



ETUDE

FAISABILITE DE L'APPLICATION DE
L'INGENIERIE DE LA SECURITE
INCENDIE AUX BATIMENTS EN BOIS
COMPORTEMENT STRUCTURAL

AVERTISSEMENT

Cette publication vise à mettre à disposition des acteurs de la construction les résultats d'études menées dans le cadre des travaux de la Commission Technique d' ADIVbois.

ADIVbois ne saurait être tenu pour responsable des omissions, inexactitudes ou erreurs que pourrait contenir cette publication et qui résulteraient de la retranscription de ces études, réalisées sous la responsabilité de leurs auteurs respectifs, et auxquelles le lecteur est invité à se référer directement.

ADIVbois souligne également que les éléments et recommandations retranscrites dans le présent ouvrage présentent un caractère informatif et ne sauraient en aucun cas se substituer, même pour partie, aux études techniques et juridiques, tant au stade de la conception que de l'exécution, qui incombent à chaque acteur de la construction dans le cadre des projets auxquels il pourra être amené à participer.

Droits d'auteur - copyright ©

L'ensemble de ce document relève de la législation française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction sont réservés, y compris pour les documents téléchargeables et les représentations iconographiques et photographiques.

La reproduction de tout ou partie de ce document, y compris sur un support électronique quel qu'il soit est formellement interdite sauf autorisation expresse d' ADIVbois, du Codifab et des réalisateurs de l'étude.

PRÉAMBULE

Depuis 2016, l'Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois porte un projet innovant reposant sur des immeubles bois de moyenne et grande hauteur, qui se distinguent par des solutions structurelles bois et des aménagements intérieurs faisant appel au bois.

Ce projet innovant va de pair avec un important travail collectif (études, benchmark, prototypages) visant à accompagner la réalisation d'immeubles démonstrateurs.

La Commission Technique d'ADIVbois a lancé, depuis 2016, un nombre conséquent de travaux dans le cadre d'ateliers thématiques (structure, incendie, acoustique, enveloppe, environnement...) et d'études afin d'accompagner la conception et la réalisation des Immeubles à Vivre Bois. L'objectif de ces travaux est de favoriser la levée de freins technico-réglementaires et d'être partagés avec la collectivité.

Le présent document s'inscrit dans cette démarche.

Ce document a été financé par l'association ADIVbois et par le CODIFAB. Il a été réalisé par le groupement réunissant le CSTB et Efectis, prenant en compte des contributions des membres de l'atelier Incendie d'ADIVbois.

La présente troisième partie de l'étude sur les conditions d'applicabilité de l'ingénierie de la sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur, concerne, à partir des actions thermiques de feu réel déterminées avec les méthodes présentées dans la partie 2, l'étude du comportement au feu d'une structure en bois par des méthodes de calcul avancé.

Référence	Efectis	CSTB
Affaire/projet :	SA-17-000977	26068352
Document :	18-000290-XDU	

ÉTUDE DE FAISABILITÉ D'APPLICATION DE L'INGÉNIERIE DE SÉCURITÉ INCENDIE AUX BÂTIMENTS EN BOIS DE GRANDE HAUTEUR

APPROCHES NUMÉRIQUES D'ÉVALUATION DU COMPORTEMENT SOUS FEUX RÉELS DE STRUCTURES EN BOIS

Demandeur : CODIFAB

Comité Professionnel de Développement des Industries
Françaises de l'Ameublement et du Bois
120, Avenue Ledru-Rollin
75011 PARIS

Date : 09 Mars 2018
Indice de révision : B
Nombre de pages : 62

	Rédacteur	Vérificateur
Efectis France	Xavier DUPONCHEL	Gildas AUGUIN Xavier DUPONCHEL
CSTB	Seddik SAKJI	Yahia MSAAD

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	07/02/2018	Version initiale
B	09/03/2018	Mise à jour suite à remarques de l'Atelier Incendie ADIVbois

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	5
2. CONFIGURATIONS ÉTUDIÉES	5
2.1 CONFIGURATIONS GÉOMÉTRIQUES	5
2.2 HYPOTHÈSES DE CHARGEMENT	7
2.2.1 Charges permanentes (G)	7
2.2.1 Charges d'exploitation (Q)	7
2.2.2 Charge de neige (S)	8
2.2.3 Charge de vent (W)	8
2.3 CARACTÉRISTIQUES DES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE	8
2.3.1 Matériaux – Bois Lamellé collé	8
2.3.2 Dimensionnement à froid de la structure	9
2.3.2.1 Combinaison d'actions.....	9
2.3.2.1.1 États limites ultimes	9
2.3.2.1.1 États limites de services et critères de déformation	10
2.3.2.2 Imperfections géométriques.....	10
2.3.2.3 Conclusion du dimensionnement à froid	11
3. APPROCHES PROPOSÉES	12
3.1 APPROCHE PAR ANALYSE DE PARTIES DE LA STRUCTURE	12
3.2 APPROCHE PAR SECTION RÉDUITE	15
3.2.1 Calcul de la profondeur de carbonisation	17
3.2.2 Procédure pour le calcul de la section équivalente en flexion	17
3.2.3 Procédure pour le calcul de la section équivalente en compression	18
4. APPLICATION DES APPROCHES AU CAS DU BUREAU	19
4.1 MODÉLISATION : HYPOTHÈSES	19
4.1.1 Généralités	19
4.1.2 Hypothèses de chargement	19
4.1.3 Combinaisons d'actions	19
4.1.4 Coefficients partiels de sécurité	19
4.1.5 Transfert thermique au sein des sections	19
4.1.6 Scénarios de feu - Bureaux.....	19
4.2 FEU DE BUREAU - CAS 1 : CAS SANS CONTRIBUTION DU BOIS.....	20
4.2.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas sans contribution du bois	20
4.2.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1.....	22
4.2.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3.....	23
4.2.3.1 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5.....	24
4.2.3.1 Détermination des sections efficaces	25
4.3 FEU DE BUREAU – CAS 2 : CAS DU BUREAU AVEC UNE SEULE PAROI COMBUSTIBLE	27
4.3.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas avec une seule paroi combustible.....	27
4.3.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1.....	28
4.3.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3.....	29
4.3.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5.....	29
4.3.5 Détermination des sections efficaces.....	30
4.4 SCÉNARIOS DE FEU DE BUREAUX : CONCLUSIONS	31
5. APPLICATION DES APPROCHES AU CAS DU LOGEMENT	32
5.1 MODÉLISATION : HYPOTHÈSES	32
5.1.1 Hypothèses générales, chargement etc.....	32
5.1.2 Scénarios de feu - Logements	32
5.2 FEU DE LOGEMENT - CAS 1 : CAS SANS AUTO EXTINCTION.....	33
5.2.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas sans auto-extinction	33
5.2.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1.....	34
5.2.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3.....	35

5.2.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5.....	36
5.2.5 Détermination des sections efficaces.....	38
5.3 FEU DE LOGEMENT - CAS 2 : CAS AVEC AUTO EXTINCTION DU BOIS	39
5.3.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas avec auto-extinction	39
5.3.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au RDC.....	40
5.3.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3.....	40
5.3.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5.....	41
5.3.5 Détermination des sections efficaces.....	41
5.4 SCÉNARIOS DE FEU DE LOGEMENT : CONCLUSIONS.....	44
6. CONCLUSIONS.....	45
7. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE.....	46
ANNEXE A - DIMENSIONNEMENT À FROID DE LA STRUCTURE.....	47
A.1. COMBINAISONS D’ACTIONS	47
A.1.1. États limites ultimes.....	47
A.1.2. États limites de services et critères de déformation	47
A.1.2. Imperfections géométriques	48
A.2. VÉRIFICATION DU PRÉDIMENSIONNEMENT SOUS ADVANCE DESIGN ET OPTIMISATION DES SECTIONS..	48
A.2.1 Analyse non linéaire en grands déplacements avec prise en compte des imperfections géométriques à l’ELU	48
A.2.1.1 Analyse des poutres.....	48
A.2.1.2 Analyse des poteaux.....	49
A.2.2 ELS : Limitation des flèches des poutres	49
A.2.2.1 Flèche instantanée due aux charges variables	49
A.2.2.2 Flèche nette finale avec prise en compte du fluage	50
A.2.2 ELS : Limitation des déplacements horizontaux.....	51
A.2.2.1 Déplacement en tête de bâtiment.....	51
A.2.2.2 Déplacements entre étages.....	51
A.3 CONCLUSION DU DIMENSIONNEMENT À FROID	52
ANNEXE B – COMPARATIF ENTRE CALCUL NUMÉRIQUE ET CALCUL SUIVANT LA NF EN 1995-1-2 A FROID ET SOUS FEU NORMALISÉ.....	53
B.1 ÉTUDE D’UNE POUTRE	53
B.1.1. Poutre de section 90x225 ^{ht} mm.....	53
B.1.2. Poutre de section 140x495 mm ²	57
B.1.3. Poutre de section 300x500 mm ²	59
B.2 ÉTUDE D’UN POTEAU	59
B.2.1. Poteau de section 250x250 mm	60
B.2.2. Poteau de section 400x400 mm	61
B.3. CONCLUSIONS	62

1. INTRODUCTION

En France, la réglementation actuelle prescriptive concernant les bâtiments d'habitation ou relevant du code du travail date des années 1980 – 1990. Ces réglementations étaient principalement fondées sur des analyses de risques portées sur des bâtiments à structure incombustible, principalement en béton. Certaines prescriptions de ces règlements ne semblent pas toujours adaptées dans le cas de bâtiments à ossature bois de hauteur relativement importante (bâtiment d'habitation des 3 et 4èmes famille et bâtiment relevant du code du travail de hauteur inférieure du plancher bas le plus haut inférieur à 28 m)

En matière de sécurité incendie dans les bâtiments à ossature bois de grande hauteur, la note d'information du 18 décembre 2015 [1] préconise le recours à des études spécifiques afin de pouvoir valider des solutions bois. Ces études permettent une approche globale et par objectif de la sécurité sur les trois domaines suivants :

- Résistance au feu des structures et compartimentage,
- Comportement au feu des façades,
- Réaction au feu des matériaux de construction.

Toutefois afin d'éprouver les méthodologies et les outils employés en Ingénierie de Sécurité Incendie (ISI), l'Atelier Incendie d'ADIVbois a confié au CSTB et a Efectis France une étude de faisabilité d'ingénierie de sécurité incendie de bâtiment en bois. Cette étude est réalisée selon les 4 phases suivantes :

- Phase 1 : étude bibliographique et recueil de données,
- Phase 2 : étude du développement de feu de deux configurations types avec prise en compte de la contribution du bois,
- Phase 3 : étude du comportement au feu d'une structure bois dans les deux configurations définies précédemment,
- Phase 4 : Synthèse des résultats et guide méthodologique.

Ce rapport présente les résultats de la phase 3 : étude du comportement au feu d'une structure bois. Il s'agit, à partir des actions thermiques de feu réel déterminées dans la phase précédente [2] d'étudier le comportement au feu d'une structure bois par des méthodes de calcul avancé.

2. CONFIGURATIONS ÉTUDIÉES

L'étude porte sur un bâtiment de hauteur modérée, multiniveaux (R+6) contreventé transversalement par portique. Les dimensions du bâtiment objet de la présente étude ont été inspirées des travaux de l'atelier structure d'ADIVbois [4]. Les actions thermiques déterminées lors des calculs de développement de feu sont réutilisées dans cette configuration. Il est à noter que les caractéristiques géométriques du bâtiment retenu pour l'étude de la structure ne correspondent pas forcément avec les dimensions exactes des cas d'étude de développement de feu. L'objectif étant d'éprouver la méthode, ces différences sont sans impact sur les enseignements tirés des analyses.

2.1 CONFIGURATIONS GÉOMÉTRIQUES

En plan, le bâtiment est composé de portiques transversaux espacés de 5 m. Ces portiques principaux sont supposés assurer la stabilité transversale du bâtiment. La structure ainsi formée est considérée comme étant à nœuds déplaçables au sens des Eurocodes.

Ces portiques présentent trois travées. Les travées de rive ont un entraxe de poteau de 8 m ; l'entraxe entre les poteaux centraux est de 5,5m. La hauteur de chaque niveau est prise invariable sur la hauteur du bâtiment et égale à 3 m. Les poteaux sont considérés articulés en pieds.

La Figure 2-1 présente une vue en plan du bâtiment considéré. L'étude portera sur un portique transversal type.

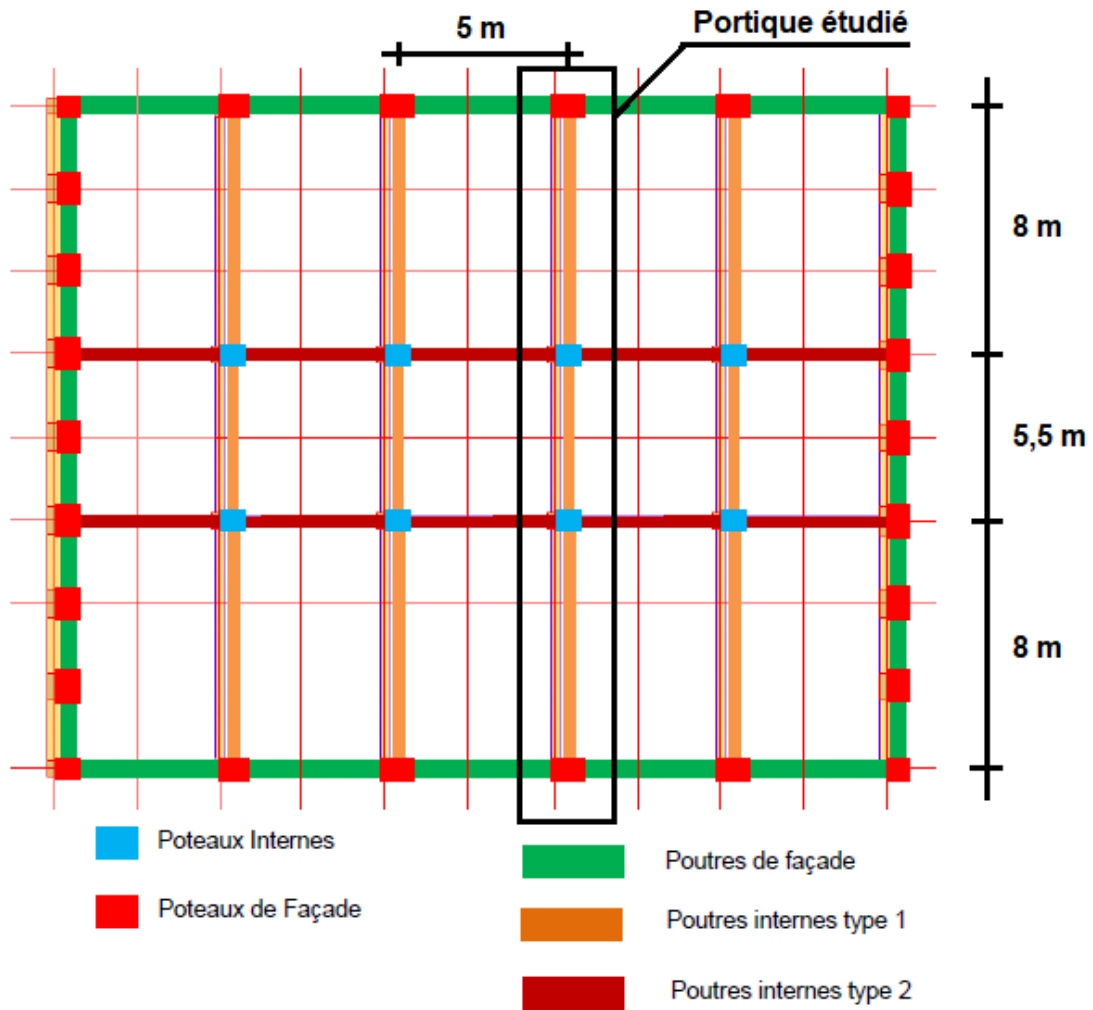


Figure 2-1 : Vue en plan de la configuration d'étude

La Figure 2-2 présente une coupe transversale du bâtiment au niveau du portique étudié.

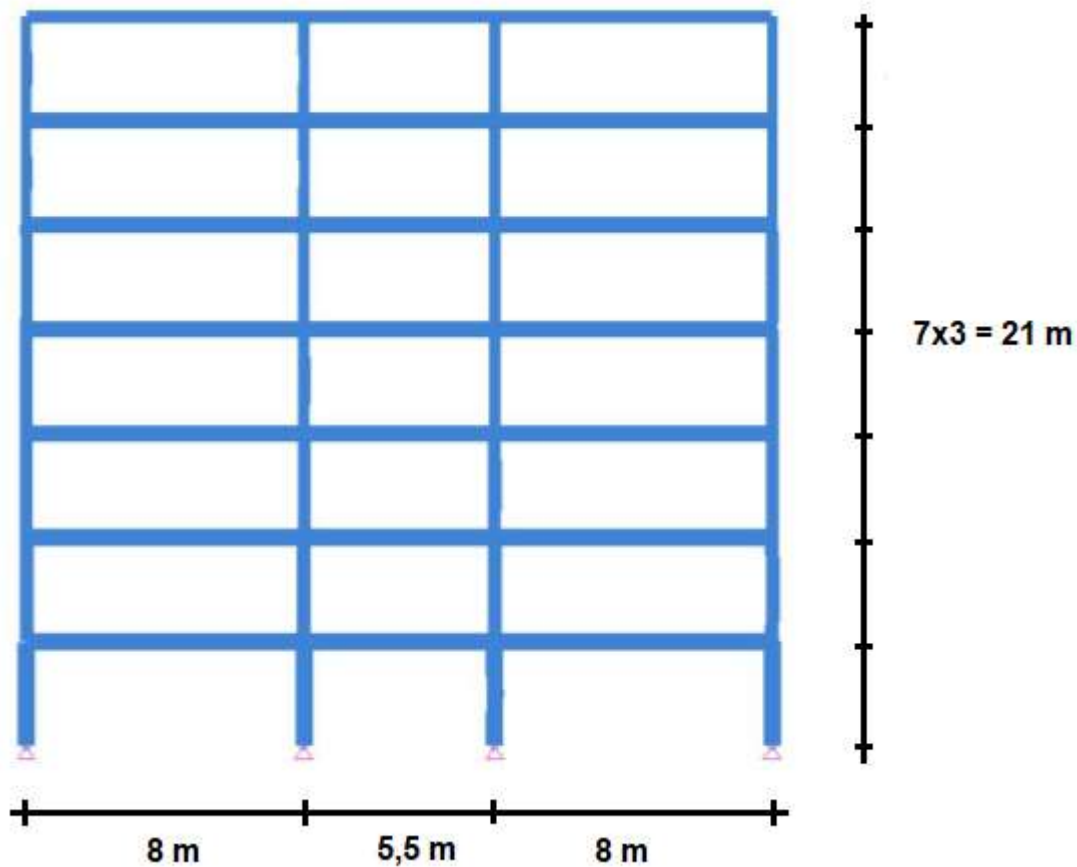


Figure 2-2 : Portique d'étude

2.2 HYPOTHÈSES DE CHARGEMENT

2.2.1 Charges permanentes (G)

Les charges permanentes du bâtiment, prises en compte pour l'étude du portique sont les suivantes :

- Poids propre des éléments bois : $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$. Afin de prendre en compte les charges additionnelles dues aux assemblages, une majoration forfaitaire de 10% a été prise sur la masse volumique des éléments bois, soit $\rho = 506 \text{ kg/m}^3 = 5,06 \text{ kN/m}^3$
- Complexe de plancher (planchers courants) : Le poids propre du complexe (panneaux de planchers, faux plafond, chape et revêtement de sol) pris en compte est de **2,00 kN/m²**
- Complexe de toiture, y compris structure porteuse de la toiture : **1,5 kN/m²**
- Poids propre des façades : **0,75 kN/m²**. Ces charges sont reportées sur les poteaux de rive, en fonction de l'entraxe entre portiques.

2.2.1 Charges d'exploitation (Q)

Les charges d'exploitation sont prises en compte conformément à la NF EN 1991-1-1 [6] :

- Charges d'exploitation applicables aux logements (Habitation - type A) = **1,5 kN/m²**
- Charge d'entretien toiture = **0,8 kN/m²**

2.2.2 Charge de neige (S)

Le bâtiment est considéré en zone A1, la valeur caractéristique de la charge de neige à prendre en compte vaut $S_k = 0,45 \text{ kN/m}^2$, conformément à la NF EN 1991-1-3 [8]

2.2.3 Charge de vent (W)

Le bâtiment est considéré en région 2, ainsi, la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ vaut 24 m.s^{-1} [9]. Concernant les paramètres de terrain, il a été pris en compte un bâtiment situé en zone urbanisée de catégorie IIIb.

Le profil de la charge de vent selon la hauteur est donné ci-après, tenant compte des coefficients de pression intérieur et extérieur ($c_{pi} - c_{pe} = 1,3$).

