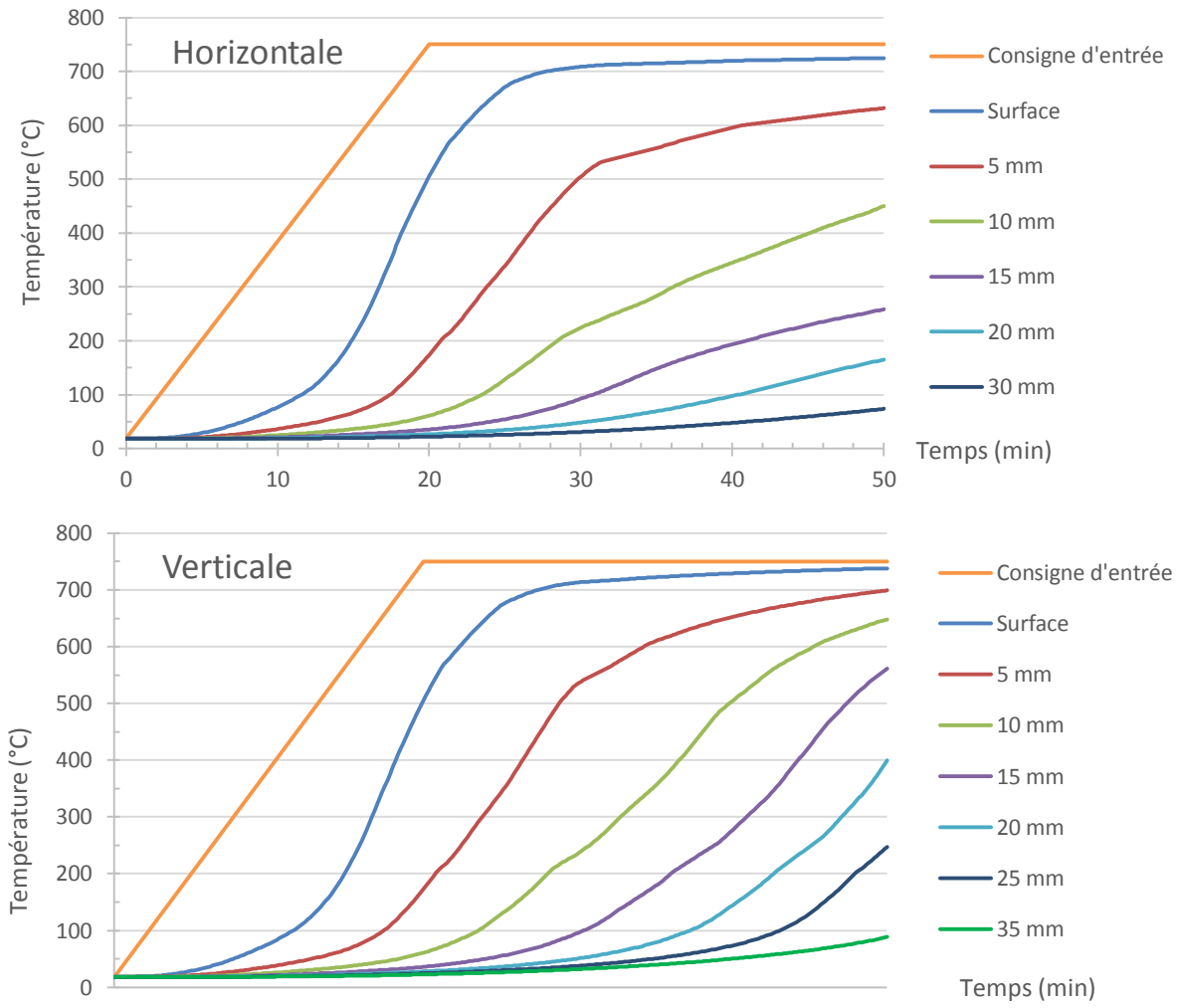


Figure 33 _ Distribution de température dans la direction horizontale et verticale dans la section

Ces courbes montrent une augmentation de température accrue après 100°C, après que l'eau se soit évaporée. La courbe représentant la consigne d'entrée est une rampe qui permet d'atteindre la valeur de 750°C (sans problème de calcul). Cette consigne est lissée automatiquement par le logiciel afin d'obtenir une réponse qui converge vers une solution.

L'hypothèse d'isotropie est faite lors de l'intégration des propriétés, cependant nous remarquons que la distribution de température est différente selon la direction radiale et tangentielle. En effet, à 20 mm de profondeur, la température est de 170°C dans la direction horizontale et de 400°C dans la direction verticale. La différence de la section pourrait en être la cause, d'autant plus que nous savons que le bois se dégrade plus rapidement suivant la longueur la plus faible (largeur de la section).

3.1.1. Assemblage LVL et plaque de plâtre

A. Double exposition

Nous avons été incapables d'insérer la variation de densité, de chaleur spécifique, et de conduction pour les deux plaques de plâtre. Il nous a donc été nécessaire d'insérer dans la simulation, des valeurs fixes afin de pouvoir modéliser l'avancée du front de température. Les caractéristiques de la poutre LVL quant à elle, restent inchangées. On peut remarquer que la plaque de plâtre est un frein à la progression de la chaleur, ce qui en fait un très bon atout dans les constructions. Il faudra toutefois faire attention de ne pas laisser une lame d'air non isolée derrière un parement sous peine d'engendrer un effet cheminée qui aggraverait la situation de feu.

Afin de faciliter la modélisation, les deux plaques de plâtres ont été modélisées en une seule section. On note qu'il a été nécessaire de créer un lien entre les deux plaques de plâtre et la poutre afin d'avoir une continuité thermique.

La figure 34 montre la section résiduelle de l'ensemble poutre LVL – plaque de plâtre. Le code couleur reste inchangé par rapport au modèle précédent.