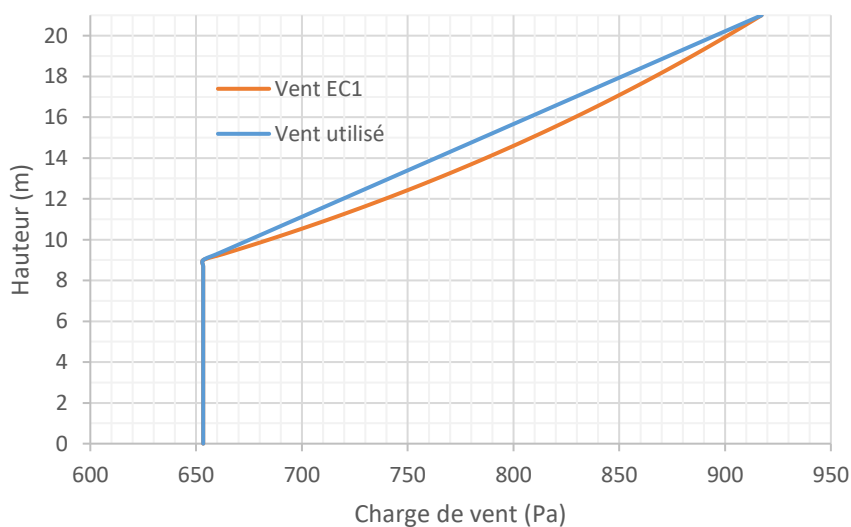


Figure 2-3 : Charge de vent sur le bâtiment.

Afin de simplifier la génération du modèle de calcul, un profil bilinéaire (en bleu) avec une charge de vent de $0,65 \text{ kN/m}^2$ sur les 9 premiers mètres et une charge de $0,92 \text{ kN/m}^2$ en tête de bâtiment sont considérées.

2.3 CARACTÉRISTIQUES DES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE

2.3.1 Matériaux – Bois Lamellé collé

Les propriétés prises en compte dans les modèles de calcul correspondent à celles du bois lamellé collé GL28h. Elles sont prises conformément à la NF EN 14080 [12] et rappelées ci-après :

Lamellé collé GL28h		
Module d'élasticité	$E_{0,g,moyen}$	12600 MPa
Module de cisaillement	$G_{g,moyen}$	650 MPa
Masse volumique	$\rho_{g,moyen}$	460 kg/m ³
Résistance à la flexion	$f_{m,g,k}$	28 MPa
Résistance à la traction	$f_{t,0,g,k}$	22,4 MPa
Résistance à la compression	$f_{c,0,g,k}$	28 MPa

Tableau 2-1 : Propriétés mécaniques du bois LMC GL28h.

Le bois est considéré être à 12 % d'humidité moyenne.

Il est à noter que dans bien des modèles, le module de cisaillement est calculé à partir du module d'élasticité comme pour un matériau isotrope. Le module de cisaillement est alors calculé suivant l'expression $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Dans notre cas, le coefficient de poisson doit être introduit de sorte à reproduire le module de cisaillement du bois, c'est-à-dire $\nu = \frac{E}{2G} - 1$. Dans le cas du GL28h cela donne $\nu = 8,69$.

Pour les analyses élastiques linéaires du second ordre et le calcul des sollicitations pour vérifications ELU, les valeurs de calcul des modules d'élasticité sont prises en compte, $E_d = E_{\text{moyen}}/\gamma_M = 10\,080$ MPa.

Pour les analyses à l'ELS instantané on utilise un module d'élasticité $E_{\text{INST}} = E_{\text{moyen}} = 12\,600$ MPa et pour les analyses nécessitant un calcul à l'ELS différé on utilise un module d'élasticité $E_{\text{DIFF}} = E_{\text{moyen}}/(1+k_{\text{def}}) = 7\,875$ MPa.

2.3.2 Dimensionnement à froid de la structure

Le portique est modélisé avec le logiciel Advance Design (AD). Les pieds de poteaux sont considérés articulés et les éléments poteaux et poutres sont considérés parfaitement encastés les uns aux autres (les assemblages sont considérés comme étant parfaitement rigides). Bien que cette dernière hypothèse ne soit pas réaliste, elle n'a que peu d'influence étant donné l'objectif de l'étude consistant à évaluer la faisabilité des calculs thermomécaniques avec action thermique issues de feux réels.

Un prédimensionnement des éléments porteurs est effectué au préalable pour déterminer les sections réalistes des éléments du portique. Les poutres sont dimensionnées à l'ELU en flexion, cisaillement, et à l'ELS par limitation des flèches instantanées, finales et nette finales. Les poteaux sont dimensionnés à l'ELU en compression simple, flambement et flexion composée. On vérifiera également la flèche horizontale totale et la flèche différentielle entre étages.

Le détail du dimensionnement à froid est donné en Annexe A. On présente ci-après les principales hypothèses prises en compte ainsi que les sections retenues.

2.3.2.1 Combinaison d'actions

2.3.2.1.1 États limites ultimes

La combinaison fondamentale de vérification des ELU est la suivante, conformément à la NF EN 1990 [5] :

$$1,35 G + 1,5 Q_1 + 1,5 \psi_{0,2} Q_2 (+ 1,5 \psi_{0,3} Q_3)$$

Avec :

- G : Charge permanente,
- Q1 : Charge variable dominante
- Q2, Q3 (...) charges variables d'accompagnement.

Les coefficients ψ dépendent de l'action considérée et de la catégorie de bâtiment :

Action	ψ_0	ψ_1	ψ_2
$Q_{\text{habitation}}$	0,7	0,5	0,3
Q_{bureaux}	0,7	0,5	0,3
Vent	0,6	0,2	0
Neige	0,5	0,2	0

Tableau 2-2 : Valeurs des coefficients Ψ le cas d'étude.

En considérant la prise en compte de deux actions variables dans les combinaisons ELU, les combinaisons d'étude sont :

- 1,35G + 1,5Q
- 1,35G + 1,5Q + 0,9W
- 1,35G + 1,5Q + 0,75S
- 1,35G + 1,5W + 1,05Q
- 1,35G + 1,5W + 0,75S
- 1,35G + 1,5S + 0,9W
- 1,35G + 1,5S + 1,05 Q

2.3.2.1.1 États limites de services et critères de déformation

Les critères de déformation pris en compte pour le dimensionnement de la structure sont les suivants :

- Les déplacements horizontaux des poteaux en tête de bâtiment sont limités à :
 $u_H = H_{\text{bâtiment}}/300 = 7 \text{ cm (ELS inst.)}$.
- Les déplacements horizontaux des poteaux entre chaque niveau sont limités à :
 $u_{Hi} = H_{\text{niveau}}/300 = 1 \text{ cm (ELS inst.)}$.

Les valeurs limites de flèche données par l'Eurocode 5 [10] sont les suivantes :

- $u_{\text{INST}(Q_i)} \leq L/300$
- $u_{\text{net,fin}} \leq L/200$
- $u_{\text{fin}} \leq L/125$

N'ayant pas supposé de valeur de contreflèche originalement, on se limitera à la vérification des 2 premiers critères de flèche (qui sont les plus stricts).

La flèche nette finale $u_{\text{net,fin}}$ est donnée par la formule suivante :

$$u_{\text{net,fin}} = u_{\text{INST(toutes les charges)}} + u_{\text{Fluage(combinaison ELS DIFF)}}$$

Combinaison ELS INST :

- $G + Q_1 + \psi_0 Q_2 (+ \psi_0 Q_3)$

Combinaison ELS DIFF :

- $k_{\text{def}} G + k_{\text{def}} \psi_{2,1} Q_1 + k_{\text{def}} \psi_{2,2} Q_2 (+ k_{\text{def}} \psi_{2,3} Q_3)$

Pour du bois lamellé collé en classe de service 1, $k_{\text{def}} = 0,6$

2.3.2.2 Imperfections géométriques

Conformément à la NF EN 1995-1-1 §5.4.1 et 5.4.4, lorsqu'une analyse au second ordre est menée, des imperfections géométriques globales et de barres doivent être considérées

Les imperfections géométriques des poteaux sont prises en compte en considérant un défaut de 7,5 mm ($=0,0025 * h_{\text{poteau}}$) à mi-hauteur de chaque niveau induisant une courbure sinusoïdale.

Aussi, un défaut d'inclinaison globale du portique de $2,44 \times 10^{-3} \text{ rad } (=0,005 * (5/H_{\text{Bâtiment}})^{1/2})$ est implémenté dans les modèles.

2.3.2.3 Conclusion du dimensionnement à froid

Les sections obtenues sont indiquées dans le tableau suivant.

Élément / NIVEAU	Section (cm ²)
<i>Poteaux</i>	
Poteau RDC	46 x 46
Poteau NIV1	35 x 35
Poteau NIV2	33,5 x 33,5
Poteau NIV3	32 x 32
Poteau NIV4	31 x 31
Poteau NIV5	30 x 30
Poteau NIV6	30 x 30
<i>Poutres</i>	
Poutres intérieures	30 x 40
Poutres toiture	24 x 35,5
Poutres intérieures RDC	40 x 50
Poutres intérieures NIV1	32 x 45

Tableau 2-3 : Dimensionnement à froid – Sections retenues.

3. APPROCHES PROPOSÉES

Les Eurocodes proposent plusieurs niveaux d'analyse des structures. Le modèle choisit doit être représentatif et refléter la performance de la structure en situation d'incendie. Les différentes analyses pouvant être réalisées sont les suivantes :

- Analyse par éléments. Ce type d'analyse est indiqué comme suffisant dans la NF EN1995-1-2 [11] dans le cas d'un feu standard. En effet, dans ce cas, l'intégralité de la structure d'un compartiment se trouve uniformément exposée, limitant ainsi les phénomènes éventuels de report de charge et de dilatation (pour les matériaux concernés). Pour cette analyse, les efforts dans les éléments en situation d'incendie peuvent être directement déduits des efforts à froid affectés du coefficient η_{fi} (ce coefficient peut être pris égal à 0,7 de manière conservatrice).
- Analyse de parties de la structure. Cette approche peut être réalisée en alternative à l'analyse par élément. Elle permet en générale de prendre en considération les phénomènes de report de charge entre éléments étudiés, d'éventuelles dilatations et déformation imposées et/ou empêchées résultant des variations de températures et des pertes de rigidité.
- Analyse structurale globale : Ce type d'analyse globale doit prendre en compte l'ensemble des phénomènes détaillés précédemment dans une analyse globale et complète de la structure. Cette analyse globale doit également prendre en compte le mode de rupture approprié en situation de feu. Cependant, ce type d'analyse s'effectue au prix de la réalisation de modélisations lourdes et coûteuses.

L'analyse globale de la structure est encore peu utilisée, tant elle peut être inutilement lourde à mettre en œuvre. On s'intéresse ici principalement à l'analyse par éléments et par partie de la structure. Compte tenu de la spécificité du bois de ne pas présenter de variations dimensionnelles importantes en situation de feu (même pas du tout au sens des Eurocodes) et de ne pas pouvoir trop aller dans le domaine plastique, on peut s'attendre à ce que l'analyse par parties de la structure ne présente pas de valeur ajoutée importante. Toutefois, une redistribution des efforts, du fait de la perte de raideur des éléments exposés, peut dans certains cas permettre d'optimiser le dimensionnement au feu de certains éléments structuraux.

Il est à noter qu'à ce jour, la plupart des bureaux d'études effectue la justification de ces sections sous feu conventionnel par analyse en éléments isolés. Dans le cas d'une démarche d'ingénierie de sécurité incendie, l'approche thermomécanique retenue doit permettre de prendre en compte explicitement les actions indirectes du feu. Néanmoins, le bois étant considéré comme non dilatant dans les Eurocodes, les effets indirects du feu dans le cas d'une structure bois sont en général plus limités que ceux observés pour d'autres types de structure.

3.1 APPROCHE PAR ANALYSE DE PARTIES DE LA STRUCTURE

L'étude est réalisée à l'aide du code de calcul par éléments finis SAFIR 2016 [13] développé à l'université de Liège. Ce logiciel est dédié à l'analyse du comportement des structures à hautes températures, basé sur la méthode des éléments finis. Pour les éléments bois, SAFIR permet l'étude d'éléments poutres en 2D et 3D. Les caractéristiques thermiques et les lois de comportement mécanique du matériau bois sont celles données dans l'Annexe B de la norme EN 1995-1-2 ([11]).

Les propriétés thermiques utilisées sont rappelées aux figures suivantes. Il est à noter que ces propriétés ne sont pas considérées comme réversibles en phase de refroidissement. Elles gardent la valeur correspondante au maximum de température atteint.

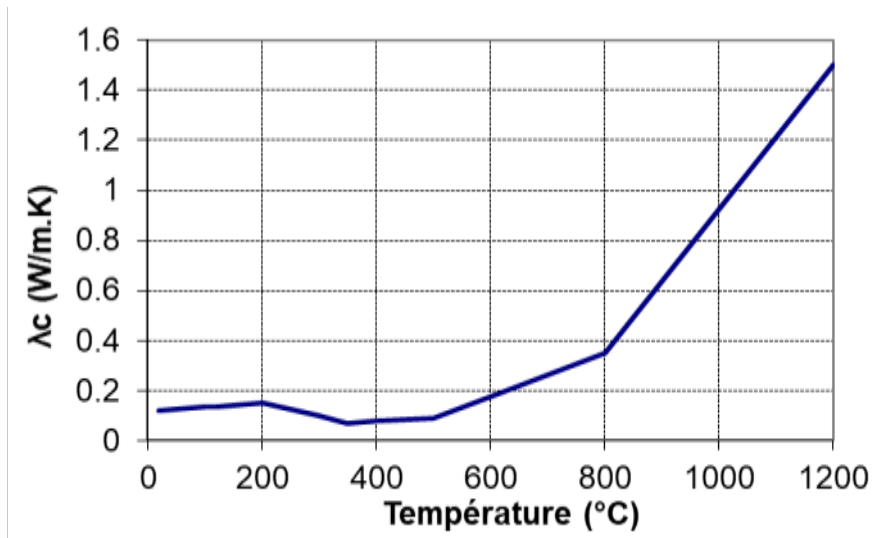


Figure 3-1 : SAFIR 2016 : Matériau bois – Conductivité prise en compte dans les calculs thermiques.

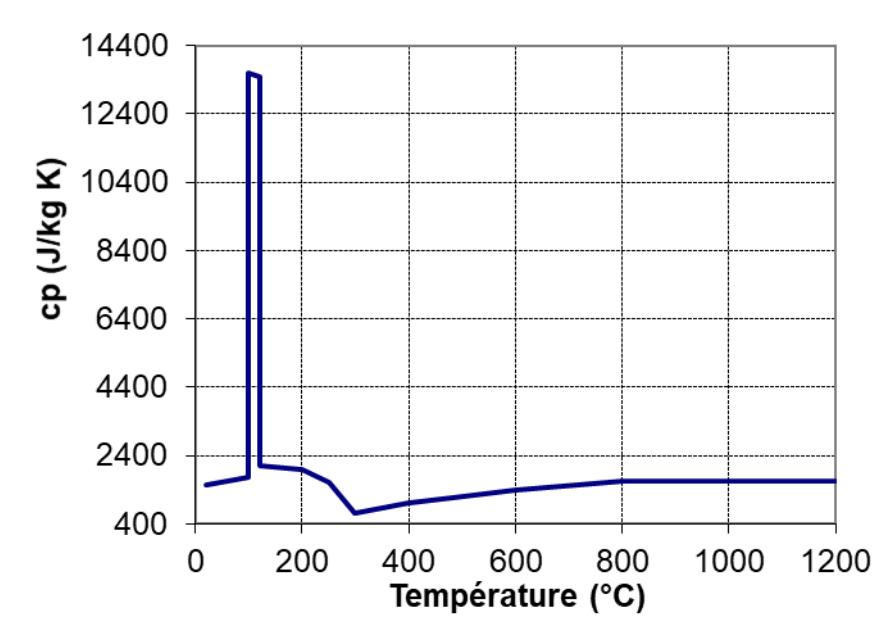


Figure 3-2 : SAFIR 2016 : Matériau bois – Chaleur spécifique prise en compte dans les calculs thermiques.

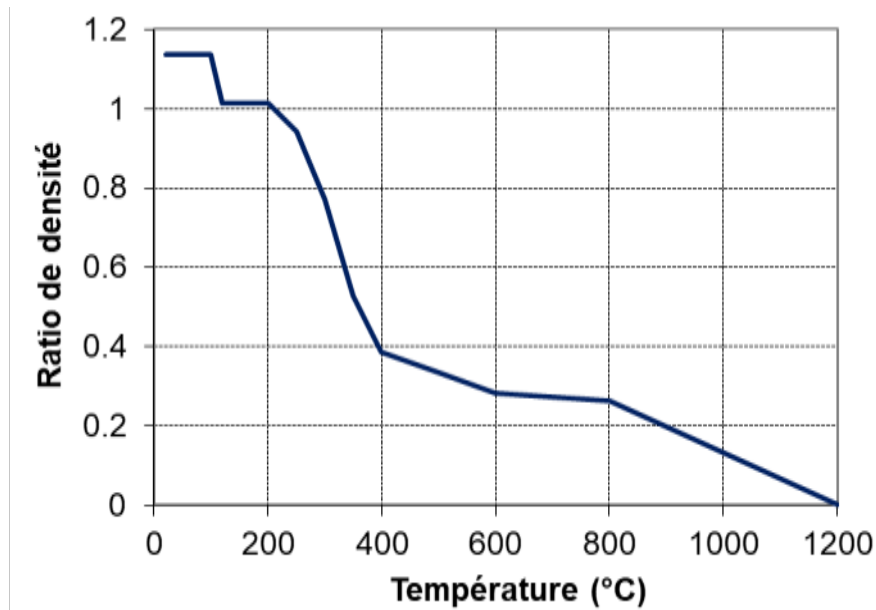


Figure 3-3 : SAFIR 2016 : Matériau bois – Rapport de densité ($\rho_{T^{\circ}C}/\rho_{20^{\circ}C}$) pris en compte dans les calculs thermiques pour un bois dont l'humidité initiale est de 12 %.

Les propriétés mécaniques du bois à indiquer dans le code de calcul SAFIR2016 sont le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la résistance en compression et la résistance à la traction du bois. Il est à noter que le module de cisaillement est calculé à partir du module d'élasticité comme pour un matériau isotrope. Le module de cisaillement est alors calculé suivant l'expression $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Ainsi, le coefficient de poisson doit être introduit de sorte à reproduire le module de cisaillement du bois, c'est-à-dire $\nu = \frac{E}{2G} - 1$.

Les résistances et le module d'élasticité commencent à décroître dès que les températures dépassent 20°C. Elles deviennent nulles à 300°C (300°C étant considérée comme l'isotherme utilisée pour déterminer la profondeur de carbonisation). Entre 20 et 300°C, des coefficients de réduction différents sont utilisés pour la résistance à la traction, à la compression ainsi que pour le module d'élasticité en traction et celui en compression. Le comportement du matériau n'est pas réversible pendant les phases de refroidissement. Conformément à la NF EN 1995-1-2, aucune variation dimensionnelle n'est prise en compte.

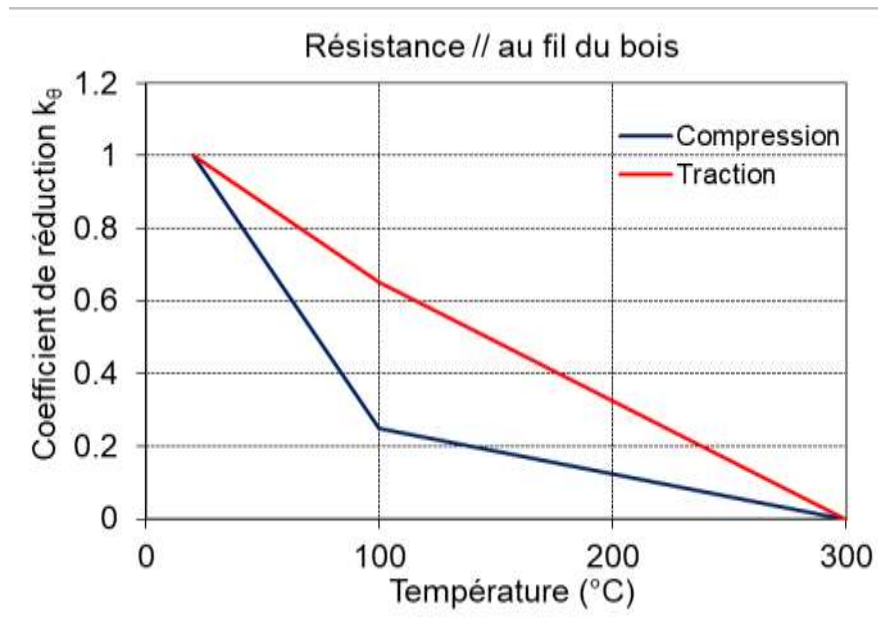


Figure 3-4 : SAFIR 2016 : Matériau bois – Facteur de réduction pour la résistance parallèle au fil du bois.