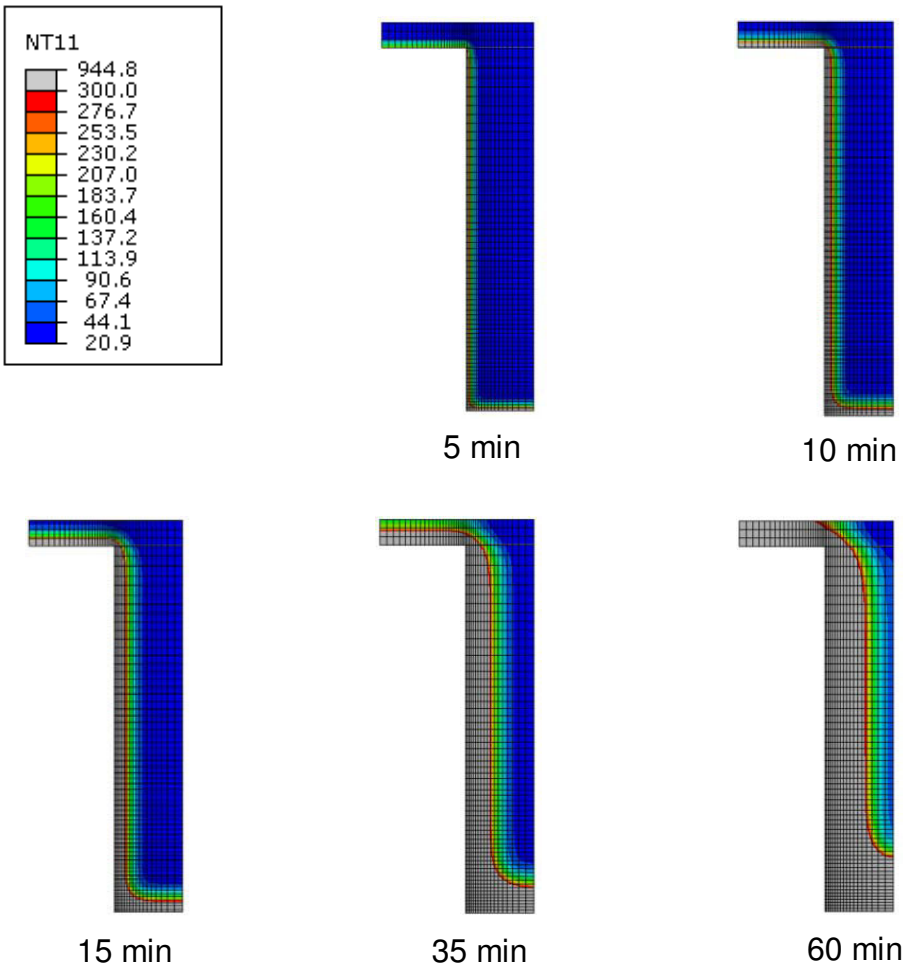


Figure 34 _ Evolution de la section résiduelle pour la Section B

De par notre simulation, nous pouvons comparer nos résultats à ceux de l'expérience et la modélisation réalisée par la doctorante A.MENIS (figure 35). La ligne noir en pointillés indique la taille de la section transversale avant l'essai, la ligne rouge quant à elle représente l'isotherme à 300°C ce qui correspond à la section résiduelle à la fin des 60 minutes d'exposition.

Nous pouvons remarquer que le cas le plus dimensionnant est celui que nous avons simulé sur Abaqus. Notre étude attaque plus en profondeur le LVL, ce phénomène de carbonisation avancée peut s'expliquer par le fait que nous n'avons pas réussi à rentrer les valeurs exactes de chaleur spécifique à 99 et 120°C qui doivent être respectivement égales à 1360 et 1350 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Nous n'avons cependant réussi qu'à renseigner pour ces deux valeurs 5000 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. En effet le logiciel ne parvient pas à converger vers un résultat avec notre modélisation.

On peut cependant admettre que notre simulation est cohérente au regard de l'avancée expérimentale de la température dans le matériau. De plus le résultat final, malgré un état de carbonisation avancée, représente une section saine pour le LVL en comparaison à l'expérience.

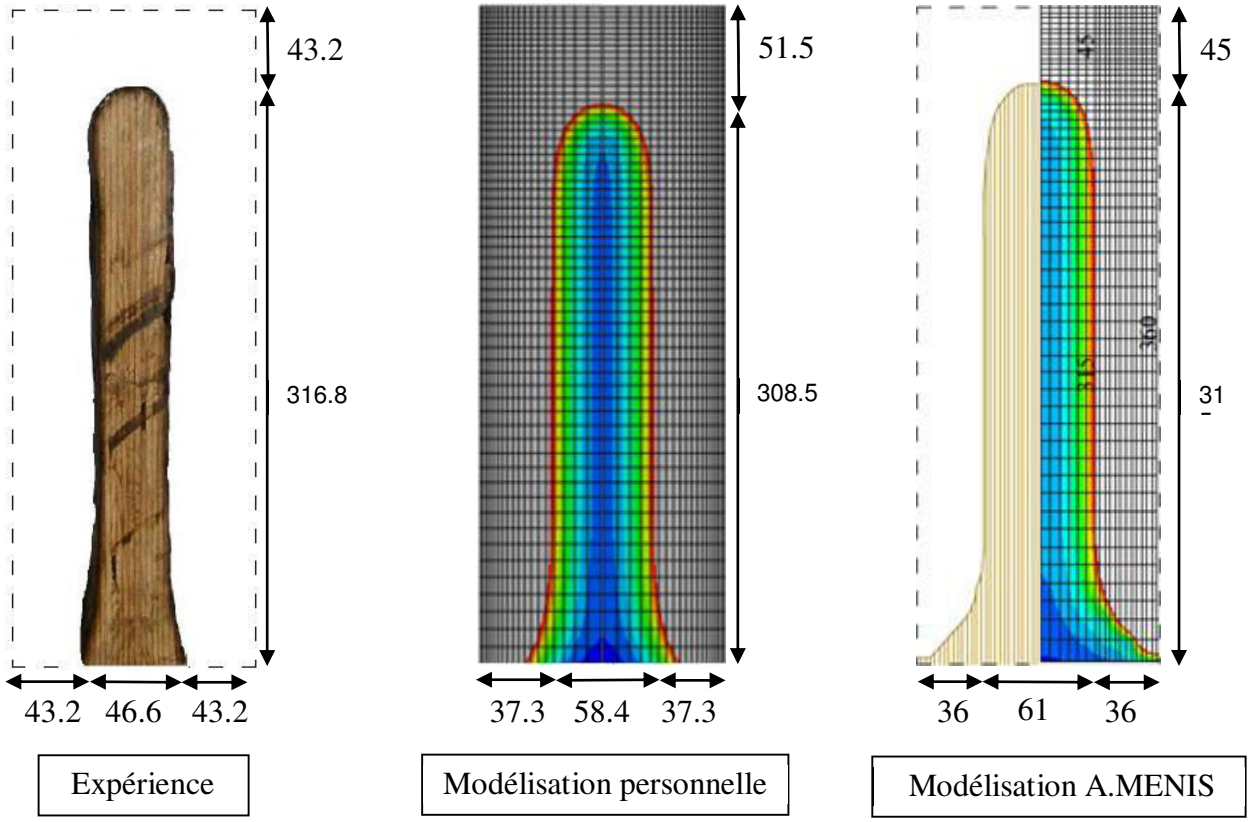


Figure 35 _ Comparaison des différents modèles après 60 minutes d'exposition (dimensions en millimètre)

Si nous étudions la propagation de température dans la poutre LVL soumise à un feu simulé selon l'ISO 834 nous pouvons une nouvelle fois remarquer que l'isotropie du matériau n'est pas respectée. La carbonisation est plus rapide selon la direction verticale que la direction horizontale.

La courbe de température à la surface conserve bien la forme de l'amplitude de l'ISO 834 insérée dans la simulation. Si l'on s'attarde sur la courbe de température à 18 mm on peut voir la difficulté qu'a le matériau bois à s'élever en température avant l'évaporation totale des 12% d'eau. L'élévation en température après ce phénomène s'accroit fortement et cherche à atteindre la température de l'ISO 834.

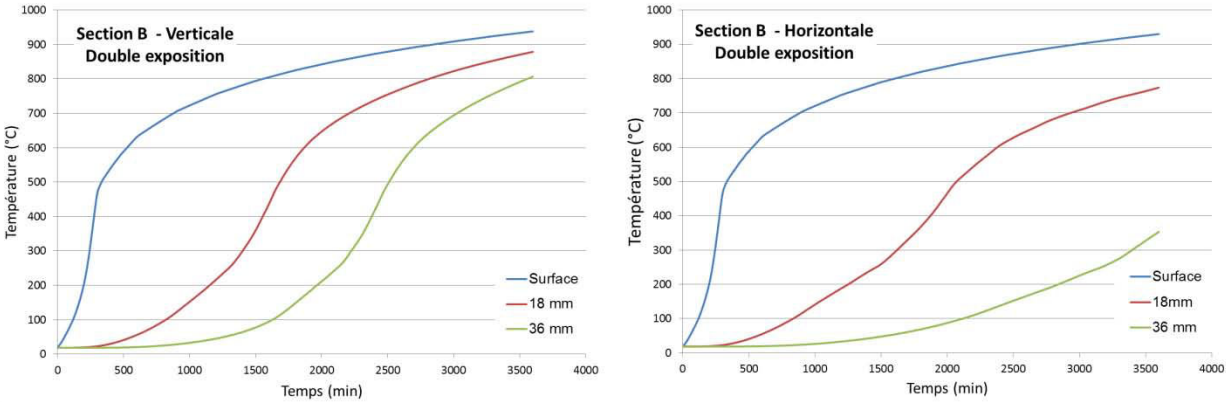
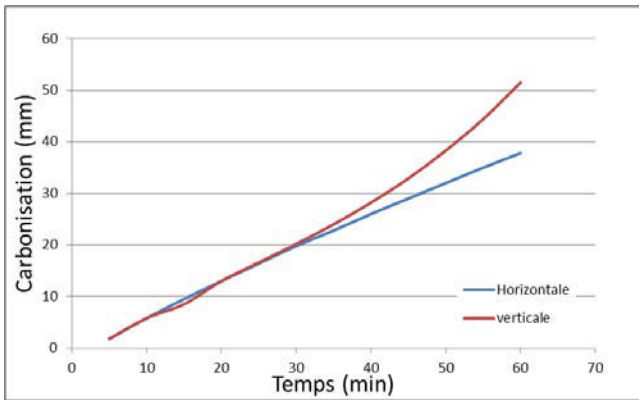


Figure 36 _ Distribution de température dans la section de LVL

L'hypothèse d'isotropie du matériau bois n'est pas respectée par le logiciel Abaqus car nous constate une différence de progression de la carbonisation suivant les axes horizontal et vertical de notre section. Nous avons respectivement comme valeur de couche carbonisée pour les directions horizontale et verticale 37,8 mm et 51,5 mm après 60 minutes d'exposition. La figure 37 donne l'évolution de la carbonisation en fonction de la direction. Ce qui nous donne une vitesse moyenne de carbonisation pour chacune des directions de 0,63 mm/min et 0,86 mm/min respectivement horizontale et verticale. Si nous comparons nos résultats à la vitesse unidirectionnelle du LVL qui est définie pour une masse volumique supérieure à 480 kg/m³ dans la norme EN 1995-1-2, nos résultats sont cohérents. La norme spécifie une valeur de vitesse unidirectionnelle de 0,65 mm/min.

Nous pensons, d'après nos deux études, que l'hypothèse d'isotropie du matériau n'est pas respectée. Ainsi seule la vitesse en direction horizontale permet de valider le modèle selon la valeur admise dans l'Eurocode 5. Ceci permet de se situer en sécurité pour les calculs de vérification de carbonisation.

Figure 37 _ Vitesse de carbonisation unidirectionnelle pour la section B de LVL avec double exposition de feu



3.2. Comparaison entre modèle numérique et expériences

3.2.1. Elément de LVL seul testé en four sur mesure

Les figures 38 et 39 comparent les résultats expérimentaux et numériques respectivement dans la direction horizontale et verticale. L'expérience donne une augmentation anticipée de la température par rapport au modèle réalisé sur le logiciel Abaqus intégrant les mêmes conditions. Cependant ceci s'explique par le fait que la température de l'enceinte du four augmente rapidement car elle atteint 750°C en 10 min, ce qu'il nous est impossible de représenter en linéaire dans notre modèle. Notre modèle atteint une température de 750°C en 20 min.

La courbe EC 5 correspond à l'évolution de la température pour le modèle simulé utilisant, à la différence de notre modèle, des propriétés de conductivité données dans l'Eurocode 5.

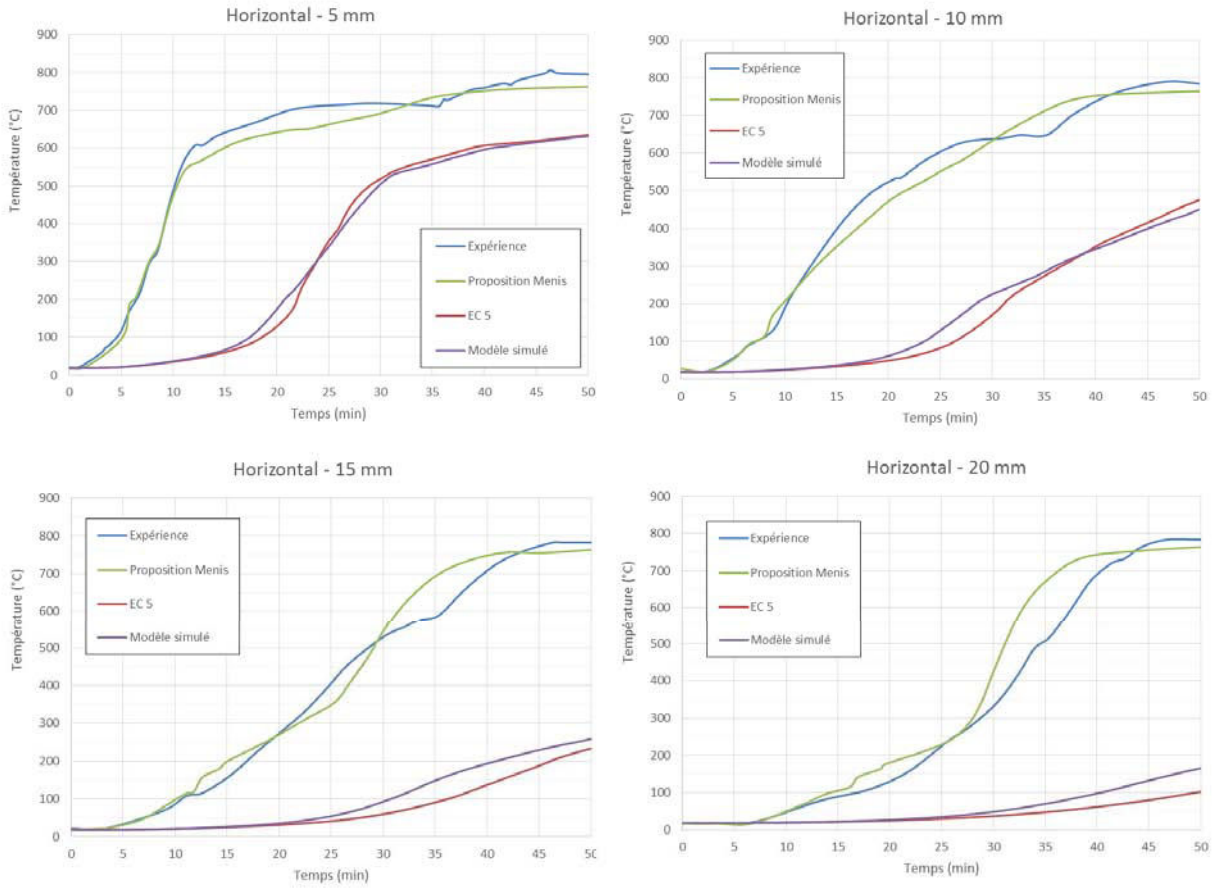


Figure 38 _ Graphiques de comparaison entre résultats expérimentaux et numériques dans la direction horizontale à différentes profondeurs : 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm