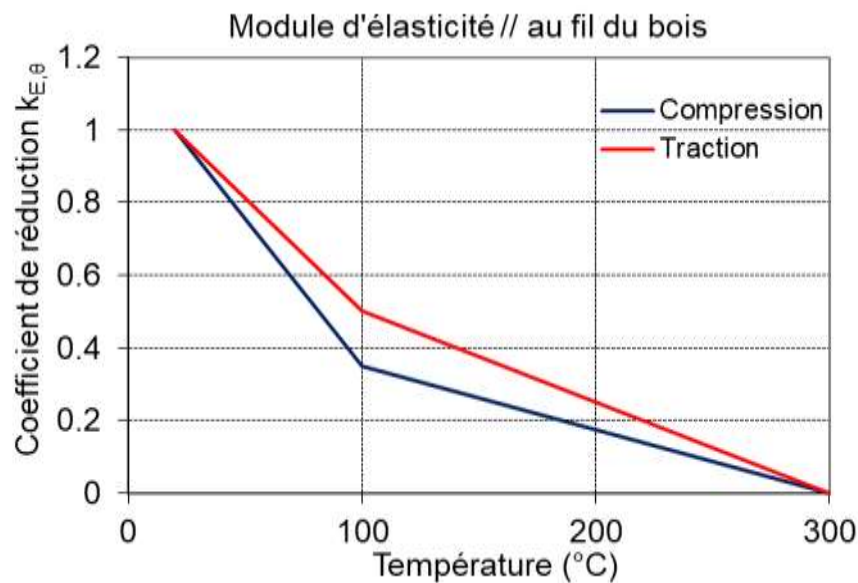


Figure 3-5 : SAFIR 2016 : Matériau bois – Rapport de densité ($\rho_{[T^{\circ}C]}/\rho_{[20^{\circ}C]}$) pris en compte dans les calculs thermiques pour un bois dont l'humidité initiale est de 12 %.

L'annexe B présente des comparaisons effectuées entre la méthode simplifiée de l'Eurocode 5 sous feu ISO et le calcul thermomécanique. Il apparaît que les résultats obtenus avec l'approche thermomécanique sont en général enveloppes (efforts résistants inférieurs au même temps d'exposition) de la méthode simplifiée de l'Eurocode.

3.2 APPROCHE PAR SECTION RÉDUITE

Selon la norme NF EN 1995-1-2, la méthode de la section réduite est applicable aux éléments de structure soumis à une action thermique décrite par la courbe nominale de la norme ISO-834.

Son principe se base sur l'évaluation de la section réduite en calculant une profondeur de carbonisation effective (d_{ef}) qui permet de prendre en compte la profondeur de carbonisation du bois ($d_{char,n}$) augmentée d'une épaisseur ($k_0 d_0$) permettant de déterminer le contour de section de résistance nulle. Le calcul de la résistance mécanique est réalisé, par la suite, pour la section réduite, selon les méthodes de calcul à température ambiante (voir §6.4 de la norme NF EN 1995-1-1[10]).

Pour une action thermique définie par la courbe nominale de l'ISO 834, la profondeur efficace de carbonisation est calculée d'après l'expression suivante :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = \beta_n t + k_0 d_0 \quad \text{[Équation 1]}$$

où :

- β_n est la valeur de vitesse de carbonisation fictive incluant l'effet des arrondis en coins et des fentes,
- t (min) est le temps d'exposition au feu,
- $d_0 = 7$ mm et $k_0 = 1$ pour $t > 20$ min.

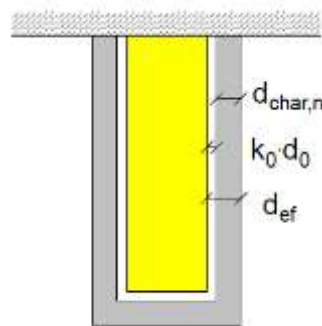


Figure 3-6 : Section résiduelle équivalente d'un élément de structure bois.

Pour une action thermique définie par un feu réel, on adopte la même démarche décrite ci-dessus en considérant une action thermique calculée à partir de scénarios d'incendie réel tels que définis au §4 et §5. Toutefois, des modifications sont à apporter aux paramètres conventionnels de calcul (vitesse et profondeur de carbonisation et épaisseur de résistance nulle). Ces actions thermiques sont différentes sur les quatre (ou les trois) faces de l'élément structural étudié (voir Figure 3-7). On obtient ainsi une profondeur de carbonisation pour chacune des faces exposées au feu. Dans un second temps, le calcul de l'épaisseur $k_0 d_0$ permet de trouver la section résiduelle à prendre en compte dans les vérifications selon les méthodes décrites dans la norme NF EN1995-1-1.

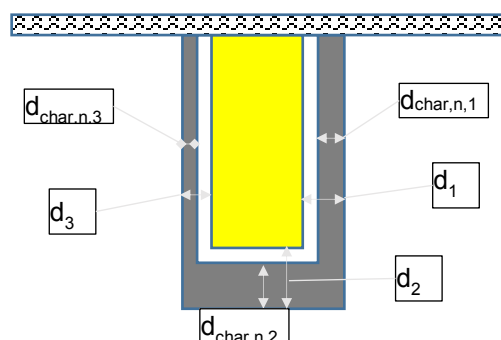


Figure 3-7 : Section résiduelle équivalente d'un élément de structure en bois pour une poutre soumise à une action thermique de feu réel sur trois faces.

Le calcul de la section réduite consiste à prendre en compte

- les différentes profondeurs de carbonisation d'une section ($d_{char,n,i}$), et
- une épaisseur complémentaire de résistance nulle déterminée par un calcul thermomécanique ($k_0 d_0$).

3.2.1 Calcul de la profondeur de carbonisation

Les méthodes de calcul avancées définies dans l'Annexe B de la norme NF EN 1995-1-2 sont appliquées pour déterminer les champs de température pendant toute la durée de la sollicitation thermique dans les différentes sections des éléments structuraux (modèle de réponse thermique). La profondeur de carbonisation de chacune des faces est définie par la position maximale de l'isotherme 300°C, température à laquelle le bois ne présente plus aucune résistance mécanique.

Il a été démontré ([3]) que les caractéristiques thermophysiques données par l'EN 1995-1-2 sont applicables et enveloppes pour une sollicitation thermique définie par des feux réels comme celles que l'on peut obtenir dans des logements ou des locaux de bureau. Ainsi, pour le calcul du transfert thermique dans les sections, on adopte les courbes données par les Figure 3-1 à Figure 3-3 issues de l'annexe B de l'EN1995-1-2 et équivalentes à celles implémentées dans SAFIR.

3.2.2 Procédure pour le calcul de la section équivalente en flexion

Le calcul de la section équivalente se base sur l'équilibre entre le moment de flexion à la rupture en situation d'incendie M_{fi} et le moment résistant de la section réduite calculé à température ambiante M_{ef} , tel que :

$$M_{fi} = M_{ef} \quad \text{[Équation 2]}$$

Dans le cas d'une poutre exposée sur quatre côtés, M_{ef} est calculé en considérant une hauteur efficace h_{ef} et une largeur efficace b_{ef} , tel que,

$$\begin{aligned} M_{ef} &= W_{ef} \cdot f_m \\ &= \frac{b_{ef} \cdot h_{ef}^2}{6} \cdot f_m \\ &= \frac{(b - (d_1 + d_3)) \cdot (h - d_2)^2}{6} \cdot f_m \end{aligned} \quad \text{[Équation 3]}$$

Lorsque la section est exposée sur quatre faces, le moment M_{ef} , s'écrit,

$$M_{ef} = \frac{(b - (d_1 + d_3)) \cdot (h - (d_2 + d_4))^2}{6} \cdot f_m \quad \text{[Équation 4]}$$

Le moment de flexion à la rupture en situation d'incendie M_{fi} est calculé en nous basant sur les méthodes avancées avec prise en compte de l'affaiblissement des caractéristiques thermomécaniques en fonction de la température (affaiblissement des résistances à la traction et à la compression ainsi que le module d'élasticité). Le calcul est à faire avec un logiciel aux éléments finis 2D en prenant en compte la température maximale obtenue dans chaque élément fini de la section durant la durée du scénario étudié. Ceci permet de considérer la non réversibilité de l'affaiblissement des propriétés thermomécaniques du bois en phase de refroidissement. Le champ de température maximal a été obtenu par un développement informatique en considérant les différents champs de températures en chaque instant de la sollicitation thermique.

Il est aussi possible de déterminer le moment M_{fi} en considérant un effort progressif sur la poutre (dont la section est échauffée selon la totalité de l'action thermique définie par le scénario d'incendie), ceci est rendu possible avec le logiciel SAFIR du fait qu'il considère la température maximale dans l'historique d'échauffement de chacune des fibres (maille de la section).

Les coefficients d'affaiblissement des propriétés thermomécaniques du bois en fonction de la température sont donnés dans la Figure 3-4.

Les valeurs locales de calcul des propriétés de rigidité et de résistance sont alors calculées pour chaque pas de temps de calcul selon les expressions,

$$f_{d,fi} = k_{\theta} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{[Équation 5]}$$

$$S_{d,fi} = k_{\theta} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{[Équation 6]}$$

où,

- $f_{d,fi}$ est la valeur de calcul d'une résistance en situation de feu ;
- $S_{d,fi}$ est la valeur de calcul d'une propriété de rigidité (module d'élasticité $E_{d,fi}$ ou module de cisaillement $G_{d,fi}$) en situation de feu ;
- f_{20} est le fractile à 20 % d'une propriété de résistance à température normale ;
- S_{20} est le fractile à 20 % d'une propriété de rigidité (module d'élasticité ou module de cisaillement) à température normale ;
- k_{θ} est le facteur de modification pour le feu défini en Annexe B du présent rapport ;
- $\gamma_{M,fi}$ est le coefficient partiel pour le bois en situation de feu.

Il est à noter que le moment résistant à chaud M_{fi} est ajusté par un coefficient $k_{modèle}$. Ce dernier permet d'obtenir l'équivalence des moments résistants entre :

- un calcul à chaud, selon la norme NF EN 1995-1-2, mais à 20°C avec la résistance à la traction et celle à la compression ($M_{Rd,1}$), et
- un calcul dans lequel l'on utilise la résistance à la flexion ($M_{Rd,2} = \frac{bh^2 f_m}{6}$).

Ainsi, on obtient $k_{modèle} = \frac{M_{Rd,2}}{M_{Rd,1}}$. Dans le cadre d'un calcul élastique, la résistance de la section en flexion

est limitée par la résistance à la traction f_t et donc $M_{Rd,1} = \frac{bh^2 f_t}{6}$ ce qui induit $k_{modèle} = \frac{f_m}{f_t}$.

3.2.3 Procédure pour le calcul de la section équivalente en compression

Le principe est sensiblement le même que celui pour la résistance en flexion. La détermination de l'épaisseur fictive $k_0 d_0$ est basée sur l'équilibre de la résistance à la compression en situation d'incendie N_{fi} et la résistance théorique de calcul N_{ef} en prenant en compte la section efficace et les caractéristiques de résistance à température ambiante tel que,

$$N_{fi} = N_{ef} \quad \text{[Équation 7]}$$

La résistance à la compression en situation d'incendie N_{fi} est déterminée par simulations numériques en se basant sur les méthodes de calcul avancées décrites dans la norme NF EN 1995-1-2.

La procédure pour le calcul de la section équivalente en traction est la même que celle décrite ci-avant, il suffit de remplacer f_c par f_t .

4. APPLICATION DES APPROCHES AU CAS DU BUREAU

On effectue la vérification de la structure vis-à-vis des actions thermiques de feu réel déterminées par les modèles de développement de feu avec la méthode 2 [2]. On peut ainsi obtenir les durées de stabilité au feu des portiques suivant les combinaisons d'actions, Il peut également être déduit des calculs thermiques les sections équivalente à différents instants (pour l'ensemble de l'action thermique, au temps de ruine...), suivant la procédure décrite au §3.2.

4.1 MODÉLISATION : HYPOTHÈSES

4.1.1 Généralités

Le portique, dimensionné à froid, est ensuite modélisé sur SAFIR en respectant les trames et les sections du dimensionnement à froid.

La non rectitude des poteaux est aussi prise en compte en introduisant une imperfection géométrique de 7,5 mm à mi-hauteur de chaque poteau. En plus, une inclinaison d'ensemble de $2,44 \times 10^{-3}$ rad est également introduite dans le modèle.

Les pieds de poteaux sont considérés articulés et la connexion des éléments est considérée parfaite.

Le calcul thermomécanique SAFIR se déroule en deux étapes ; la première concerne un calcul de transfert thermique dans toutes les sections exposées à l'action thermique et la seconde est relative à un calcul thermomécanique utilisant l'évolution des caractéristiques mécaniques intrinsèques du bois en fonction de la température.

4.1.2 Hypothèses de chargement

Les charges appliquées au dimensionnement à froid sont utilisées dans cette étude en situation d'incendie.

4.1.3 Combinaisons d'actions

Les combinaisons étudiées sont les combinaisons FEU mentionnées dans l'Eurocode 1 partie 1-2 [7], à savoir :

$$\begin{array}{ll} \text{Comb Feu 1 [C1]} : & G + 0,5 Q \\ \text{Comb Feu 2 [C2]} : & G + 0,2 W + 0,3 Q \end{array}$$

4.1.4 Coefficients partiels de sécurité

Les coefficients suivants sont utilisés :

- $\gamma_{M,fi} = 1,00$ (pour le bois lamellé-collé)
- $k_{mod,fi} = 1$

4.1.5 Transfert thermique au sein des sections

Le calcul de transfert thermique au sein des sections est réalisé à l'aide de SAFIR avec un coefficient de convection de $h=35 \text{ W/m}^2\text{K}$ en face exposée.

L'émissivité de la surface du bois est prise égale à 0,8.

La température adiabatique de surface est utilisée comme donnée d'entrée pour le calcul [2].

4.1.6 Scénarios de feu - Bureaux

L'étude de la stabilité au feu de l'ouvrage R+6 est basée sur la prise en compte de plusieurs scénarios de feu :

- Scénario Bureau 1 : incendie se développant sur la largeur du niveau 1, impactant tous les éléments du portique à ce niveau.
- Scénario Bureau 2 : incendie se développant sur la largeur du niveau 3, impactant tous les éléments du portique à ce niveau.
- Scénario Bureau 3 : incendie se développant sur la largeur du niveau 5, impactant tous les éléments du portique à ce niveau.

On présente pour le cas du bureau l'étude relative à deux scénarios de feu. Dans le premier cas, les parois du local sont considérées incombustibles (cas 1), dans le second cas, seule une paroi est considérée comme combustible. Ce dernier cas (cas 2) a conduit suivant certaines hypothèses, à l'extinction du bois avec la diminution de la puissance du foyer primaire.

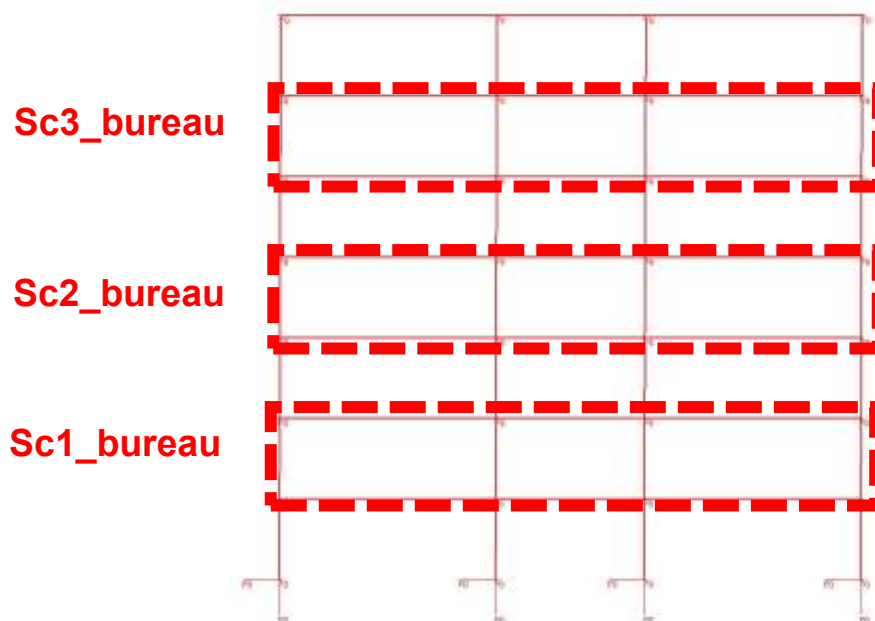


Figure 4-1 : Scénarios de feu étudiés – Cas du feu de bureau

Ces scénarios de feu ont été simulés par un logiciel de simulation de dynamique des fluides (FDS) afin de déterminer la sollicitation thermique reçue par les différents éléments de structure. Elle sera introduite dans le modèle thermomécanique SAFIR en tant que donnée d'entrée. Les températures prises en compte sont extraites du rapport [2].

4.2 FEU DE BUREAU - CAS 1 : CAS SANS CONTRIBUTION DU BOIS

4.2.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas sans contribution du bois

Les courbes de feu utilisées pour traiter ce cas sont celles issues du scénario où toutes les parois du local sont considérées incombustibles.

Les figures suivantes présentent les températures adiabatiques appliquées sur les éléments de structure pour ce scénario de feu. Les différentes courbes représentent les sorties effectuées sur FDS. La courbe en trait gras rouge correspond à la courbe retenue pour l'analyse avec le modèle thermomécanique SAFIR. On note que pour les poteaux on distingue 4 actions thermiques différentes en fonction de la hauteur de la zone exposée.

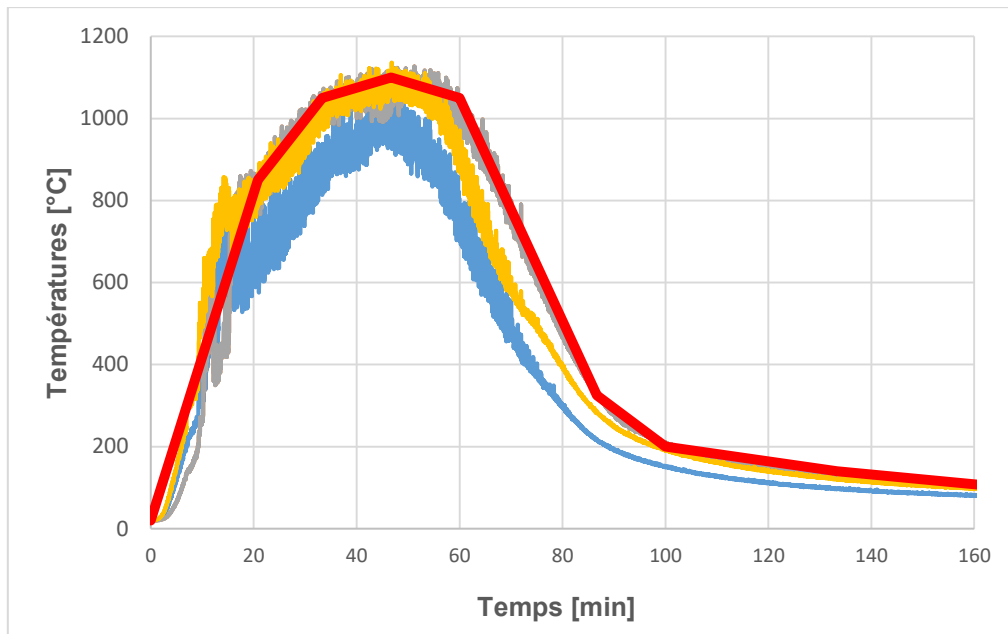


Figure 4-2 : Température adiabatique pour les poteaux entre 0 et 0,75 m

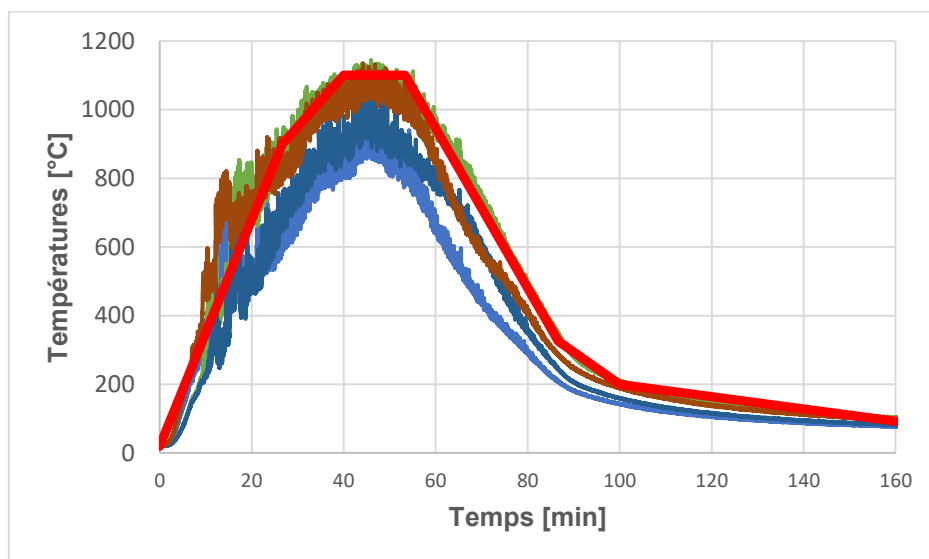


Figure 4-3 : Température adiabatique pour les poteaux entre 0,75 et 1,5 m

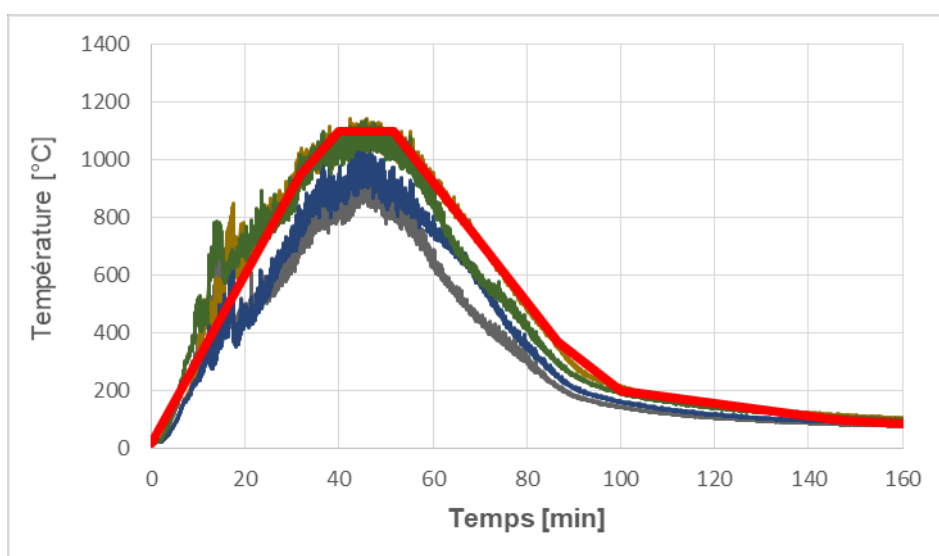


Figure 4-4 : Température adiabatique pour les poteaux entre 1,5 et 2,25 m

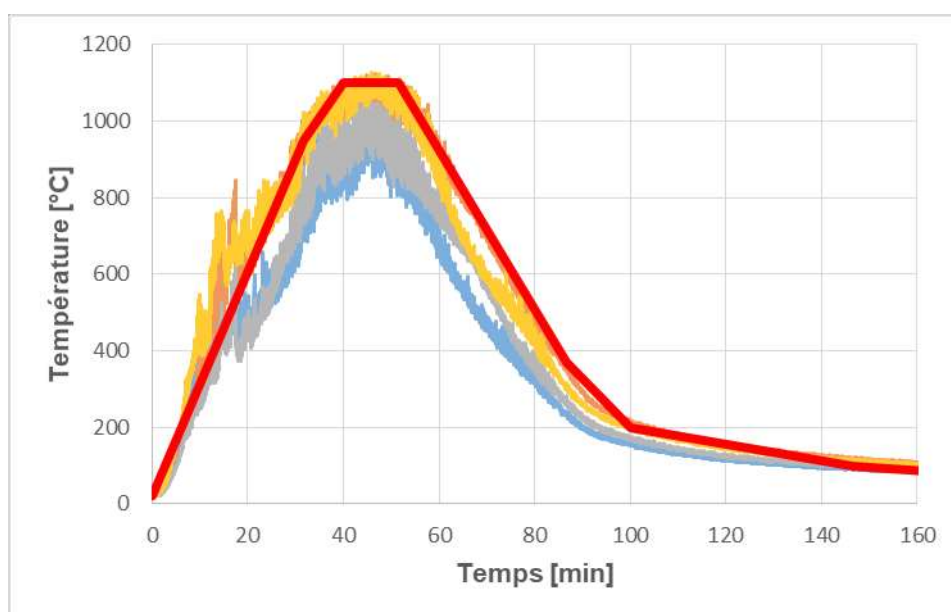


Figure 4-5 : Température adiabatique pour les poteaux entre 2,25 et 3 m et les poutres

4.2.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant. On note une rupture au niveau des poteaux intérieurs dans les deux cas.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : G + 0,5 Q	85
C2 : G + 0,2 W + 0,3 Q	78

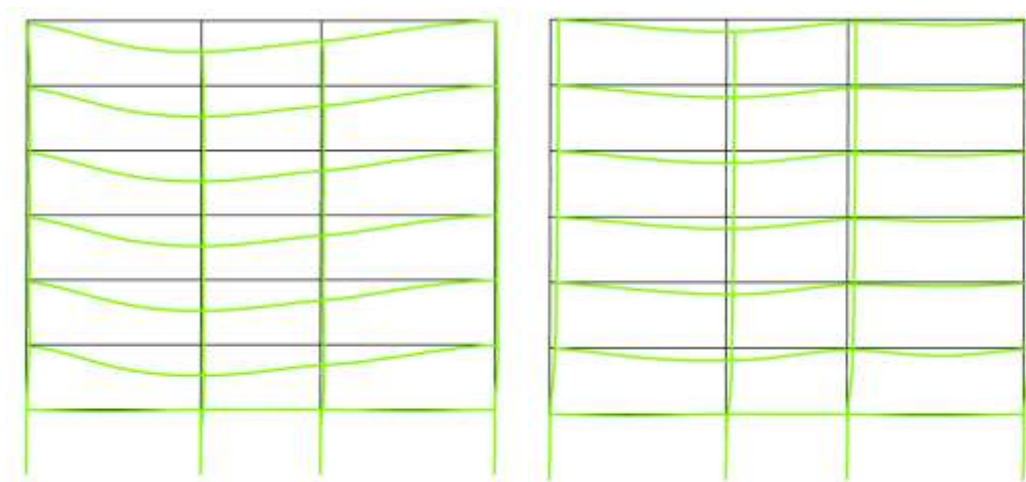


Figure 4-6 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x10)

4.2.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant.

Sous la première combinaison, on note que la ruine intervient par rupture d'une des poutres principales alors que dans le cas de la combinaison avec le vent, il s'agit du flambement d'ensemble du niveau.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	80
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	75

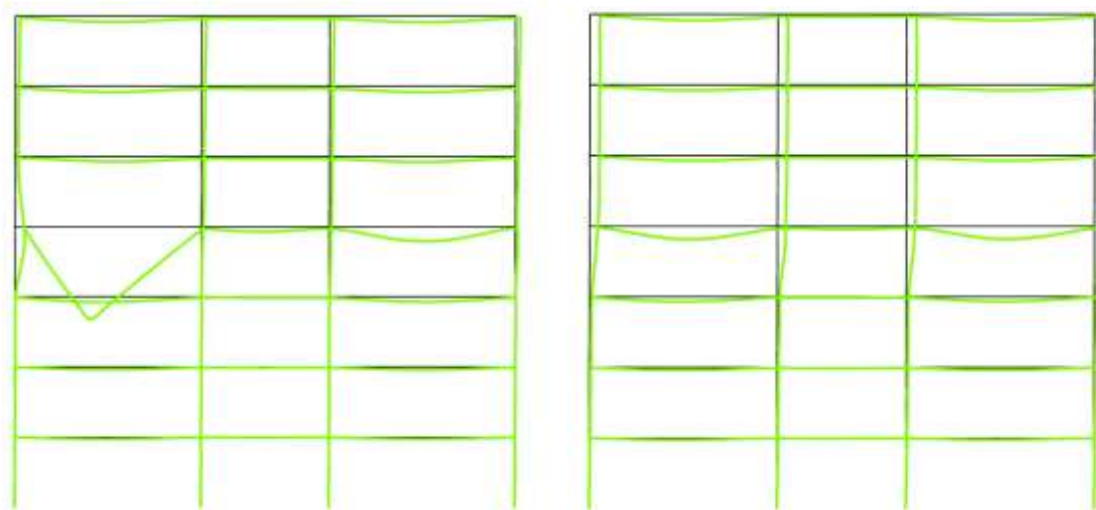


Figure 4-7 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

À titre de comparaison, le cas du feu au niveau R+3 a été traité sous feu conventionnel (action thermique suivant la courbe ISO 834). On note que les modes de ruine sont similaires bien que les durées de stabilité soient plus faibles.

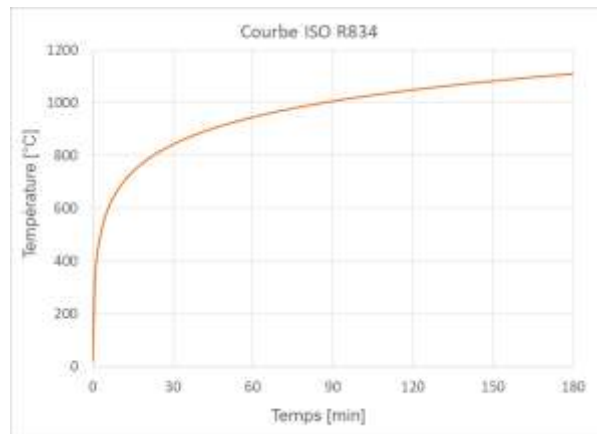


Figure 4-8 : Action thermique – feu normalisé ISO 834

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : G + 0,5 Q	93
C2 : G + 0,2 W + 0,3 Q	94

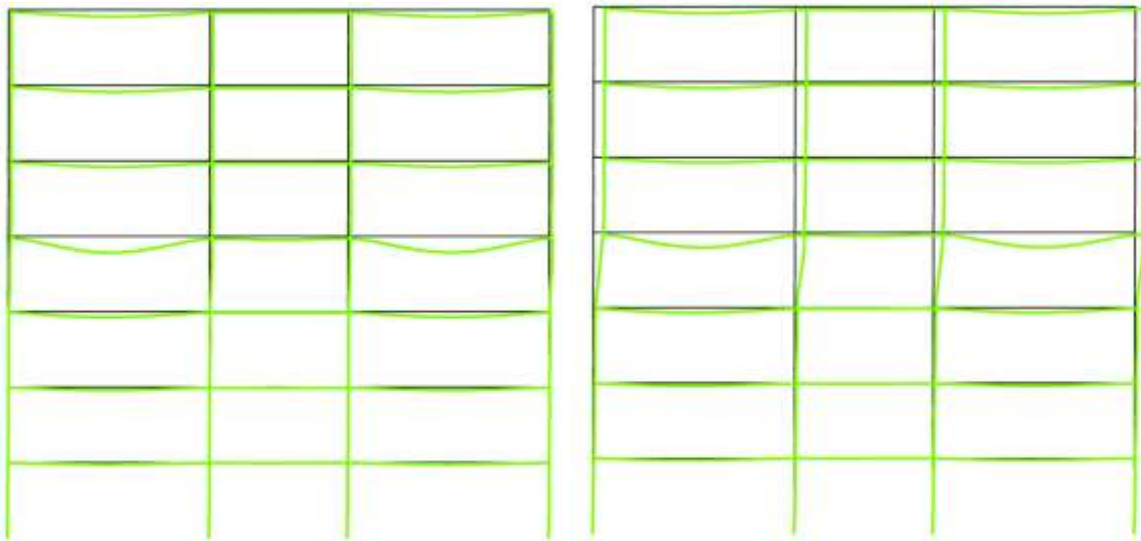


Figure 4-9 : Feu ISO au R+3 - Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x10)

4.2.3.1 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5

Sous la première combinaison, on note que la ruine intervient par rupture des poutres principales alors que dans le cas de la combinaison avec le vent, il s'agit du flambement d'ensemble du niveau.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : G + 0,5 Q	81
C2 : G + 0,2 W + 0,3 Q	89

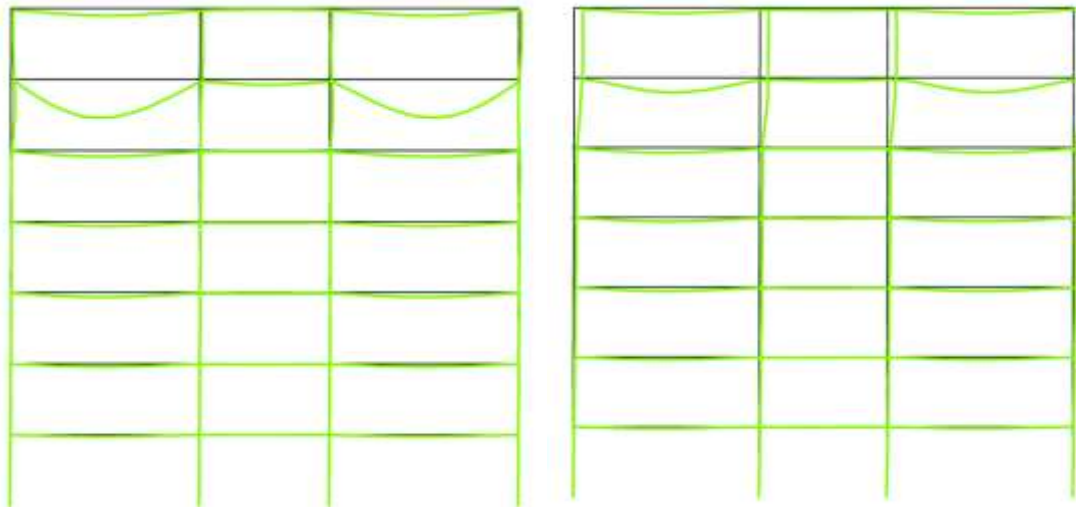


Figure 4-10 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

4.2.3.1 Détermination des sections efficaces

Connaissant le temps de ruine du portique et l'historique de la distribution de température au sein des différentes sections de bois échauffées, il est possible de déterminer leurs sections efficaces homogènes équivalentes à froid correspondant à cette durée.

Pour ce faire, on calcule le moment résistant d'un élément échauffé à l'aide de SAFIR et on détermine la profondeur de carbonisation efficace ($d_{ef} = d_{char} + k_0 d_0$) pour chaque face (CF §3.2). On effectue ce calcul pour la combinaison de charge ayant mené à la ruine la plus précoce.

Il est à noter que pour la poutre continue exposée sur 3 faces, deux sections efficaces doivent être calculées, selon que la fibre tendue soit en partie inférieure (cas à mi travée) ou en partie supérieure (cas sur appui de continuité).

Ces sections efficaces équivalentes correspondent au temps de ruine calculé. Ainsi, elles dépendent du chargement global appliqué à l'ensemble de la structure. Il est à noter que ces sections équivalentes ne correspondent à la section efficace « critique » que de l'élément le plus faible (c'est-à-dire juste avant ruine de l'élément structurel faible).

Les sections efficaces des poutres et des poteaux sont présentées dans le tableau suivant. Les poteaux étant exposés sur 4 faces de manière homogène, leur section reste carrée. Les résultats sont présentés en fonction de la combinaison ACC - FEU étudiée. Ces sections peuvent être réutilisées pour effectuer des vérifications complémentaires sur le modèle de dimensionnement « à froid ».

On calcule également les sections équivalentes obtenues après toute la durée de la sollicitation thermique. Les sections obtenues sont indiquées dans la colonne « t infini ».

Sections ini.	Elément – Feu R+1	Section efficace (mm ²)	
		C2 : t = 78 min	t _∞
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	160x378	124x355
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	166x351	137x293
350	Poteau partie basse	179	140
350	Poteau partie moyenne basse	183	146
350	Poteau partie moyenne haute	188	149
350	Poteau partie haute	188	149

Sections ini.	Elément – Feu R+3	Section efficace (mm ²)	
		C2 : t = 75min	t _∞
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	144x330	108x302
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	150x305	120x241
320	Poteau partie basse	152	115
320	Poteau partie moyenne basse	158	121
320	Poteau partie moyenne haute	162	124
320	Poteau partie haute	162	124

Sections ini.	Elément – Feu R+5	Section efficace (mm ²)	
		C1 : t = 93 min	t _∞
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	138x325	108x302
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	144x297	120x241
300	Poteau partie basse	126	99
300	Poteau partie moyenne basse	131	105
300	Poteau partie moyenne haute	136	108
300	Poteau partie haute	136	108

Tableau 4-1 : Feu de bureau sans contribution du bois– Sections efficaces des éléments au moment de la ruine.

On effectue également le calcul de la section équivalente des éléments après 94 minutes de feu normalisé (durée de stabilité au feu des portiques du R+3 sous action thermique ISO 834). Les résultats obtenus sont présentés ci-après. Ces valeurs nous permettent de déterminer une vitesse de carbonisation fictive $\beta_{n,SAFIR}$ qui peut être comparée à celle donnée par l'Eurocode.

Sections ini.	Elément – Feu R+5	Section efficace (mm ²)	$\beta_{n,SAFIR}$ (mm/min)	$\beta_{n,EC5}$ (mm/min)
		ISO : t = 94 min		
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	140x324	0,73 à 0,78	0,7
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	145x300	0,75 à 0,98	
320	Poteau partie basse	157	0,8	

Tableau 4-2 : Feu normalisé au R+3 – Sections efficaces des éléments au moment de la ruine et vitesse de carbonisation fictive associée.

On note que l'action thermique issue de l'analyse sous feu réel est beaucoup plus contraignante que l'action thermique normalisée tant en terme de sévérité que de durée. Ainsi, la section réduite équivalente obtenue sous feu normalisé après 94 minutes est obtenue après 75 minutes de feu réel. On notera également que l'analyse sous feu normalisé par calcul thermomécanique conduit à des vitesses de combustion plus rapide que celles données dans l'Eurocode 5.

Avec les dimensions initiales des éléments structuraux, la structure est R90. Pour assurer la stabilité au feu « infinie » de la structure sous feu réel au R+3 (ici avec parois incombustibles), les sections devraient être augmentées. On peut estimer cette surépaisseur à 37 mm pour les poteaux (poteaux 357x357 mm²) et à 36 mm en largeur pour les poutres et 64 mm en hauteur (poutres 336x464 mm²)

4.3 FEU DE BUREAU – CAS 2 : CAS DU BUREAU AVEC UNE SEULE PAROI COMBUSTIBLE

4.3.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas avec une seule paroi combustible

Les courbes de feu utilisées pour traiter ce cas sont celles issues du scénario où seule une paroi est considérée combustible (représentant 17% de la surface totale de parois). On notera que ce cas ne conduisait pas à une sous-oxygénation du foyer assurant des résultats d'agressions thermiques cohérent avec l'apport de la contribution.

Les figures suivantes présentent les températures adiabatiques appliquées sur les éléments de structure pour ce scénario de feu. La courbe en trait gras rouge correspond à la courbe retenue pour l'analyse avec le modèle thermomécanique SAFIR. On note que pour les poteaux on distingue 4 actions thermiques différentes en fonction de la hauteur de la zone exposée.