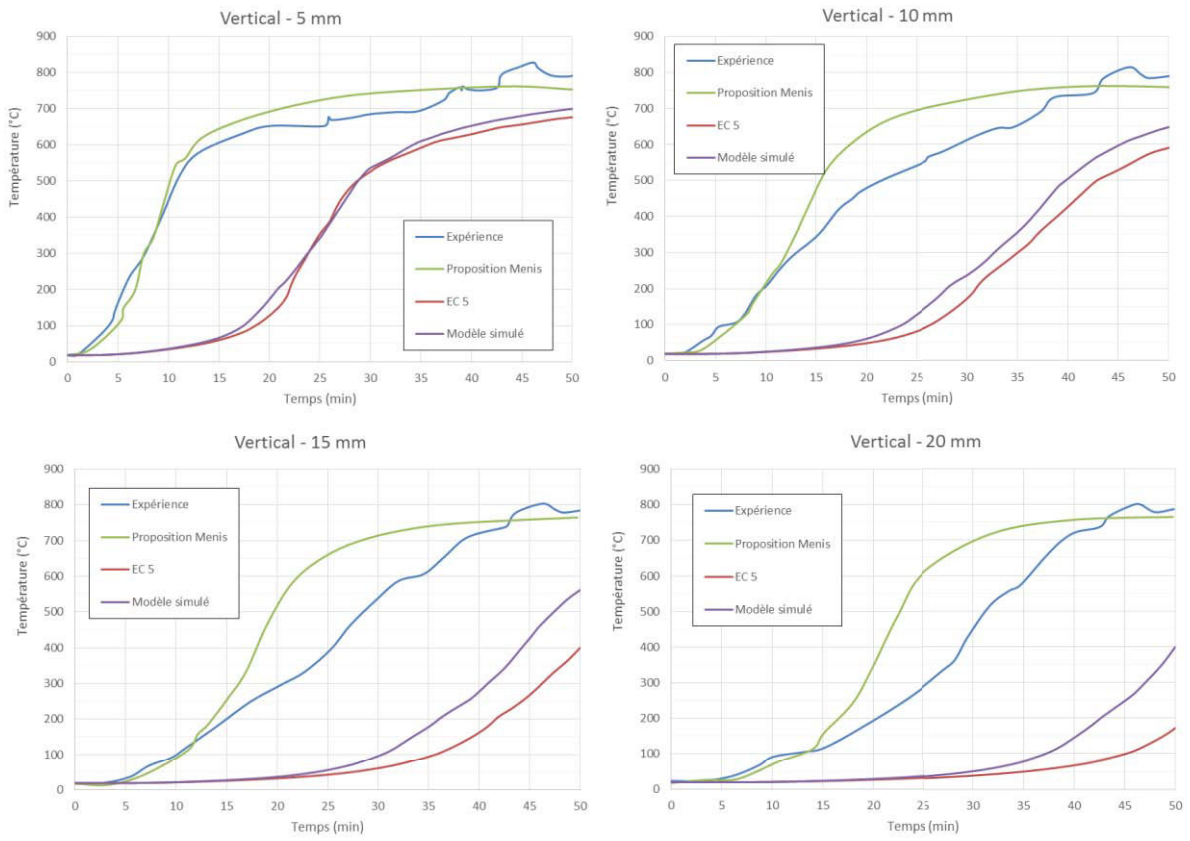


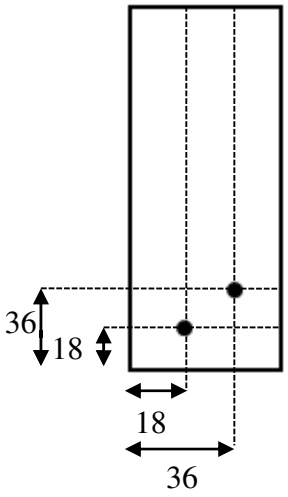
Figure 39 _ Graphiques de comparaison entre résultats expérimentaux et numériques dans la direction verticale à différentes profondeurs : 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm

Le modèle simulé, réalisé par A.MENIS et prenant en compte une température d'exposition du bois relevée dans le four, force le comportement du bois. En effet, à chaque incrément de temps, le logiciel expose le modèle à une température qui lui a été imposée. Ainsi il ne prend pas totalement en compte la variabilité de la chaleur spécifique, conductivité et densité en fonction de la température.

Notre modèle intègre donc des portions de courbe linéaires pour l'évolution de la température d'exposition dans le but d'observer l'évolution de la température dans la section due à la variation des propriétés thermiques.

D'autre part, les courbes d'évolution de la température du modèle en fonction du temps et de la profondeur sont de la même forme que les courbes de températures issues de l'expérience. Par conséquent notre modèle peut être validé.

3.2.2. Poutre en LVL dans le four pilote



Les figures 38 et 39 affichent les courbes de comparaisons expérimentales pour les sections A et B. Souhaitant obtenir les mêmes résultats que l'étude expérimentale nous avons modifié notre maillage afin d'obtenir des nœuds à 18 et 36 mm correspondant à l'emplacement des thermocouples dans les sections. Nous avons simulés pour chacune des sections un cas d'exposition simple et un cas d'exposition double afin d'étudier les différences lors de la carbonisation.