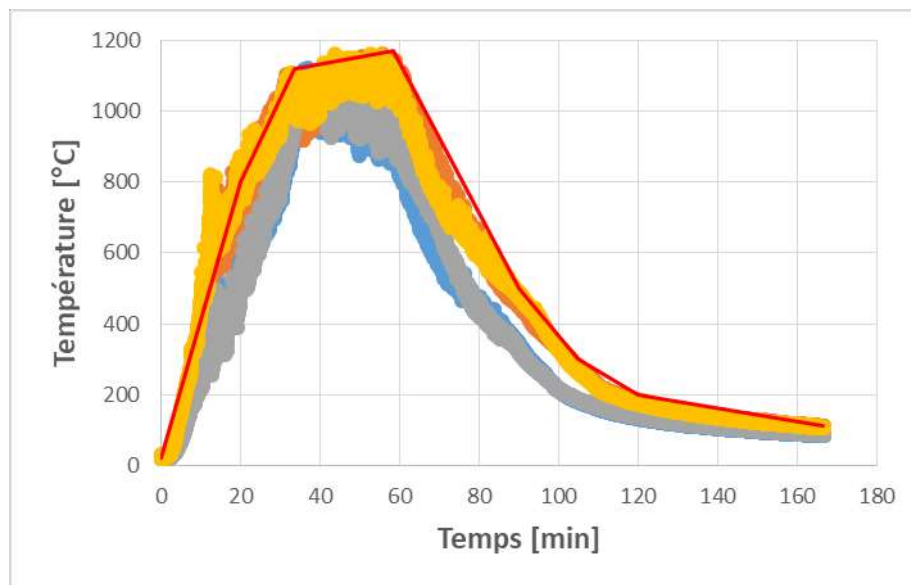


Figure 4-11 : Température adiabatique pour les poteaux entre 0 et 0,75 m

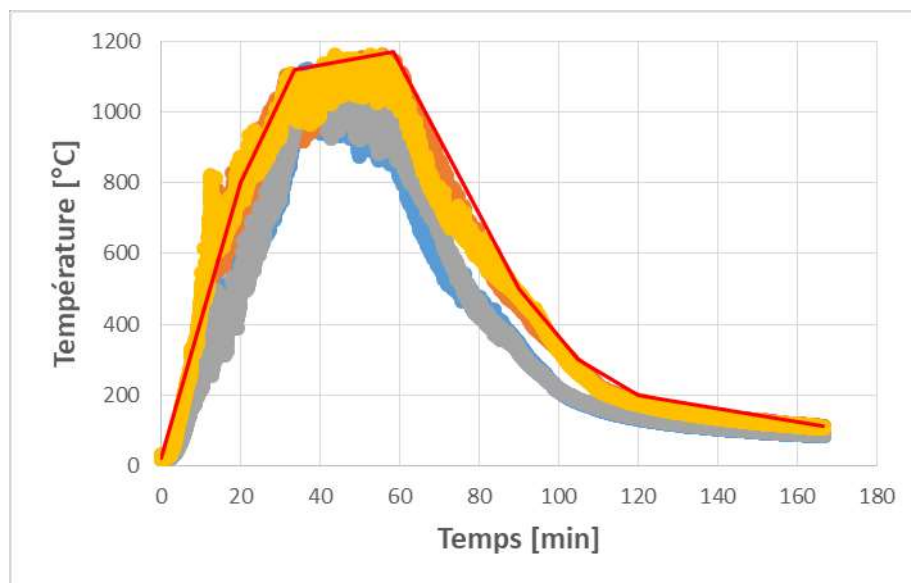


Figure 4-12 : Température adiabatique pour les poteaux entre 0,75 et 1,5 m

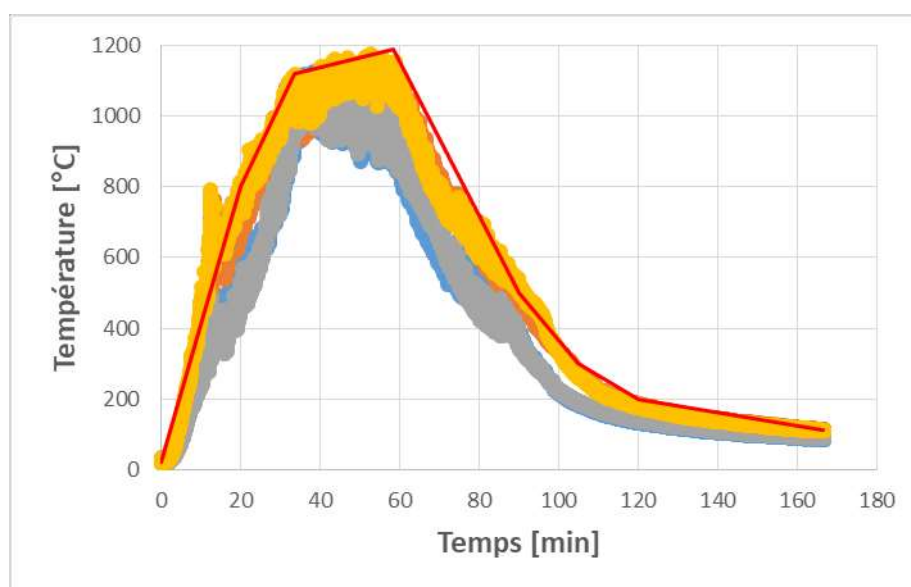


Figure 4-13 : Température adiabatique pour les poteaux entre 1,5 et 2,25 m

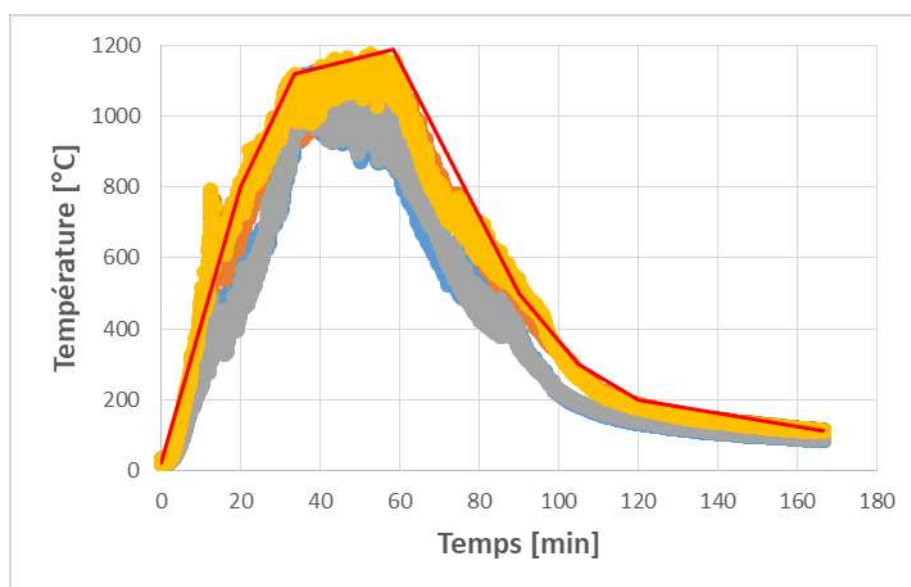


Figure 4-14 : Température adiabatique pour les poteaux entre 2,25 et 3 m et les poutres

4.3.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant. Dans le cas de la combinaison C1, on note une rupture au niveau des poteaux intérieurs dans les deux cas.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : G + 0,5 Q	76
C2 : G + 0,2 W + 0,3 Q	70

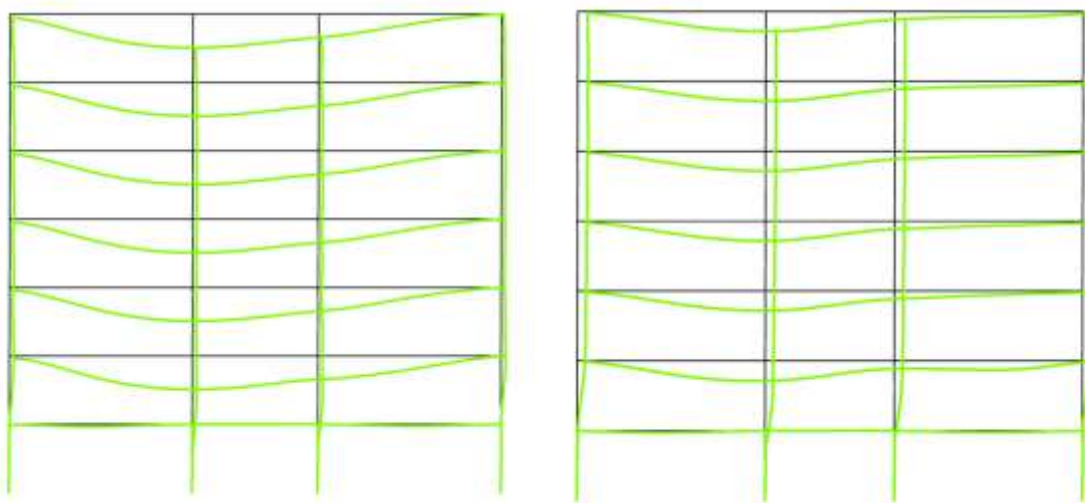


Figure 4-15 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

4.3.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3

On note que la ruine intervient par rupture d'une des poutres principales dans le premier cas alors que dans le cas de la combinaison avec le vent, il s'agit du flambement d'un des poteaux intérieurs.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	65
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	67

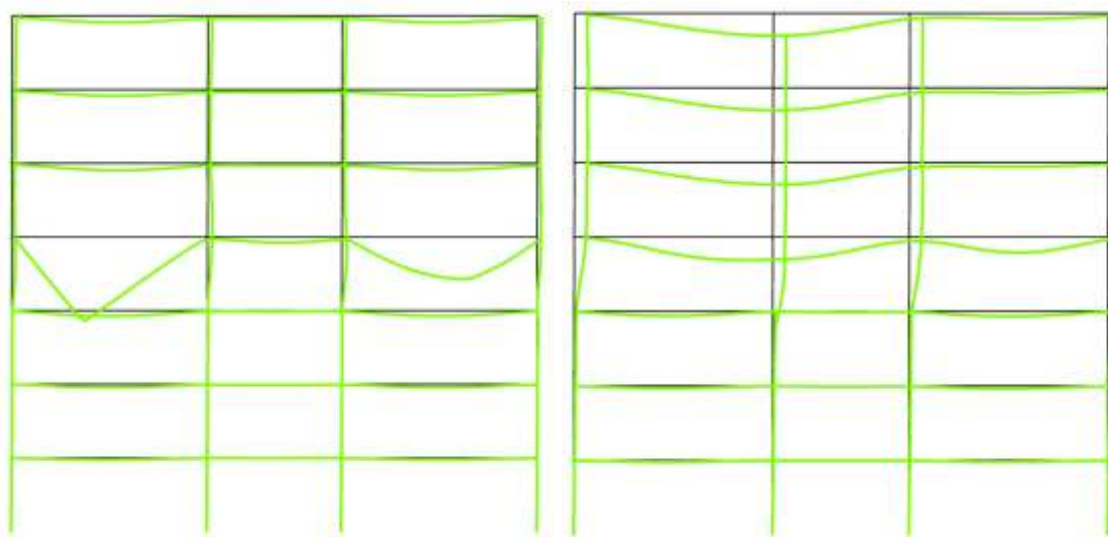


Figure 4-16 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

4.3.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5

Dans les deux cas la ruine intervient au niveau des poutres principales des deux travées d'extrémités.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	66
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	89

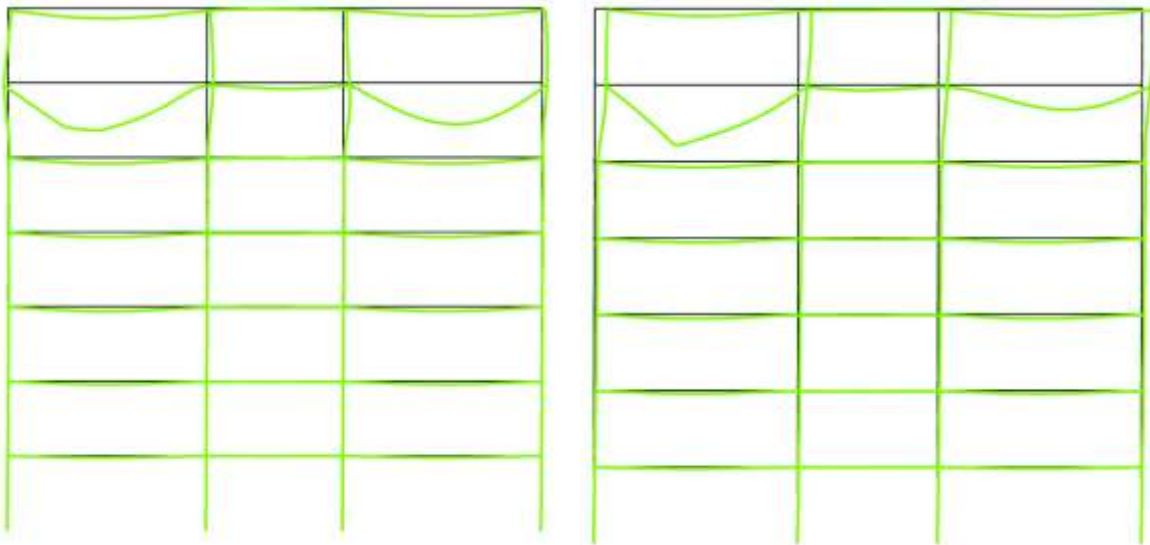


Figure 4-17 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

4.3.5 Détermination des sections efficaces

On détermine les sections efficaces homogènes équivalentes pour chacun des cas présentés précédemment, pour la combinaison de charge conduisant à la ruine la plus précoce. On calcule également la section efficace après toute la durée de l'action thermique. À partir de cette valeur, on peut estimer la surépaisseur de bois à mettre en œuvre pour assurer la stabilité au feu des éléments pendant toute la durée du feu. Ces surépaisseurs (ΔH : épaisseur supplémentaire à ajouter sur la hauteur et ΔB : épaisseur supplémentaire à ajouter sur la largeur) sont indiquées dans les tableaux de résultats suivants.

Sections ini.	Élément – Feu R+1	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C2 $t = 70 \text{ min}$	t_{∞}		
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	160x378	95x320	58	65
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	166x351	106x262	89	60
350	Poteau partie basse	179	126	53	53
350	Poteau partie moyenne basse	183	108	75	75
350	Poteau partie moyenne haute	188	117	71	71
350	Poteau partie haute	188	117	71	71

Sections ini.	Élément – Feu R+3	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C1 $t = 65 \text{ min}$	t_{∞}		
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	139x326	79x261	65	60
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	145x299	88x214	85	57
350	Poteau partie basse	147	102	45	45
350	Poteau partie moyenne basse	152	94	58	58

350	Poteau partie moyenne haute	156	93	63	63
350	Poteau partie haute	157	93	64	64

Sections ini.	Elément – Feu R+5	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C1 <i>t</i> = 66 min	<i>t</i> ∞		
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	138x325	80x261	64	58
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	144x297	88x214	83	56
350	Poteau partie basse	126	86	40	40
350	Poteau partie moyenne basse	131	79	52	52
350	Poteau partie moyenne haute	136	77	59	59
350	Poteau partie haute	136	77	59	59

Tableau 4-3 : Feu de bureau sans contribution du bois– Sections efficaces des éléments au moment de la ruine.

4.4 SCÉNARIOS DE FEU DE BUREAUX : CONCLUSIONS

Deux cas ont été étudiés :

- Cas 1 : sans contribution du bois.
- Cas 2 : Une seule paroi combustible, conduisant à une extinction lors de la phase décroissante de la puissance du foyer primaire.

On constate que l'apport de charge combustible dans ce cas conduit à des sollicitations thermiques plus fortes et par conséquent des durées de stabilité plus faibles que dans le cas où les parois ne sont pas contributives du foyer.

Il faut noter que l'approche par feu réel, même toutes parois incombustibles (sans contribution), est également plus contraignante que le feu ISO pendant 90 minutes.

La surépaisseur de bois à mettre en œuvre pour assurer la stabilité pendant toute la durée de l'action thermique a été estimée dans le cas 2. Au maximum, pour les poutres, elles sont de +89 mm en hauteur et +65 mm en largeur. Pour les poteaux, les sections doivent être augmentés de 75 mm au maximum.

Dans le cas du feu de bureau, on a considéré que l'ensemble des éléments du niveau étaient sollicités. Dans notre configuration où la structure est à nœuds déplaçables, cela permet de prendre en compte le flambement d'ensemble éventuel de la structure. Il est à noter que cela peut également être apprécié dans le modèle de calcul utilisé « à froid » dans lequel les sections réduites calculées sont insérées, ainsi que les propriétés des matériaux et les charges en situation d'incendie.

5. APPLICATION DES APPROCHES AU CAS DU LOGEMENT

5.1 MODÉLISATION : HYPOTHÈSES

5.1.1 Hypothèses générales, chargement etc...

Les hypothèses générales, de chargement et de transfert thermique sont identiques à celles du cas du bureau (CF §4.1.1 à 4.1.5).

5.1.2 Scénarios de feu - Logements

L'étude de la stabilité au feu de l'ouvrage R+6 est basée sur la prise en compte de plusieurs scénarios de feu :

- Scénario Logement 1 : incendie se développant dans un appartement situé au niveau 1. Seule la première travée du portique est impactée (poutre et poteaux)
- Scénario Logement 2 : incendie se développant dans un appartement situé au niveau 3. Seule la première travée du portique est impactée (poutre et poteaux)
- Scénario Logement 3 : incendie se développant dans un appartement situé au niveau 5. Seule la première travée du portique est impactée (poutre et poteaux)

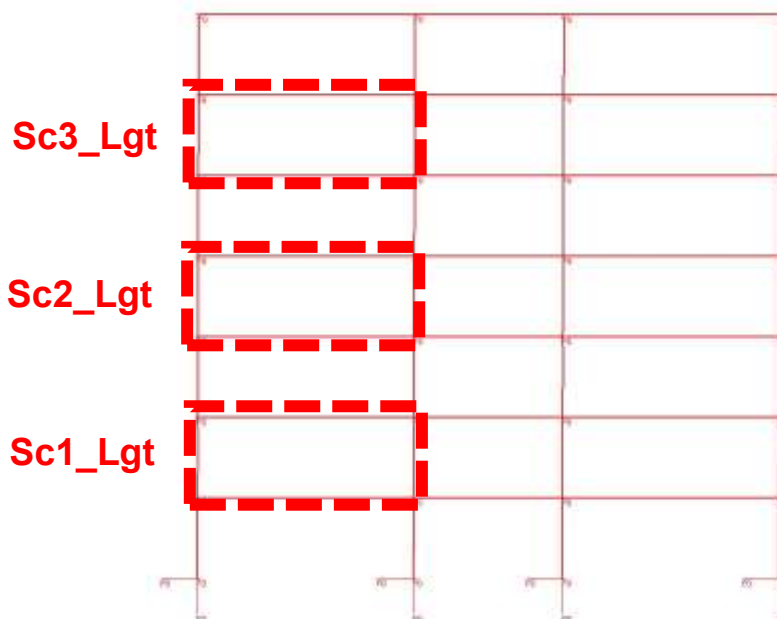


Figure 5-1 : Scénarios 1, 2 et 3

Ces scénarios de feu ont été simulés dans un logiciel de simulation de dynamique des fluides (FDS) afin de déterminer la sollicitation thermique reçue par les différents éléments de structure et qui sera implémenté dans le modèle thermomécanique SAFIR.

Les températures prises en compte sont extraites du rapport [2] pour le cas avec contribution du bois des parois et du plafond (nommé cas 1 ci-après) et le cas avec contribution de deux parois seulement (nommé cas 2 ci-après). Il s'agit des résultats obtenus avec la méthode 2.

5.2 FEU DE LOGEMENT - CAS 1 : CAS SANS AUTO EXTINCTION

5.2.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas sans auto-extinction

Les figures suivantes présentent les températures adiabatiques appliquées sur les éléments de structure pour ce scénario de feu. Les différentes courbes représentent les sorties effectuées sur FDS. La courbe en trait gras rouge correspond à la courbe retenue pour l'analyse avec le modèle thermomécanique SAFIR. Ce scénario d'incendie correspond à la combustion de l'ensemble du combustible dans le local. Dans ces conditions, une stabilité au feu infinie ne peut être atteinte. On examine la durée de stabilité de l'ouvrage au regard des actions thermiques déterminées par les modèles de feu. Comme la ruine des portiques interviendra avant l'extinction du foyer, les courbes de températures n'ont pas été prolongées jusqu'à l'épuisement du combustible.

Les températures sont très homogènes sur la hauteur des poteaux pris en compte pour le calcul thermomécanique. Cela vient principalement du fait que ces poteaux sont décalés latéralement par rapport à la baie et sont par conséquent peut impactés par les apports d'air frais.

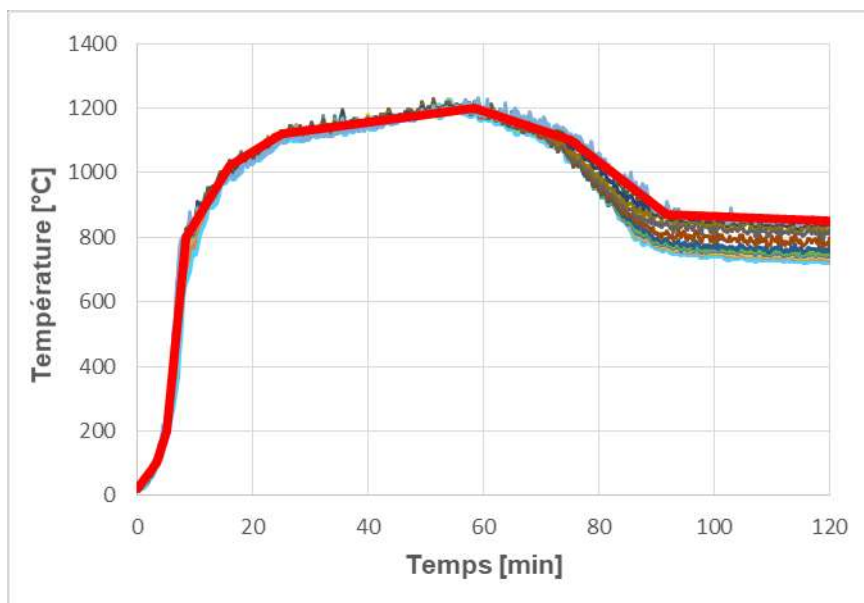


Figure 5-2 : Température adiabatique appliquée sur le poteau intérieur.

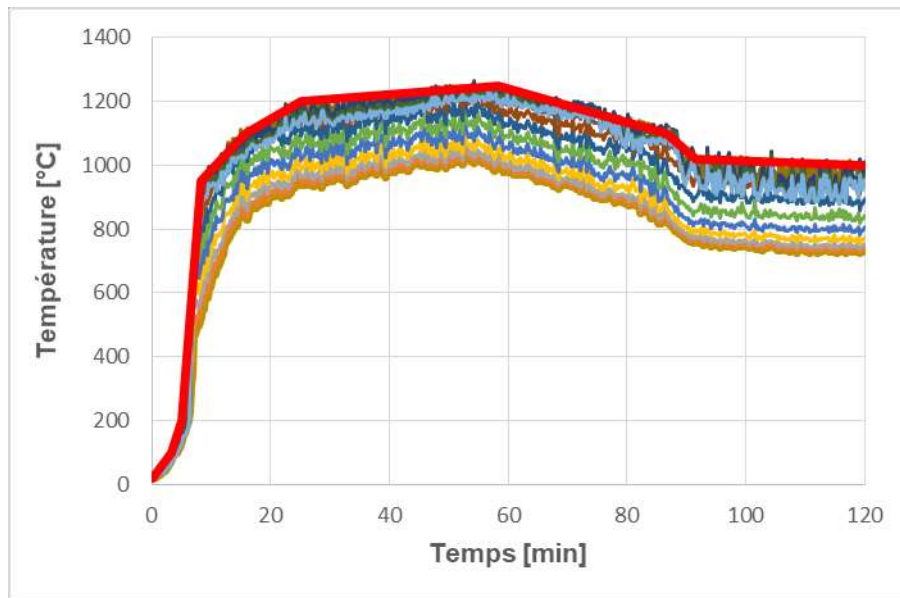


Figure 5-3 : Température adiabatique appliquée sur le poteau de façade.

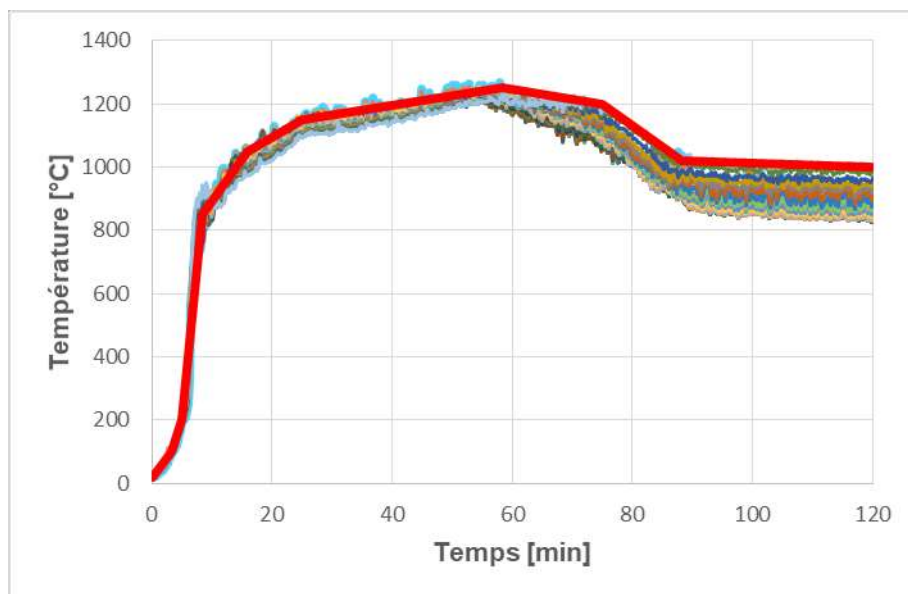


Figure 5-4 : Température adiabatique appliquée sur la poutre exposée.

5.2.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+1

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant. Dans les deux cas, on note une rupture au niveau du poteau intérieur exposé. En effet, dans ce cas, sur le niveau sollicité, le portique non exposé permet d'assurer le contreventement en situation d'incendie. La structure échauffée travaille alors davantage comme une structure à nœuds non déplaçables. Cette prise en compte est possible du fait de la modélisation de la totalité du portique.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : G + 0,5 Q	70

C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	73
--------------------------	----

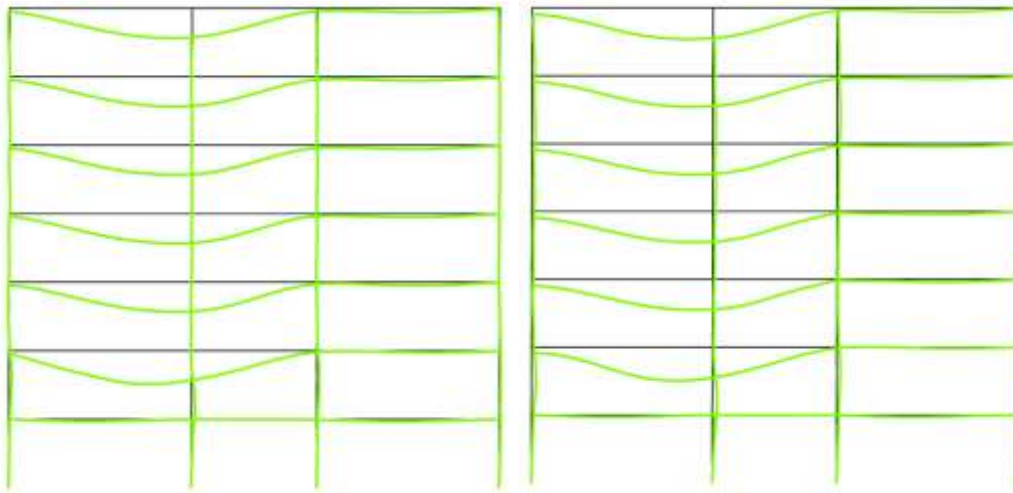


Figure 5-5 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

On présente pour la combinaison C2 l'allure du diagramme des moments à $t=0$, ainsi que celui juste avant la ruine des poteaux (les éléments échauffés sont repérés en rouge). On constate bien la redistribution des efforts transversaux vers les parties froides présentant une plus grande raideur au moment de la ruine (les moments dans les poteaux échauffés du R+1 diminuent avec leur perte de section).

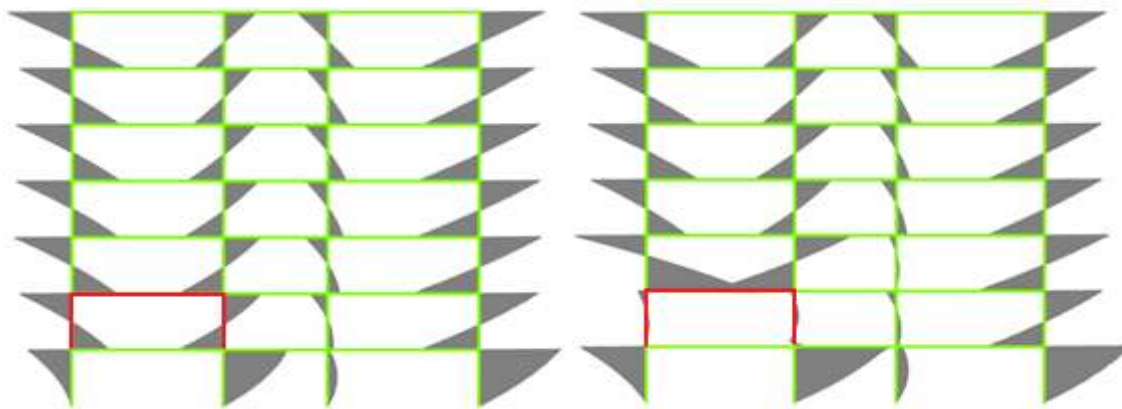


Figure 5-6 : Diagramme des moments des poteaux à $t=0$ (gauche) et au moment de la ruine (droite)

5.2.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3

Les temps de ruine sont présentés dans le tableau suivant. Comme dans le cas précédent, la ruine intervient du fait de la rupture de la poutre du portique exposé.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	51
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	55

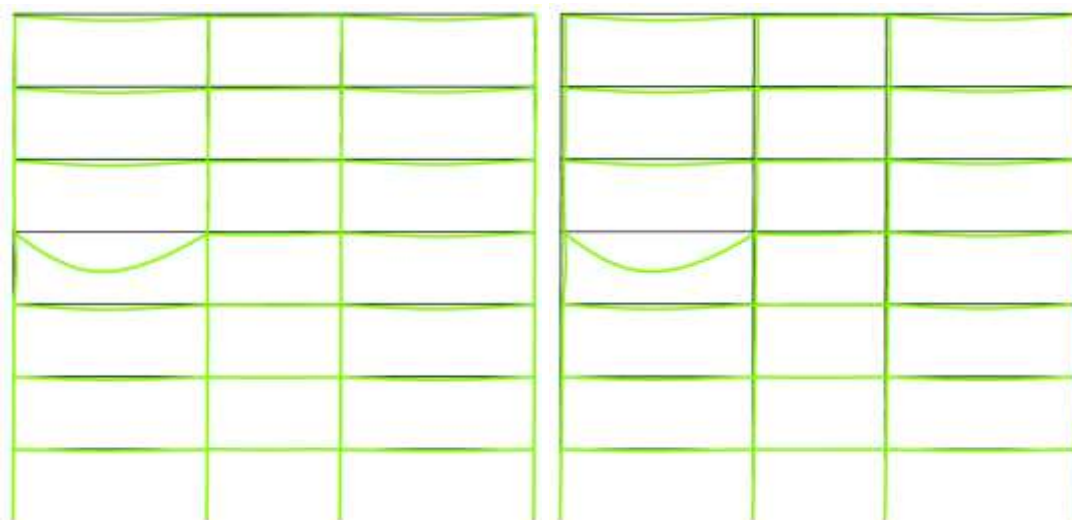


Figure 5-7 : Déformations maximale au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

Le cas du feu au R+3 a également été traité sous feu normalisé. Les résultats sont donnés ci-après. On note que dans ce cas, les durées de stabilité au feu sous feu réel sont bien plus faibles que celles sous feu normalisé, du fait de la sévérité de l'action thermique.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	95
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	101

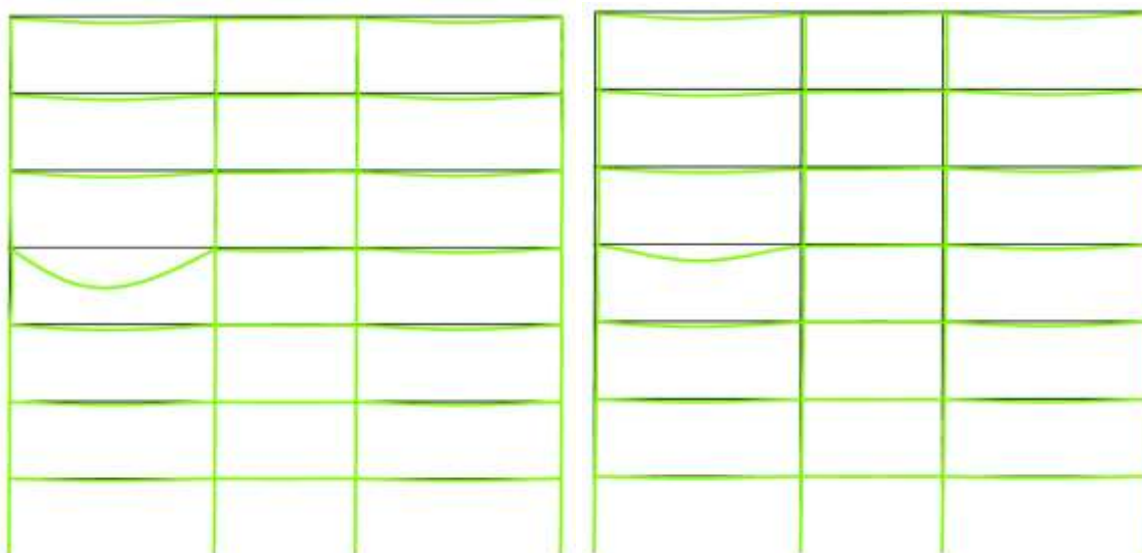


Figure 5-8 : Feu ISO - Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x10)

5.2.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant.

Comme dans le cas précédent, la ruine intervient du fait de la rupture de la poutre du portique exposé.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	51
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	55

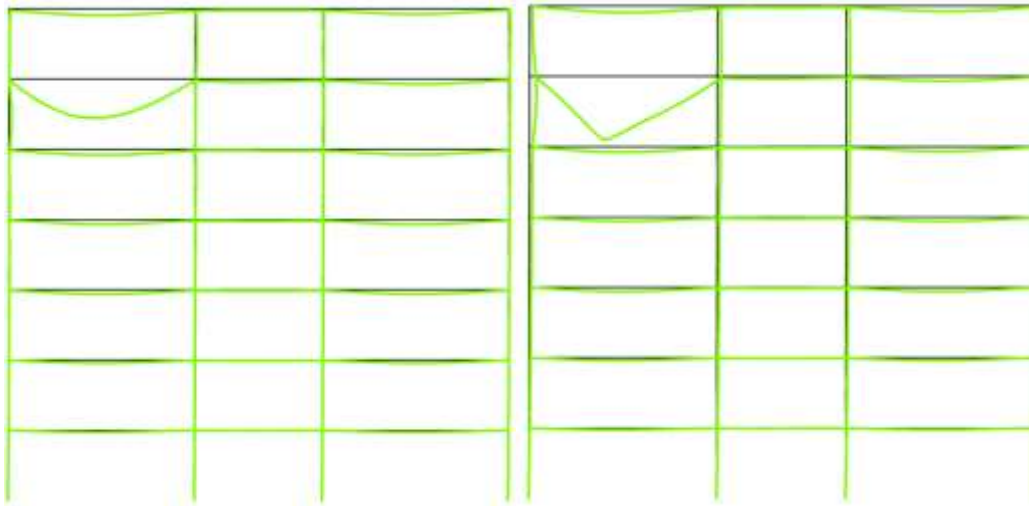


Figure 5-9 : Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x10)

5.2.5 Détermination des sections efficaces

Connaissant le temps de ruine du portique et l'historique de la distribution de température au sein des différentes sections de bois échauffées, il est possible de déterminer leur section efficace homogène équivalente à froid correspondant à cette durée. Pour ce faire, on calcule le moment résistant d'un élément échauffé à l'aide de SAFIR et on détermine la profondeur de carbonisation efficace ($d_{ef} = d_{char} + k_{0d_0}$) pour chaque face. On effectue ce calcul pour la combinaison de charge ayant mené à la ruine la plus précoce.

On rappelle que pour la poutre exposée 3 faces, deux sections efficace doivent être calculées, selon que la fibre inférieure tendue soit en partie inférieure (cas à mi travée) ou en partie supérieure (cas sur appui de continuité).

Ces sections efficaces équivalentes sont celles correspondant au temps de ruine calculé. Ainsi, elles dépendent du chargement appliqué. Il est à noter que ces sections équivalentes ne correspondent à la section efficace « critique » que de l'élément le plus faible (c'est-à-dire juste avant ruine de l'élément structurel faible).

Les sections efficaces des poutres et des poteaux sont présentées dans le tableau suivant. Les poteaux étant exposé sur 4 faces de manière homogène, leur section reste carrée. Les résultats sont présentés en fonction de la combinaison ACC - FEU étudiée. Ces sections peuvent être réutilisées pour effectuer des vérifications complémentaires sur le modèle de dimensionnement « à froid »

Sections ini.	Elément – Feu R+1	Section efficace (mm ²)
		<i>C1 : t = 70 min</i>
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	120x344
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	122x331
350	Poteau extérieur	145
350	Poteau intérieur	154

Sections ini.	Elément – Feu R+3	Section efficace (mm ²)
		<i>C1 : t = 51 min</i>
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	138x318
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	141x310
320	Poteau extérieur	148
320	Poteau intérieur	163

Sections ini.	Elément – Feu R+3 Iso	Section efficace (mm ²)
		<i>C1 : t = 95 min</i>
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	138x322
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	143x298
320	Poteaux exposés	154

Sections ini.	Elément – Feu R+5	Section efficace (mm ²)
		<i>C1 : t = 51 min</i>
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	140x320
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	143x309
300	Poteau extérieur	130
300	Poteau intérieur	145

Tableau 5-1 : Feu de logement sans auto-extinction – Sections efficaces des éléments au moment de la ruine.

On note que le temps de ruine sous feu réel intervient bien avant celui sous feu normalisé (décalage de 44 minutes) avec des sections efficaces au moment de la ruine similaire, ce qui traduit la sévérité de l'action thermique du feu réel à comparer à celle du feu normalisé.

5.3 FEU DE LOGEMENT - CAS 2 : CAS AVEC AUTO EXTINCTION DU BOIS

5.3.1 Actions thermiques sur les éléments exposés – Cas avec auto-extinction

On présente dans ce cas les actions thermiques sur une durée très importante, compte tenu de l'occurrence du phénomène d'auto extinction du bois. L'objet de déterminer dans un premier temps la durée de stabilité des éléments et dans un second temps d'estimer la surépaisseur de bois à mettre en œuvre sur les éléments.

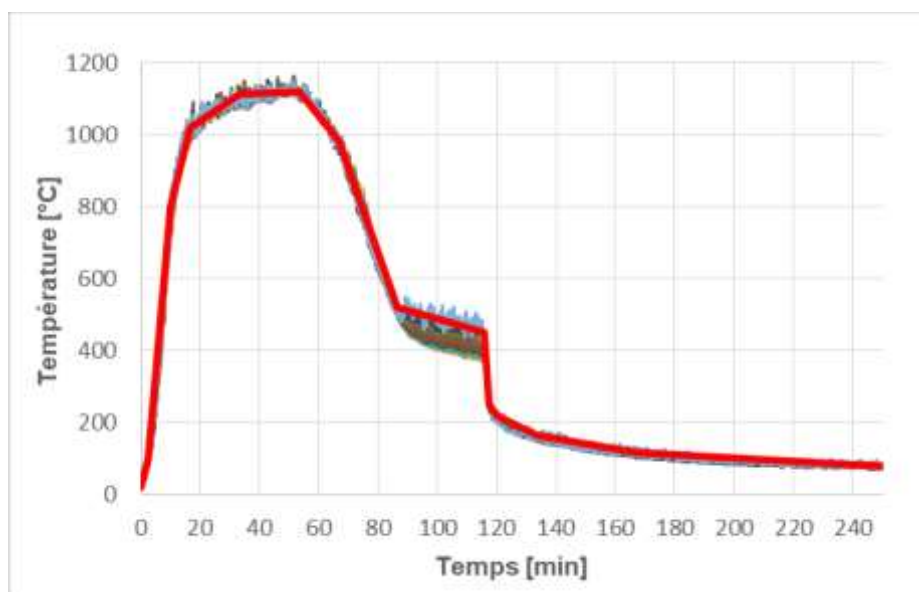


Figure 5-10 : Température adiabatique appliquée sur le poteau intérieur.

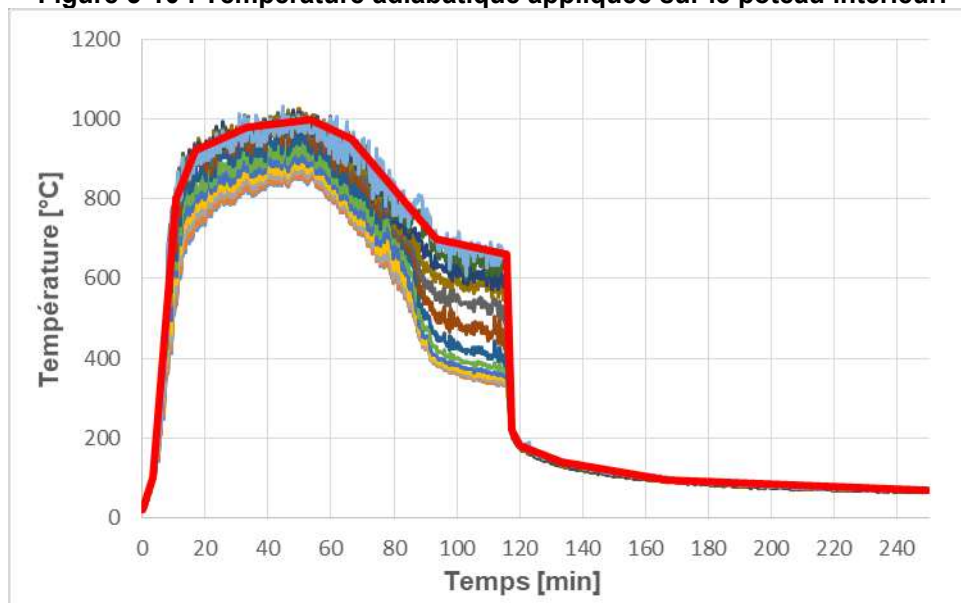


Figure 5-11 : Température adiabatique appliquée sur le poteau de façade.