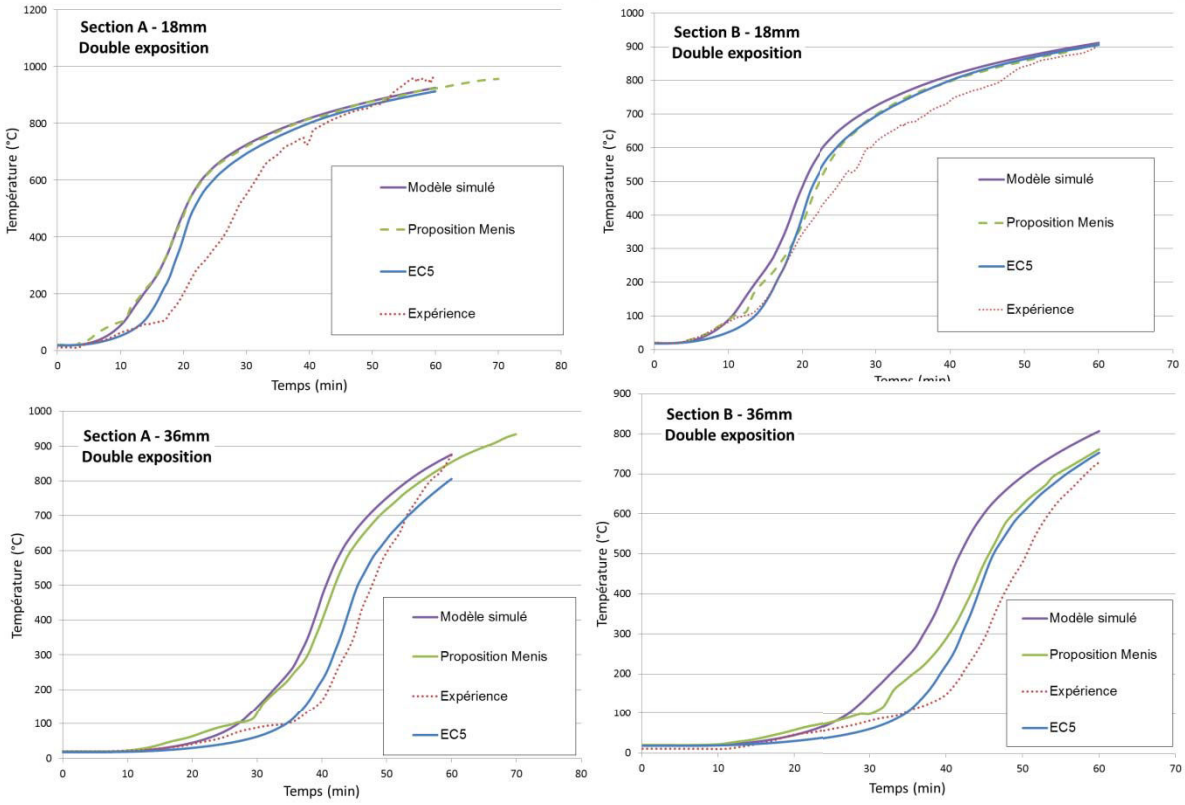


Figure 40 _ Comparaison des résultats pour la section A et B suite à une double exposition de feu

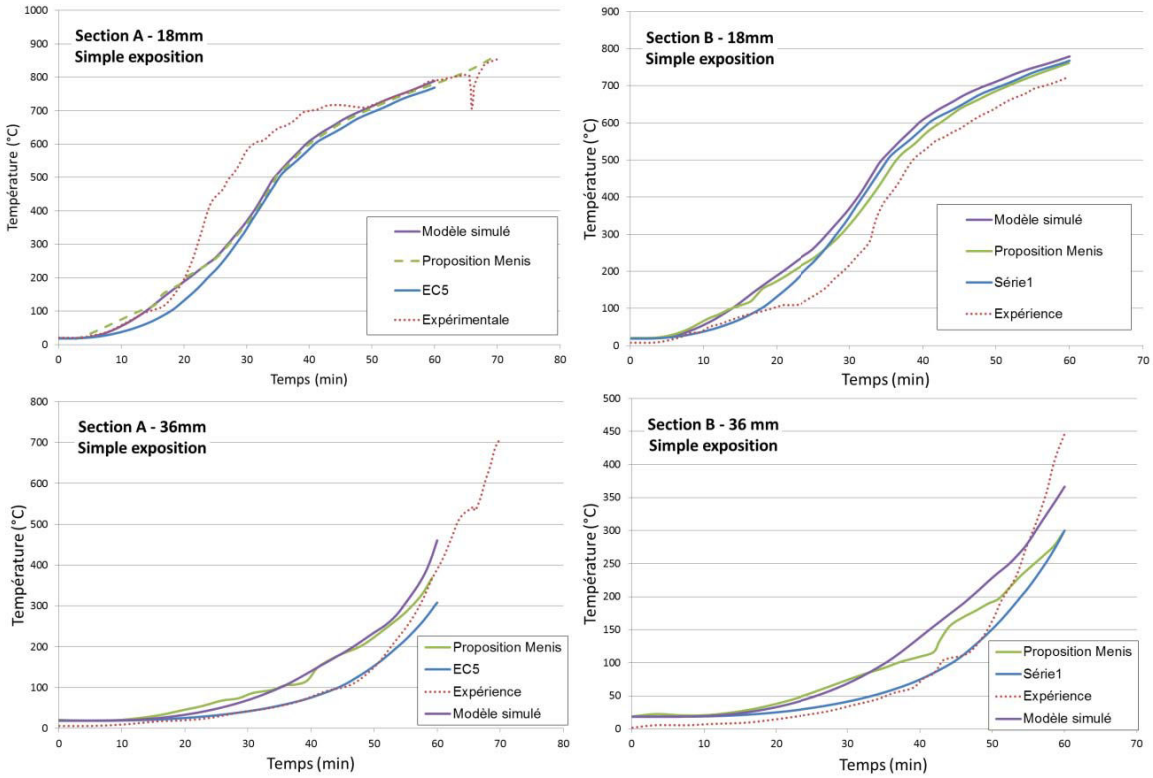


Figure 41 _ Comparaison des résultats pour la section A et B suite à une simple exposition de feu

En comparaison à notre modélisation, une des expériences réalisées lors des essais au feu a été tracée. Une moyenne des différents essais aurais dû être modélisée afin de connaître la tendance qu'on les poutres de LVL à carboniser. Nous pouvons voir que, sur certaines courbes comme la modélisation de la température pour la section A en exposition simple, le choix de la courbe expérimentale ne représente qu'un seul essai de ceux réalisés par A.MENIS.

Nous ne comparons donc pas nos résultats aux expériences. Nous n'avons de plus pas pu confronter nos résultats à des essais expérimentaux, ceux-ci ne pouvant être réalisés dans l'enceinte de l'ENSTIB. Ayant cependant pris les valeurs les plus sécuritaires pour les caractéristiques du LVL, nous sommes censés obtenir des courbes au-dessus de chacune des courbes aux Eurocode. Les propriétés sont sélectionnées parmi les résultats des Eurocode et FRANGI [2009]. FRANGI obtient parfois des caractéristiques plus défavorables pour la carbonisation du bois, ce qui permet de se trouver au-dessus de la courbe des Eurocode. Cette supposition est vérifiée puisque chacune de nos courbes à la plus forte intensité de température. Nous avons même des résultats dont la température est beaucoup plus forte que les résultats de la doctorante A.MENIS. Ceci nous laisse penser que l'impossibilité de rentrer la bonne chaleur spécifique pour les températures de 99 et 120°C est la cause de cette forte élévation en température. Nous pouvons de plus vérifier nos propos par la présence d'une forte perturbation aux alentours de 100°C sur les courbes de la doctorante : les deux pics de chaleur spécifique freinent l'avancée en température dans le matériau.

3.2.3. Réflexion sur l'ajout d'amplitude dans Abaqus

Nous avons pu observer avec notre professeur encadrant que l'ajout d'amplitude suivant une multitude de points pouvait être néfaste au bon résultat de nos modèles. Nous avons de ce fait réalisé différents modèles dans le cas de la poutre en LVL soumise à une charge de feu suivant l'ISO 834 (section B) modélisée pour le four pilote.