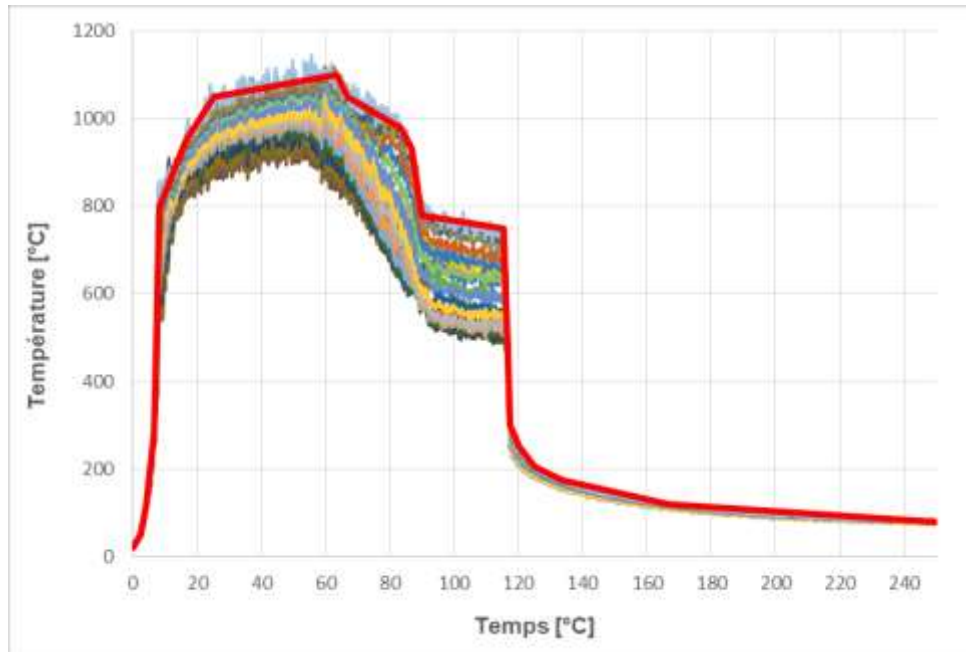


Figure 5-12 : Température adiabatique appliquée sur la poutre exposée.

5.3.2 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au RDC

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant. Par rapport au cas sans auto extinction, on note notamment que les actions thermiques appliquées aux poutres sont moins contraignantes, ce qui confère aux poutres une meilleure tenue au feu. De ce fait, la ruine de l'ensemble intervient par flambement des poteaux intérieurs exposés.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	80
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	84

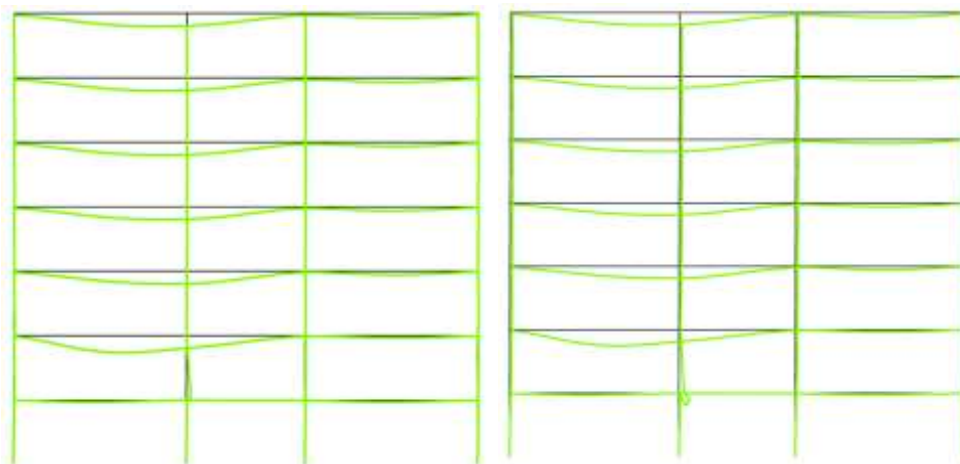


Figure 5-13 : Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

5.3.3 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+3

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant.

Dans ce cas où le feu se situe au R+3, la ruine intervient par perte de stabilité des poutres exposées.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	57
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	64

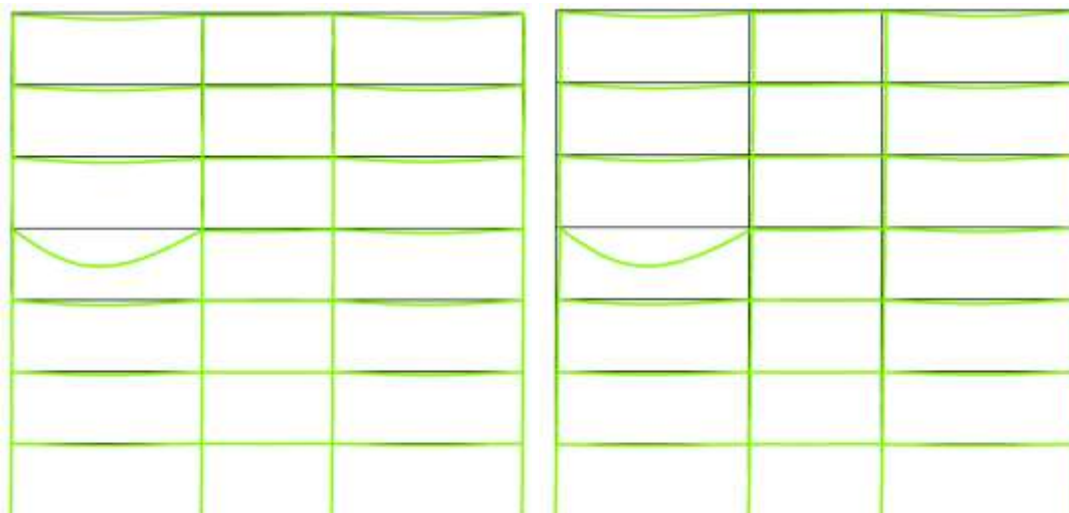


Figure 5-14 : Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x15)

5.3.4 Résultats des calculs thermomécaniques – Feu au R+5

Les temps de ruine (dépassement de la capacité résistante d'un élément) sont présentés dans le tableau suivant.

Comme dans le cas précédent, la ruine intervient du fait de la rupture de la poutre du portique exposé.

Combinaison	Temps de ruine (min)
C1 : $G + 0,5 Q$	57
C2 : $G + 0,2 W + 0,3 Q$	64

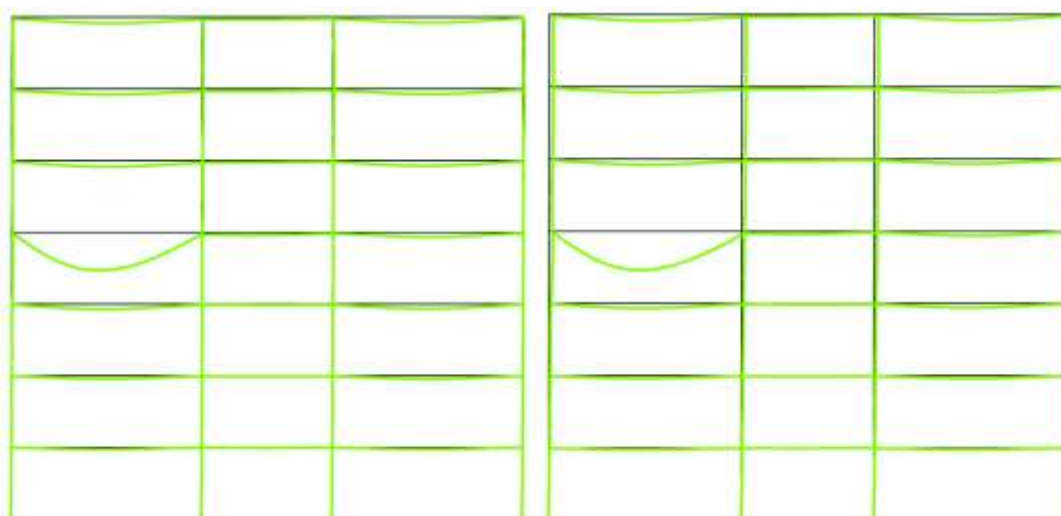


Figure 5-15 : Déformations maximale ou au temps de la ruine pour les 2 combinaisons (x10)

5.3.5 Détermination des sections efficaces

On détermine les sections efficaces homogènes équivalentes pour chacun des cas présentés précédemment, pour la combinaison de charge conduisant à la ruine la plus précoce. On calcule également la section efficace après toute la durée de l'action thermique. À partir de cette valeur, on peut estimer la surépaisseur de bois à mettre en œuvre pour assurer la stabilité au feu des éléments pendant toute la durée du feu. Ces surépaisseurs (ΔH : épaisseur supplémentaire à ajouter sur la hauteur et ΔB : épaisseur supplémentaire à ajouter sur la largeur) sont indiquées dans les tableaux de résultats suivants.

Sections ini.	Élément – Feu R+1	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C1 <i>t</i> = 80 min	<i>t</i> ∞		
320x450	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	122x349	77x243	106	45
320x450	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	124x340	82x214	126	42
350	Poteau extérieur	185	127	58	58
350	Poteau intérieur	155	110	45	45

Sections ini.	Élément – Feu R+3	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C1	<i>t</i> ∞		
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	136x321	66x191	130	70
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	143x306	68x176	130	75
320	Poteau extérieur	187	104	83	83
320	Poteau intérieur	160	87	73	73

Sections ini.	Élément – Feu R+5	Section efficace (mm ²)		ΔH mm	ΔB mm
		C1	<i>t</i> ∞		
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	136x321	66x191	130	70
300x400	Poutres intérieures Mt<0 - bxh	143x306	68x176	130	75
300	Poteau extérieur	165	89	76	76
300	Poteau intérieur	139	70	69	69

Tableau 5-2 : Feu de logement avec auto extinction – Sections efficaces des éléments au moment de la ruine.

Le tableau suivant rappelle les résultats obtenus au R+3 sous feu normalisé. On constate que par rapport à une structure justifiant d'un R90 (ce qui est le cas ici), il faudrait des sections de poteau de 393 x 393 mm² et des poutres de 375x530^{ht} mm².

Sections ini.	Élément – Feu R+3 Iso	Section efficace (mm ²)
		C1 : <i>t</i> = 95 min
300x400	Poutres intérieures Mt>0 –bxh	138x322
300x400	Poutres intérieures Mt<0 – bxh	143x298
320	Poteaux exposés	154

Tableau 5-3 : Feu normalisé au niveau du logement au R+3 – Sections efficaces des éléments au moment de la ruine.

Il est à noter que pendant la phase de refroidissement (au-delà de $t = 118$ minutes environ), la section de bois perdue représente entre 5 et 10 % de la section totale. Les figures suivantes présentent les températures obtenues dans les poutres de 300×400^{ht} mm à 60 minutes (au pic de température) et à 250 minutes. On constate qu'à ce temps d'exposition, la température de la section est assez homogène. On note d'après la Figure 5-17 présentant l'évolution de la température à différentes position que les températures n'évoluent quasiment plus. Par contre, il apparaît que l'ensemble de la section se trouve alors à 100°C environ, ce qui explique les pertes de résistance importantes obtenues.

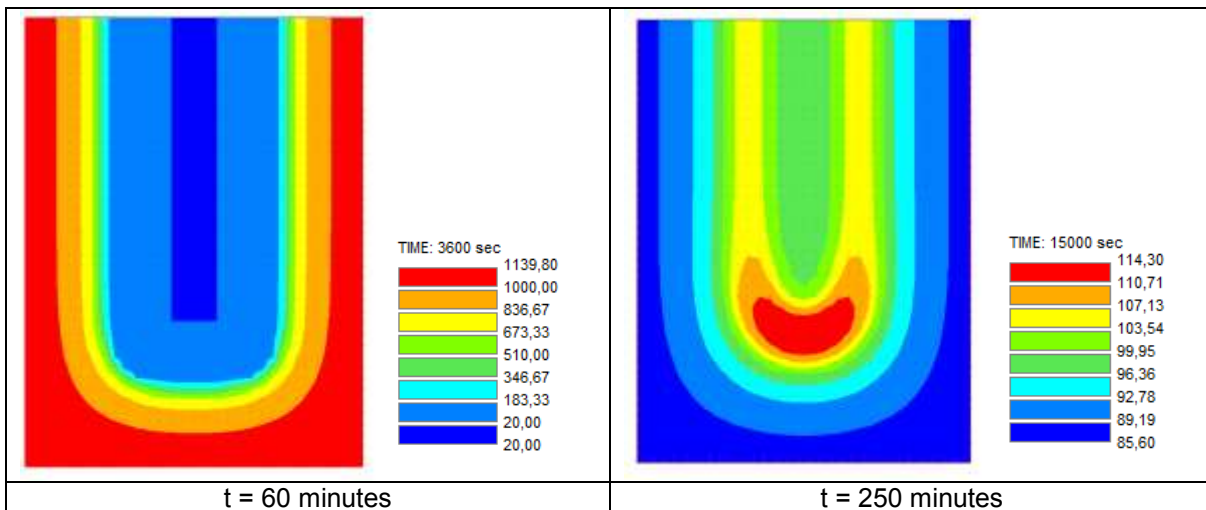


Figure 5-16 : Températures calculées dans la poutre de $300 \times 400 \text{ mm}^2$

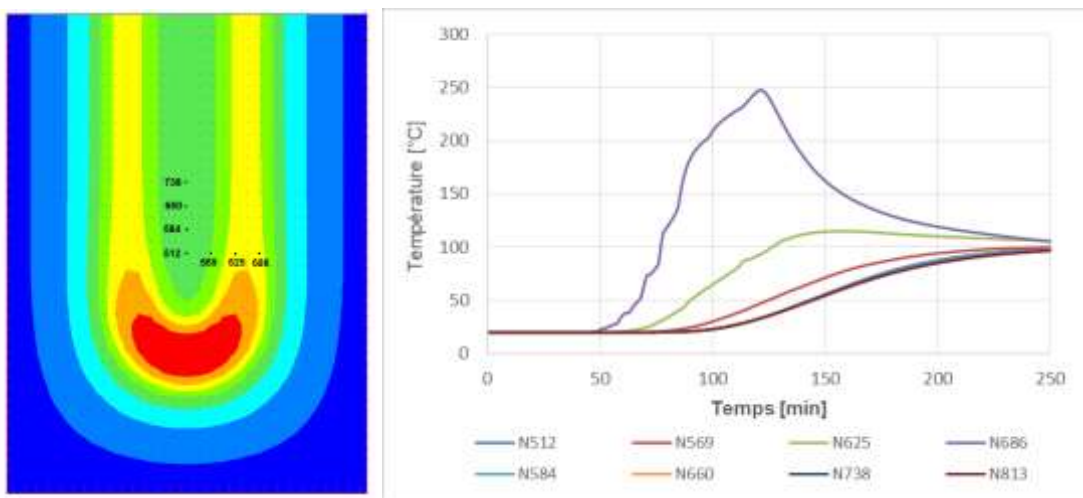


Figure 5-17 : Évolution temporelle de la température de la poutre de $300 \times 400 \text{ mm}^2$

Par ailleurs, une attention particulière doit être apportée lors du calcul du développement de feu pour s'assurer que les éléments structuraux ne sont plus suffisamment exposés lors de la phase de décroissance de la température pour que leur inflammation soit possible

5.4 SCÉNARIOS DE FEU DE LOGEMENT : CONCLUSIONS

L'approche par modélisation partielle de la structure permet la prise en compte de redistribution d'efforts entre éléments contreventant dans le cas où l'ensemble de ceux-ci ne sont pas exposés. Cette prise en compte peut permettre une certaine optimisation des sections par rapport à une approche éléments par éléments.

Les sections résiduelles calculées à un temps d'exposition « infini » ont permis d'estimer la surépaisseur de bois à mettre en œuvre pour assurer la stabilité au feu des éléments pendant toute la durée du feu. On note que cette épaisseur peut vite devenir significative, à comparer avec celle nécessaire pour l'obtention d'une durée au feu réglementaire sous feu conventionnel.

Sans auto-extinction du bois, le temps de ruine sous feu réel intervient bien avant celui sous feu normalisé, ce qui traduit la sévérité de l'action thermique du feu réel à comparer à celle du feu normalisé.

6.

6. CONCLUSIONS

Une analyse selon les méthodes de calcul avancé a été adoptée pour l'évaluation de la résistance au feu des structures en bois soumises à des actions thermiques issues de calcul de développement du feu selon des scénarios d'incendie réel incluant une contribution du bois de structure selon la méthode 2 [2].

Deux approches ont été présentées dans ce rapport :

- La méthode de calcul avancée basée en sa totalité sur une modélisation par un logiciel aux éléments finis (transfert thermique et calcul thermomécanique),
- La méthode de calcul de la section réduite pour laquelle une adaptation a été faite dans le cadre de ce travail afin de donner un substitut aux valeurs prescriptives de la vitesse de carbonisation du bois et à l'évaluation de la section réduite.

Pour ce qui concerne la première approche, il s'avère qu'il n'y a pas de points bloquants pour son exploitation dans la vérification de la résistance au feu des éléments structuraux. Elle permet dans certains cas de tenir compte des éventuels reports de charge entre zone chaude et zone froide. Néanmoins, les caractéristiques thermiques et thermomécaniques données par l'Eurocode 5 semblent être relativement sécuritaires au regard des écarts observés sous feu normalisé au niveau de la vitesse de combustion des sections et des différences d'efforts résistants observées si on compare les résultats avec ceux obtenus par méthode simplifiée.

Pour ce qui concerne la méthode de la section réduite adaptée au feu réel, le calcul de la profondeur de carbonisation s'appuie principalement sur la méthode de calcul avancée de transfert thermique dans les sections et sur un calcul thermomécanique pour la détermination de la section réduite. Les analyses ont été menées sans observer de points bloquants.

L'utilisation des outils de calcul avancé permet, dans tous les cas, d'obtenir les sections efficaces des éléments structuraux, et par conséquent donner la possibilité de procéder à l'ensemble des vérifications définis dans la partie 1 de l'Eurocode 5 sur la section réduite. En effet, il doit être gardé en mémoire qu'avec la version actuelle de SAFIR, les calculs selon la première méthode ne peuvent être réalisés que pour des matériaux homogènes (résistance équivalente dans le sens parallèle et transverse aux fibres).

Par ailleurs, les résultats de ce travail pour l'exemple sur le logement, ont montré que la prise en compte d'un feu réel dans les calculs thermomécaniques a pour conséquence une plus faible section réduite que celle donnée par l'application d'une tenue au feu R90 sous feu normalisé, même si l'on considère que les parois du local sont inertes et ne contribuent pas au développement du feu. Lorsque l'on prend en compte la contribution du bois dans le développement du feu la diminution de la section réduite est beaucoup plus importante.

L'exemple traitant le cas de bureau a permis de mettre en exergue l'importance que l'on doit accorder au calcul du développement du feu du fait que la différence que l'on peut observer d'un calcul à un autre est assez importante dans la conception et donne une augmentation de l'ordre 20 mm pour les exemples traités. L'impact des phénomènes de sous ventilation des foyers doit être correctement appréhendé. En effet, dans certains cas, l'augmentation du débit calorifique dans le cas d'un foyer sous ventilé peut conduire numériquement à une baisse de la température dans le local.

7. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- [1] Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises – Note d’information – Immeuble de grande hauteur en bois – 18/12/2015
- [2] Étude de faisabilité d’application de l’ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur Étude de modèles numériques de développement d’incendie – Rapport Efectis-CSTB Réf 18-000289, Février 2018
- [3] Étude de faisabilité d’application de l’ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur – Étude bibliographique et recueil de données existantes, Rapport CSTB-Efectis, 17-001650, Décembre 2017
- [4] ADIVbois – Étude de cas n°1 – SETEC TPI – Note de modélisation et de sensibilité
- [5] NF EN 1990 et Annexe Nationale : « Eurocode 0 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures », mars 2003 et NF EN 1990/NA Décembre 2011.
- [6] NF EN 1991-1-1 et Annexe Nationale « Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d’exploitation des bâtiments », Mars 2003 et NF P06-111-2 Juin 2004
- [7] NF EN 1991-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-2 : Actions sur les structures exposées au feu » Juillet 2003 et NF EN 1991-1-2/NA Février 2007
- [8] NF EN 1991-1-3 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-3 : Actions sur les structures – Charges de neige » Avril 2004 et NF EN 1991-1-3/NA Mai 2007
- [9] NF EN 1991-1-4 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-4 : Actions sur les structures – Actions du vent » Novembre 2005 et NF EN 1991-1-4/NA Mars 2008
- [10] NF EN 1995-1-1/A1/A2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments », Novembre 2005 et NF EN 1995-1-1/NA (Mai 2010)
- [11] NF EN 1995-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.2 : Généralités – Calcul des structures au feu », Septembre 2005 et NF EN 1995-1-2/NA (Avril 2007)
- [12] NF EN 14080 – Structure en bois – Bois lamellé collé et bois massif reconstitué – Exigences – 24 Août 2013
- [13] J.M. FRANSSSEN & T GEMAY, « User’s manual for SAFIR 2016c : a computer program for analysis of structures subjected to fire », University of Liege, August 2016
- [14] SAFIR MANUAL - Material properties – July 2016 – Thomas GERNAY / Jean-Marc FRANSSSEN

ANNEXE A - DIMENSIONNEMENT À FROID DE LA STRUCTURE

Le portique est modélisé avec le logiciel Advance Design (AD). Les pieds de poteaux sont considérés articulés et les éléments poteaux et poutres sont considérés parfaitement encastés les uns aux autres (les assemblages sont considérés comme étant parfaitement rigides). Bien que cette dernière hypothèse ne soit pas réaliste, elle n'a que peu d'influence étant donné l'objectif de l'étude consistant à évaluer la faisabilité des calculs thermomécaniques avec action thermique issues de feux réels.