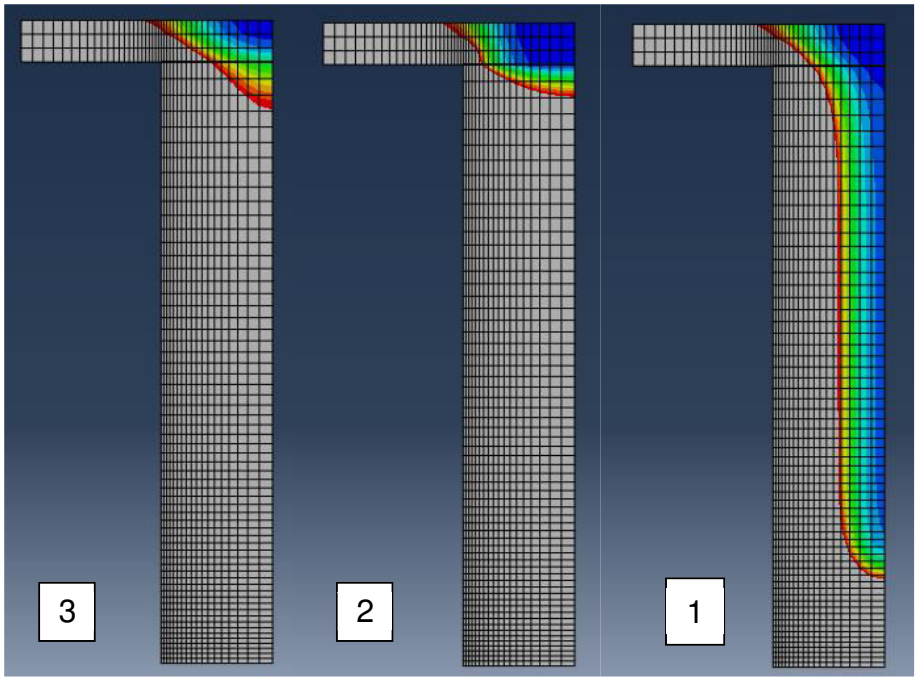


Figure 42 _ Effet de l'amplitude sur la modélisation

Chacun des modèles prend en compte, comme amplitude d'entrée, la courbe ISO 834. De ce fait une multitude de points est renseignée pour recréer cette courbe. Nous avons modélisé trois cas différents, un premier cas comprenant toutes les propriétés variable de notre LVL (densité, chaleur spécifique, et conductivité), un second cas en renseignant toutes les variables fixes et égales à 0.01, et un dernier cas en insérant comme valeur fixe pour chacune des propriétés la moyenne de ces dernières.

Nous pouvons voir qu'entre le cas 2 et le cas 3, changer les propriétés du matériau n'a pas un grand impact. Nous pouvons cependant remarquer que nous obtenons un résultat convenable pour le cas 1.

L'ajout d'une amplitude avec des points multiples force donc le modèle à converger vers un résultat de température malgré l'ajout des propriétés qui ont été admises. Le modèle calcule librement entre deux points suivant les propriétés du matériau mais nous l'obligeons par ces coordonnées à atteindre des valeurs qu'il n'aurait pas atteintes si nous avions rentré une consigne rampe de température. Ceci permet donc de laisser converger librement la solution vers un résultat plus cohérent avec la réalité.

CONCLUSION

La complexité de ce projet fut de comprendre comment modéliser le matériau bois exposé au feu. Beaucoup de phénomènes de conduction sont expliqués dans la littérature mais aucune modélisation ne prend en compte la convection et le rayonnement. Il nous a été impossible de trouver une modélisation sur ce sujet afin de nous en inspirer et d'avancer rapidement De ce fait la thèse d'Agnese MENIS nous a été très utile malgré l'absence d'indication sur les interactions effectuées sur ses modèles.

L'utilisation des données variables du LVL nous a cependant été très utile pour nos études. Nous avons de plus remarqué avec notre professeur encadrant qu'imposer une courbe de température à l'aide de l'ajout d'une amplitude ne permettais pas au logiciel de diverger librement suivant les propriétés admises pour le matériau. Nous avons de ce fait changés cette amplitude contenant des points multiples par 3 points distincts. Nous laissons ainsi le logiciel diverger librement vers un résultat plus cohérent en ne forçant pas la réponse.

La mise en évidence du problème d'isotropie est peut être un point à approfondir par des recherches ultérieures. La différence de longueur de la section pourrait être la cause à cette différence d'avancée de carbonisation, d'autant plus que nous savons que le bois se dégrade plus rapidement suivant la longueur la plus faible (largeur de la section). Nous ne connaissons de plus pas la structure interne du logiciel pour comprendre comment ce dernier définie les conditions aux limites du matériau. Un outil de résolution des problèmes serait bénéfique à la compréhension d'Abaqus. L'affichage constant de la possibilité d'un problème d'incrémentation quel que soit le problème de modélisation ne permet pas de faciliter aux utilisateurs la compréhension de phénomène qu'ils n'ont jamais modélisés auparavant. Nous avions eu une formation sur la modélisation mécanique, mais jamais sur la modélisation thermique ce qui nous a rendu le travail difficile puisque le logiciel relevait constamment des problèmes.

Du point de vue modélisation, Abaqus est un outil complet et puissant, mais qui possède cependant des limites. En effet, nous avons dû simplifier l'étude en ce qui concerne l'insertion des propriétés des plaques de plâtre ainsi qu'abaisser les chaleurs spécifiques pour les températures de 99 et 120°C à 5000 $J.kg^{-1}.K^{-1}$ pour la modélisation de la poutre en LVL dans le four pilote.

L'étude mécanique n'a pas été implémentée dans nos simulations par manque de temps. Ayant cependant étudié le sujet nous savons que le lancement d'une étude simultanée de thermique et de mécanique et impossible sur Abaqus. Il nous faut ressortir nos résultats thermiques afin de les insérer comme entrée dans notre modèle mécanique. Il faudra donc un « step » de chauffe, et un second de mécanique. La reprise de nos résultats permettrait rapidement, à une personne connaissant le logiciel, de réaliser une étude thermodynamique.

BIBLIOGRAPHIE

LIGOT, Yves-Marie. *Sécurité Incendie.* 20 Novembre 2013

MINISTERE DE L'INTERIEUR. *interieur.gouv.fr* [en ligne]. Disponible sur : http://www.interieur.gouv.fr/Publications/Statistiques/Securite-civile [consulté le 29 Septembre 2014]

LE CONSEIL DES COMMUNAUTES EUROPEENNES. *Directive 89/106/CEE du conseil.* JOCE L40 du 11 février 1989 et L220 du 30 août 1993, 15p.

LE MINISTRE DE L'INTERIEUR, DE LA SECURITE ET DES LIBERTES LOCALES ET LA MINSITRE DELEGUEE A L'INDUSTRIE. *Arrêté du 21 Novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement*. JOFR du 15 février 2003, 15p.

ACTIMODUL. *ACTIMODUL construction modulaires* [en ligne]. Disponible sur : http://www.actimodul.fr/photos_site/GaleriePDF/Normes%20et%20r%C3%A9glementations/Classements%20feu%20Reflex_60_euroclasses.pdf [consulté le 17 Janvier 2015]

CSTB. *CSTB le futur de la construction* [en ligne]. Disponible sur : http://www.cstb.fr/actualites/webzine/thematiques/securite-incendie/reaction-et-resistance-au-feu-limpact-de-leurope.html [consulté le 17 Janvier 2015]

GUIDEnR. *GUIDEnR HQE, l'information Haute Qualité Environnementale* [en ligne]. Disponible sur : http://www.hqe.guidenr.fr/index.php [consulté le 17 Janvier 2015]

CNFPT Auvergne. *CNFPT Auvergne, Espace dédié aux collectivités de la région Auvergne* [en ligne]. Disponible sur : http://www.cnfpt-auvergne.fr/applications/formations_emplois/pc/pompiers/capitain/cours1/cap1p11.htm [consulté le 17 Janvier 2015]

Comité National pour le Développement du Bois. *CNDB, Le bois avance* [en ligne]. Disponible sur : *http://www.cndb.org/pdf/CNDB/TELECHARGEMENTS/Essentiel_4.pdf* [consulté le 17 Janvier 2015]

GIRPI. *Sécurité incendie* [en ligne]. Disponible sur : http://www.girpi.com/fr/telechargements/cahiers-girpi-infos/doc_view/48-classification-feu--les-euroclasses.html [consulté le 17 Janvier 2015]

PROTECFLAM. *Protecflam, protection et ignifugation des matériaux* [en ligne]. Disponible sur : http://www.protecflam.com/ignifugation-materiaux-FR/reglementation-feu-euroclasse.php [consulté le 17 Janvier 2015]

CSTC. *Méthodes d'essai et classification européennes de la réaction au feu des produits de construction* [en ligne]. Disponible sur : http://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=publ&doc=CSTC_Revue_2003_2_p27.pdf&lang=fr [consulté le 17 Janvier 2015]

FCBA. *Règles de la sécurité incendie* [en ligne]. Disponible sur : http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/FCBA-guide-securite-incendie.pdf [consulté le 17 Janvier 2015]

ASTROLOLO. Univers de lolo [en ligne]. Disponible sur : http://www.astrololo.fr/category/dossiers/ [consulté le 05 Février 2015]

Saint-Gobain. *Les essentiels de l'habitat* [en ligne]. Disponible sur : http://www.construireavecsaint-gobain.fr/wp-content/uploads/2012/12/6_ESS_HAB_INTRODUCTION_SECURITE_INCENDIE.pdf [consulté le 17 Janvier 2015]

BREVART, Romain. *Présentation EN 1995-1-2 Section 3, Section 4, Annexe C* et Annexe D. 27 Novembre 2013

ANNEXES

Scénario d'incendie	Méthode Essais	Classes selon NF EN 13 501-1			Exigences
Feu en plein développement (phase 3)	Incombustibilité (NF EN ISO 1182) PCS (NF EN 1716)	A1			Incombustible
	Incombustibilité (NF EN ISO 1182) PCS (NF EN 1716) SBI (NF EN 13823)	A2	s1	d0	M0
			s1	d1	M1
			s2	d0	
			s3	d1	
	SBI (NF EN 13823) Petite flamme : (NF EN 11925-2)	B	s1		
			s2	d0	
			s3	d1	
Objet isolé en feu (single burning item) dans l'angle de la pièce (phase 2)	SBI (NF EN 13823) Petite flamme : (NF EN 11925-2)	C	s1		M2
			s2	d0	
			s3	d1	
	SBI (NF EN 13823) Petite flamme : (NF EN 11925-2)	D	s1	d0	M3
			s2	d1	M4
			s3		(non gouttant)
Allumage à l'aide d'une petite flamme appliquée sur une surface restreinte (phase 1)	Petite flamme (NF EN 11925-2)	E sauf Ed2			M4
	…	F			

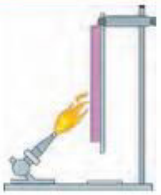
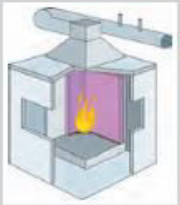
Annexe 1 _ Scénario incendie, méthode d'essais et classification

Euroclasse	Méthode(s) Essais	Critères de classification	Classification supplémentaire
A1	NBN EN ISO 1182 (1) et	ΔT ≤ 30°C Δm ≤ 50% tf=0 (pas d'inflammation prolongée)	-
	NBN EN ISO 1716	PCS ≤ 2,0MJ/kg (1) PCS ≤ 2,0MJ/kg (2) (3) PCS ≤ 1,4MJ/kg (4) PCS ≤ 2.0MJ/kg (5)	-
A2	NBN EN ISO 1182 (1) ou	ΔT ≤ 50°C Δm ≤ 50% tf ≤ 20 secondes	-
	NBN EN ISO 1716	PCS ≤ 3,0MJ/kg (1) PCS ≤ 4,0MJ/kg (2) PCS ≤ 4,0MJ/kg (4) PCS ≤ 2.0MJ/kg (5)	-
	NBN EN 13823	FIGRA ≤ 120W/s LFS <bord de l'éprouvette THR600s ≤ 7.5MJ	Production de fumée (6) et gouttelettes/particules enflammées(7)
B	NBN EN 13823 et	FIGRA ≤ 120W/s LFS <bord de l'éprouvette THR600s ≤ 7.5MJ	Production de fumée (6) et gouttelettes/particules enflammées(7)
	NBN EN ISO 11925-2 (8) Exposition 30 secondes	Propagation de la flamme ≤ 150mm en 60 secondes	
C	NBN EN 13823 et	FIGRA ≤ 120W/s LFS <bord de l'éprouvette THR600s ≤ 7.5MJ	Production de fumée (6) et gouttelettes/particules enflammées(7)
	NBN EN ISO 11925-2 (8) Exposition 30 secondes	Propagation de la flamme ≤ 150mm en 60 secondes	
D	NBN EN 13823 et	FIGRA ≤ 750W/s	Production de fumée (6) et gouttelettes/particules enflammées(7)
	NBN EN ISO 11925-2 (8) Exposition 30 secondes	Propagation de la flamme ≤ 150mm en 60 secondes	
E	NBN EN ISO 11925-2 (8) Exposition 15	Propagation de la flamme ≤ 150mm en 20 secondes	

	secondes		
F	-	Réaction au feu non définie	

(1) Pour les produits homogènes et le composants substantiels des produits non homogènes
(2) Pour tout composant externe non substantiel des produits non homogènes
(3) Pour tout composant externe non substantiel d'un PCS ≤ 2MJ /m², pour autant que le produit répond aux critères suivants de la norme NBN EN 13823 :
- FIGRA ≤ 20 W/s
- LFS ≤ bord de l'éprouvette
- THR 600s ≤ 4,0 MJ
- classes complémentaires s1 et d0
(4) Pour tout composant interne non substantiel des produits non homogènes
(5) Pour le produit (non homogène) dans son ensemble
(6) SMOGRA ≤ 30 m²/s² et TSP 600s ≤ 50m³ : classe s1; SMOGRA ≤ 180 m²/s² et TSP 600s ≤ 200 m³ : classe s2; tout autre cas : classe s3
(7) Pas de gouttelettes ou de particules enflammées lors de l'essai SBI avant 600 secondes : classe d0; pas de gouttelettes ou de particules enflammées persistant plus de 10 secondes lors de l'essai SBI avant 600 secondes : classe d1; dans tous les autres cas, de même qu'en cas d'inflammation du papier filtrant lors de l'essai à la petite flamme : classe d2
(8) En cas d'attaque par la flamme en surface et éventuellement, selon l'application finale du produit, en cas d'attaque par le bord
(9) Accepté si le papier filtrant ne s'enflamme pas (pas de classe); refusé dans le cas contraire (classe d2)

Annexe 2 _ Critère requis pour l'euroclassification

		Essais réalisés		Principe	Classement visé
Phase de l'incendie	Démarrage	Essai à la petite flamme		Attaque ponctuelle à la petite flamme sur un échantillon de matériau disposé verticalement. On mesure la distance de propagation de la flamme à partir du point d'attaque	B, C, D et E
	Déclenchement du feu	Test Single Burning Item(SBI)		Attaque par objet enflammé avec mesure de température, de concentration en O_2 et CO_2, atténuation lumineuse par la fumée et observation de la chute de particules et/ou gouttelettes enflammées.	A2, B, C et D
	Embrassement généralisé	Essai au four ISO		Test d'inflammabilité sur un échantillon exposé dans un four vertical à une température de 750°C durant 60 min maximum. On mesure la perte de masse et la durée d'inflammation	A1 ou A2
		Test à la bombe calorimétrique		Mesure du pouvoir calorifique supérieur (PCS). On mesure la valeur de combustion du matériau (part du matériau qui contribue à l'incendie)	A1 ou A2

Annexe 3 _ Méthodes d'essais selon les euroclasses

TEMPERATURE	SPECIFIC HEAT	DENSITY RATIO	CONDUCTIVITY		
	EC5 and New Proposal	EC5 and New Proposal	New Proposal	Frangi	EC5
°C	kJ $kg^{-1}K^{-1}$	-	W $m^{-1}K^{-1}$		
20	1.53	1+ω	0.132	0.132	0.120
99	1.77	1+ω	0.203	0.203	0.133
99	13.60	1+ω	0.203	0.203	0.133
120	13.50	1.00	0.223	0.223	0.137
120	2.12	1.00	0.223	0.223	0.137
200	2.00	1.00	0.295	0.295	0.150
250	1.62	0.93	0.228	0.228	0.123
300	0.71	0.76	0.162	0.162	0.097
350	0.85	0.52	0.096	0.096	0.070
400	1.00	0.38	0.104	0.104	0.077
500	1.20	0.33	0.119	0.119	0.090
550	1.30	0.31	0.127	0127	0.133
600	1.40	0.28	0.180	0.225	0.177
800	1.65	0.26	0.450	0.617	0.350
1200	1.65	0.00	1.500	1.400	1.500

Annexe 4 _ Variation des propriétés thermiques du LVL avec la température (ω est la teneur en humidité)

Temp (°C)	ρ(GIB® Fyreline) (kg/m³)	Temp (°C)	ρ(Standard) (kg/m³)
0	747	0	648
100	747	100	648
105	747	105	648
125	725	130	620
140	710	150	620
150	702	160	620
200	702	200	620
205	702	205	580
215	702	210	580
220	680	350	580
400	680	500	580
640	680	660	100
700	680	700	100
1000	680	1000	100
1200	680	1200	100

Annexe 5 _ Densité Plaque de plâtre selon Jones

Temp (°C)	c_p(GIB® Fyreline) (kg/m³)	Temp (°C)	c_p (Standard) (kg/m³)
0	900	0	800
100	900	100	800
105	38000	105	3000
125	38000	130	5000
140	2000	150	7000
150	2000	160	7000
200	1000	200	9000
205	9000	205	11000
215	9000	210	12000
220	1000	350	15000
400	900	500	5000
640	900	660	100
700	800	700	100
1000	800	1000	100
1200	800	1200	100

Annexe 6 _ Chaleur Spécifiques selon Jones

Temp (°C)	k(GIB® Fyreline) (kg/m³)	Temp (°C)	k (Standard) (kg/m³)
0	0.3	0	0.4
100	0.3	100	0.4
105	0.12	105	0.4
125	0.12	130	0.12
140	0.12	150	0.12
150	0.12	160	0.12
200	0.12	200	0.12
205	0.12	205	0.12
215	0.12	210	0.12
220	0.12	350	0.12
400	0.12	500	0.12
640	0.12	660	5
700	0.5	700	5
1000	0.7	1000	5
1200	1.0	1200	5

Annexe 7 _ Conductivité selon Jones

Material	Relative Emissivity	Convective Coeff Exp (W/m².K)	Convective Coeff UnExp (W/m².K)
Gypsum	0.8	5	12
Steel	0.5	12	12

Annexe 8 _ Coefficients thermiques selon Jones

ABSTRACT

SUJET : Résistance au feu des structures bois

Dans le cadre de la sécurité incendie, les constructions bois doivent être soumises à des essais de résistance au feu standardisés. En effet, un délai de résistance au feu est requis afin de permettre la bonne évacuation des personnes. Ces essais de résistance au feu peuvent être contraignants et coûteux pour les industriels, freinant ainsi leur volonté de recherche et développement. C'est dans cet esprit que nous avons orienté notre projet de fin d'étude en étudiant le comportement thermomécanique des structures bois. Nous avons réalisés différents modèles par éléments finis de poutre en bois massif à l'aide du logiciel ABAQUS. Ces derniers prennent en compte l'évolution des propriétés thermomécaniques du matériau en fonction de l'avancement des réactions de vaporisation et de pyrolyse. Afin de valider chacun de nos modèles, les résultats sont confrontés avec ceux de la littérature. En se basant sur la répartition de la température, le modèle permet d'évaluer les performances au feu du produit.

Mots-clefs : Structure Bois, sécurité incendie, transfert thermique, thermomécanique, résistance au feu, éléments finis

SUBJECT: Fire resistance of wooden structures

As part of the fire safety, the wooden constructions have to be subjected to standard fire resistance tests. Indeed, a fire resistance time is required to allow the proper evacuation of people. These fire resistance tests can be restrictive and expensive for the manufacturers, who might slow down their willingness to conduct new research and development processes. That's why we chose to focus our final study project on studying the thermo-mechanical performances of wooden structures. We made various finite element models of solid wood beam using ABAQUS software. The evolution of the thermo-mechanical properties of the material are taken into account according to the progress of vaporization and pyrolysis reactions. In order to validate each of our models, the results are compared with those in the literature. By using temperature distribution, the model enables to assess the fire performances of the product.

Keywords: Wood structure, fire safety, heat transfer, thermo-mechanical, fire resistance, finite elements.