Un prédimensionnement des éléments porteurs est effectué au préalable pour déterminer les sections réalistes des éléments du portique. Les poutres sont dimensionnées à l'ELU en flexion, cisaillement, et à l'ELS par limitation des flèches instantanées, finales et nette finales. Les poteaux sont dimensionnés à l'ELU en compression simple, flambement et flexion composée. On vérifiera également la flèche horizontale totale et la flèche différentielle entre étages.

Le détail du dimensionnement à froid est donné en Annexe A. On présente ci-après les principales hypothèses prises en compte ainsi que les sections retenues.

A.1. COMBINAISONS D'ACTIONS

A.1.1. États limites ultimes

La combinaison fondamentale de vérification des ELU est la suivante, conformément à la NF EN 1990 [5] :

$$1,35 G + 1,5 Q_1 + 1,5 \psi_{0,2} Q_2 (+ 1,5 \psi_{0,3} Q_3)$$

Avec :

- G : Charge permanente,
- Q1 : Charge variable dominante
- Q2, Q3 (...) charges variables d'accompagnement.

Les coefficients ψ dépendent de l'action considérée et de la catégorie de bâtiment :

Action	ψ_0	ψ_1	ψ_2
$Q_{habitation}$	0,7	0,5	0,3
$Q_{bureaux}$	0,7	0,5	0,3
Vent	0,6	0,2	0
Neige	0,5	0,2	0

Tableau A-1 : Valeurs des coefficients ψ le cas d'étude.

En considérant la prise en compte de deux actions variables dans les combinaisons ELU, les combinaisons d'étude sont :

- 1,35G + 1,5Q
- 1,35G + 1,5Q + 0,9W
- 1,35G + 1,5Q + 0,75S
- 1,35G + 1,5W + 1,05Q
- 1,35G + 1,5W + 0,75S
- 1,35G + 1,5S + 0,9W
- 1,35G + 1,5S + 1,05 Q

A.1.2. États limites de services et critères de déformation

Les critères de déformation pris en compte pour le dimensionnement de la structure sont les suivants :

- Les déplacements horizontaux des poteaux en tête de bâtiment sont limités à :
 $u_H = H_{\text{bâtiment}}/300 = 7 \text{ cm (ELS inst.)}$.
- Les déplacements horizontaux des poteaux entre chaque niveau sont limités à :
 $u_{Hi} = H_{\text{niveau}}/300 = 1 \text{ cm (ELS inst.)}$.

Les valeurs limites de flèche données par l'Eurocode 5 [10] sont les suivantes :

- $u_{\text{INST}(Q_i)} \leq L/300$
- $u_{\text{net,fin}} \leq L/200$
- $u_{\text{fin}} \leq L/125$

N'ayant pas supposé de valeur de contreflèche originalement, on se limitera à la vérification des 2 premiers critères de flèche (qui sont les plus stricts).

La flèche nette finale $u_{\text{net,fin}}$ est donnée par la formule suivante :

$$u_{\text{net,fin}} = u_{\text{INST}}(\text{toutes les charges}) + u_{\text{Fluage}}(\text{combinaison ELS DIFF})$$

Combinaison ELS INST :

$$- G + Q_1 + \psi_0 Q_2 (+ \psi_0 Q_3)$$

Combinaison ELS DIFF :

$$- k_{\text{def}} G + k_{\text{def}} \psi_{2,1} Q_1 + k_{\text{def}} \psi_{2,2} Q_2 (+ k_{\text{def}} \psi_{2,3} Q_3)$$

Pour du bois lamellé collé en classe de service 1, $k_{\text{def}} = 0,6$

A.1.2. Imperfections géométriques

Conformément à la NF EN 1995-1-1 §5.4.1 et 5.4.4, lorsqu'une analyse au second ordre est menée, des imperfections géométriques globales et de barres doivent être considérées

Les imperfections géométriques des poteaux sont prises en compte en considérant un défaut de 7,5 mm ($=0,0025 * h_{\text{poteau}}$) à mi-hauteur de chaque niveau.

Aussi, un défaut d'inclinaison globale du portique de $2,44 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ($=0,005 * (5/H_{\text{Bâtiment}})^{1/2}$) est implémenté dans les modèles.

A.2. VÉRIFICATION DU PRÉDIMENSIONNEMENT SOUS ADVANCE DESIGN ET OPTIMISATION DES SECTIONS

Une analyse non linéaire de la structure en grands déplacements est effectuée ce qui permet de prendre en compte les effets du second ordre. Les vérifications des sections sont basées sur celles mentionnées dans l'Eurocode 5 partie 1-1 [10] (flexion, déversement, cisaillement, compression, flambement, flexion composée).

A.2.1 Analyse non linéaire en grands déplacements avec prise en compte des imperfections géométriques à l'ELU

Les valeurs d'effort tranchant, d'effort normal et de moment sollicitant sous combinaisons ELU sont données ci-après en fonction de la durée d'application des charges (k_{mod}). Le tableau suivant récapitule les valeurs de k_{mod} utilisée pour le projet ainsi que les charges associées.

Action	Permanent	Moyen terme	Court terme	Instantanée
Combinaison avec charge	Permanente	Exploitation	Neige	Vent
BLC	0,6	0,8	0,9	1,1

A.2.1.1 Analyse des poutres

Les poutres sont vérifiées avec chaque durée d'application de charge (k_{mod} associé) et sous la combinaison de charges décisive. Il est à noter qu'on ne présente pas les valeurs d'effort normal du fait de leur faible intensité. Ces efforts impactent peu le dimensionnement des poutres. Celles-ci sont dimensionnées avec un taux de travail proche de 100% (effort agissant ~capacité résistante).

Elément	M max (kN.m)					V max (kN)					
	k_{mod}	0,6	0,8	0,9	1,1	-	0,6	0,8	0,9	1,1	-
Poutres intérieures		81	142	143	198	198	53	94	94	106	106
Poutres toiture		56	87	96	97	97	40	61	67	68	68

Tableau A-2 : ELU : Efforts maximaux dans les poutres.

Cette analyse à l'ELU donne les sections de poutres suivantes :

- Poutres courantes **S = 30 x 40 cm² (99 % en flexion)**
- Poutres toiture **S = 24 x 34 cm² (99 % en flexion)**

A.2.1.2 Analyse des poteaux

Les poteaux sont vérifiés avec chaque durée d'application de charge (et k_{mod} associé) et sous la combinaison de charges décisive. On dimensionne les poteaux pour qu'ils travaillent à près de 100 % de leur capacité résistante.

Elément	M max (kN.m)					N max (kN)					
	k_{mod}	0,6	0,8	0,9	1,1	-	0,6	0,8	0,9	1,1	-
Poteaux RDC		42	74	74	163	163	689	1192	1204	1228	1228
Poteaux NIV1		36	64	64	96	96	585	1010	1022	1036	1036
Poteaux NIV2		35	62	62	77	77	483	831	843	851	851
Poteaux NIV3		34	59	60	70	70	381	653	664	669	669
Poteaux NIV4		34	61	61	69	69	279	474	486	488	488
Poteaux NIV5		30	53	53	58	58	178	296	308	308	308
Poteaux NIV6		46	72	78	80	80	77	118	130	130	130

Tableau A-3 : ELU : Efforts maximaux dans les poteaux.

Cette analyse à l'ELU donne les sections de poteaux suivant :

- Poteaux RDC **S = 39,5 x 39,5 cm² (97 % en flexion+compression)**
- Poteaux NIV1 **S = 35 x 35 cm² (98 % en flexion+compression)**
- Poteaux NIV2 **S = 33,5 x 33,5 cm² (99 % en flexion+compression)**
- Poteaux NIV3 **S = 32 x 32 cm² (98 % en flexion+compression)**
- Poteaux NIV4 **S = 31 x 31 cm² (98 % en flexion+compression)**
- Poteaux NIV5 **S = 28,5 x 28,5 cm² (99 % en flexion+compression) → 30 x 30 (86 % continuité avec poteau du NIV6)**
- Poteaux NIV6 **S = 30 x 30 cm² (97 % en flexion+compression)**

A.2.2 ELS : Limitation des flèches des poutres

Les valeurs limites de flèche données par l'Eurocode 5 sont les suivantes :

- $u_{INST(Q)} \leq L/300$
- $u_{net,fin} \leq L/200$
- $u_{fin} \leq L/125$

N'ayant pas supposé de valeur de contreflèche originalement, on se limitera à la vérification des 2 premiers critères de flèche (qui sont les plus stricts).

A.2.2.1 Flèche instantanée due aux charges variables

Les valeurs de flèche maximum données par Advance Design en fonction de la portée des poutres sont explicitées au tableau suivant.

Élément	Portée (m)	Flèche verticale max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poutres intérieure	8	0,74	2,67	Vérifiée
Poutres intérieure	5,5	0,30	1,83	Vérifiée
Poutres toiture	8	0,99	2,67	Vérifiée
Poutres toiture	5,5	0,30	1,83	Vérifiée

Tableau A-4 : ELS : Flèches instantanées dans les poutres.

Les poutres sont donc vérifiées au premier critère de flèche.

A.2.2.2 Flèche nette finale avec prise en compte du fluage

La flèche nette finale $U_{net,fin}$ est donnée par la formule suivante :

$$U_{net,fin} = U_{INST}(\text{toutes les charges}) + U_{Fluage}(\text{combinaison ELS DIFF})$$

Combinaison ELS INST :

$$G + Q_1 + \psi_0 Q_2 (+ \psi_0 Q_3)$$

Combinaison ELS DIFF :

$$k_{def}G + k_{def}\psi_{2,1}Q_1 + k_{def}\psi_{2,2}Q_2 (+ k_{def}\psi_{2,3}Q_3)$$

Les valeurs de flèche maximum données par Advance Design en fonction de la portée des poutres sont explicitées au tableau suivant.

Élément	Portée (m)	Flèche INST max (cm)	Flèche DIFF max (cm)	Flèche NET,FIN max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poutres intérieures 30x40 cm ²	8	1,79	1,22	3,01	4,00	Vérifiée
Poutres intérieures 30x40 cm ²	5,5	0,72	0,48	1,2	2,75	Vérifiée
Poutres toiture 24x34 cm ²	8	2,53	1,69	4,22	4,00	Non vérifiée
Poutres toiture 24x34 cm ²	5,5	0,70	0,47	1,17	2,75	Vérifiée

Tableau A-5 : ELS : Flèches différées dans les poutres.

Les poutres de toiture ne sont pas vérifiées. Leur section est donc modifiée comme suit : **S = 24 x 35,5 cm²**

Élément	Portée (m)	Flèche INST max (cm)	Flèche DIFF max (cm)	Flèche NET,FIN max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poutres toiture 24x35,5 cm ²	8	2,35	1,57	3,92	4,00	Vérifiée
Poutres toiture 24x35,5 cm ²	5,5	0,69	0,46	1,15	2,75	Vérifiée

Tableau A-6 : ELS : Flèches différées dans les poutres après reprise des sections.

Les nouvelles poutres de toitures sont donc vérifiées au second critère de flèche.

A.2.2 ELS : Limitation des déplacements horizontaux

Les déplacements horizontaux des poteaux en tête de bâtiment sont limités à $u_H = H_{\text{bâtiment}}/300 = 7 \text{ cm}$.
Les déplacements horizontaux des poteaux entre chaque niveau sont limités à $u_{Hi} = H_{\text{niveau}}/300 = 1 \text{ cm}$.

A.2.2.1 Déplacement en tête de bâtiment

Les déplacements maximums en tête de bâtiment sont donnés dans le tableau suivant.

Elément	Hauteur (m)	Déplacement horizontal max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poteaux	21	6,38	7,00	Vérifiée

Tableau A-7 : ELS : Vérification du déplacement maximum en tête du bâtiment.

Le déplacement en tête de bâtiment respecte le critère $H_{\text{bâtiment}}/300$.

A.2.2.2 Déplacements entre étages

Les déplacements différentiels obtenus en tête de chaque poteau de chaque étage sont donnés dans le tableau suivant.

Elément / NIVEAU	Hauteur (m)	Déplacement horizontal différentiel max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poteau RDC 39,5x39,5 cm ²	3	2,29	1,00	Non vérifiée
Poteau NIV1 35x35 cm ²	3	1,28	1,00	Non vérifiée
Poteau NIV2 33,5x33,5 cm ²	3	0,92	1,00	Vérifiée
Poteau NIV3 32x32 cm ²	3	0,77	1,00	Vérifiée
Poteau NIV4 31x31 cm ²	3	0,58	1,00	Vérifiée
Poteau NIV5 28,5x28,5 cm ²	3	0,36	1,00	Vérifiée
Poteau NIV6 28,5x28,5 cm ²	3	0,41	1,00	Vérifiée

Tableau A-8 : ELS : Vérification du déplacement relatif entre étages.

Seuls les déplacements en tête des poteaux du RDC et du niveau 1 ne respectent pas le critère $H_{\text{niveau}}/300$. Les sections du poteau du RDC, des poutres du plancher du premier et du second niveau sont augmentées afin de satisfaire ce critère.

Nouvelles sections :

- Poteaux RDC **S = 46 x 46 cm²**
- Poutres courantes NIV1 **S = 40 x 50 cm²**
- Poutres courantes NIV2 **S = 32 x 45 cm²**

Les nouveaux déplacements différentiels obtenus respectant le critère $H_{\text{niveau}}/300$ sont donnés dans le tableau suivant.

Elément / NIVEAU	Hauteur (m)	Déplacement horizontal différentiel max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poteau RDC 46x46 cm ²	3	1,00	1,00	Vérifiée

Élément / NIVEAU	Hauteur (m)	Déplacement horizontal différentiel max (cm)	Seuil (cm)	Justification
Poteau NIV1 35x35 cm ²	3	0,75	1,00	Vérfiée
Poteau NIV2 33,5x33,5 cm ²	3	0,76	1,00	Vérfiée
Poteau NIV3 32x32 cm ²	3	0,73	1,00	Vérfiée
Poteau NIV4 31x31 cm ²	3	0,58	1,00	Vérfiée
Poteau NIV5 28,5x28,5 cm ²	3	0,38	1,00	Vérfiée
Poteau NIV6 28,5x28,5 cm ²	3	0,22	1,00	Vérfiée

Tableau A-9 : ELS : Vérification du déplacement relatif entre étages – Sections modifiées.

Il est à noter que le nouveau déplacement horizontal maximal en tête de bâtiment est désormais de 4,42 cm, valeur inférieure à la limite évoquée plus haut.

A.3 CONCLUSION DU DIMENSIONNEMENT À FROID

Les sections obtenues sont rappelées dans le tableau suivant.

Élément / NIVEAU	Section (cm ²)
<i>Poteaux</i>	
Poteau RDC	46 x 46
Poteau NIV1	35 x 35
Poteau NIV2	33,5 x 33,5
Poteau NIV3	32 x 32
Poteau NIV4	31 x 31
Poteau NIV5	30 x 30
Poteau NIV6	30 x 30
<i>Poutres</i>	
Poutres intérieures	30 x 40
Poutres toiture	24 x 35,5
Poutres intérieures RDC	40 x 50
Poutres intérieures NIV1	32 x 45

Tableau A-10 : Dimensionnement à froid – Sections retenues.

ANNEXE B – COMPARATIF ENTRE CALCUL NUMÉRIQUE ET CALCUL SUIVANT LA NF EN 1995-1-2 A FROID ET SOUS FEU NORMALISÉ

L'objet de cette annexe est de comparer, sur des cas simples, les résultats obtenus par la méthode de calcul simplifiée de l'Eurocode 5 (méthode de la section réduite) et par calcul numérique par éléments finis (avec le logiciel SAFIR) des états limites ultimes de flexion/déversement et de compression/flambement dans le cas d'un calcul à froid ou sous feu normalisé.

Pour ce faire, on étudie plusieurs éléments structuraux avec différentes classes de bois. Ces classes et leurs caractéristiques mécaniques sont rappelées au tableau suivant.

En MPa	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$f_{m,g,k}$	24	32	24	30	70
$f_{t,0,g,k}$	19,2	19,5	14,5	18	42
$f_{c,0,g,k}$	24	24,5	21	24	36
$E_{0,g,moy}$	11500	13500	11000	11000	20000
$E_{0,g,05}$	9600	11200	7400	9200	16800
$G_{g,moy}$	650	650	690	690	1330
$G_{g,05}$	540	540	460	575	1050
$\rho_{g,k}$	385	400	350	530	800
$\rho_{g,my}$	420	440	420	640	960

Tableau B-1 : Classes de bois et propriétés mécaniques.

B.1 ÉTUDE D'UNE POUTRE

Les efforts résistants sont calculés sans prise en compte des coefficients de sécurité ni coefficient de modification, que ce soit dans le calcul simplifié de l'EC5 ou pour le calcul numérique (les efforts résistants sont calculés directement à partir des valeurs caractéristiques des matériaux).

Des imperfections géométriques sont introduites dans les calculs numériques. Les valeurs prises en compte sont les déviations de rectitude limites du §10.2 de la NF EN 1995-1-1 :

- $l/500$ pour le bois lamellé collé
- $l/300$ pour le bois massif

Les moments résistants sont calculés à partir des données suivantes dans SAFIR :

- Module d'élasticité $E_{0,g,moy}$
- Coefficient de poisson $\nu = \frac{E_{0,g,moy}}{2G_{g,05}} - 1$
- Résistance en compression $f_{m,g,k}$
- Résistance en traction : $f_{m,g,k}$

La résistance en compression comme en traction sont prises égales aux résistances caractéristiques en flexion, du fait de l'élément étudié.

B.1.1. Poutre de section 90x225^{ht} mm

- Calculs à froid :

Dans un premier temps, on calcule le moment résistant des sections en flexion pure, sans tenir compte du déversement. Les résultats sont présentés au tableau suivant.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
M _{Rk} [EC5]	18,225	24,3	18,22	22,78	53,15
M _{Rk} [Safir]	18,297	24,39	18,29	22,87	53,38

Tableau B-2 : Section 90x225^{ht} mm – Moment résistant.

On note que les moments résistants calculés suivant la NF EN 1995-1-1 et avec SAFIR sont quasiment identiques

On effectue le calcul en tenant compte du déversement. On étudie une poutre de 12 m non maintenue au déversement sauf à ces extrémités, avec imperfection de $l/300$ ou $l/500$ (respectivement dans le cas du bois massif ou du bois lamellé collé). On calcule le moment résistant en appliquant sur la poutre un moment constant. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau B-3.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
M _{Rk} [EC5]	14,3	17,77	12,33	15,37	29,72
M _{Rk} [Safir]	15,5	17,76	13,98	16,26	31,2

Tableau B-3 : Section 90x225^{ht} mm – Moment résistant / déversement pour une poutre de 12 m.

Bien que SAFIR donne des valeurs légèrement supérieures (~5%) les ordres de grandeurs sont bien similaires. Il est à noter que ces résultats sont logiquement influencés par le coefficient de poisson pris en compte pour le calcul.

- Calculs à chaud (suivant feu normalisé) :

On étudie la section 90x225 mm² en flexion après 30 minutes d'exposition à un feu normalisé. Le bois est considéré à 12% d'humidité. La masse volumique prise en compte dans le calcul thermique est soit la masse volumique caractéristique (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient k), soit la masse volumique moyenne (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient m). La poutre est considérée exposée sur 3 faces.

A titre d'exemple on présente les champs de température obtenu pour la section en GL24 après 30 minutes d'exposition et utilisation de la masse volumique caractéristique.

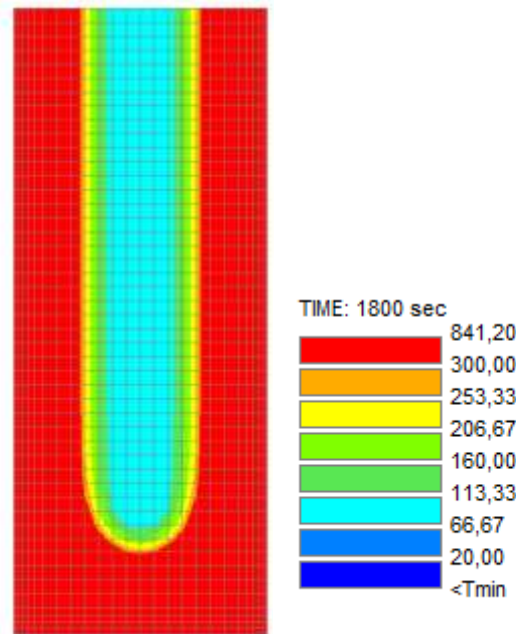


Figure B-1 : Section 90x225 mm² en GL24h – Exposition 30 minutes – Utilisation de ρ_k .

On voit sur la figure précédente que la partie supérieure n'est pas influencée par les effets de bords. On détermine ainsi à ce niveau, à partir de l'isotherme 300°C, la vitesse de carbonisation unidirectionnelle calculé à partir du transfert thermique effectué par le logiciel SAFIR.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$M_{Rk,flexion}$ [EC5]	5,278	7,04	4,21	8,73	20,37
$\beta_{0,Eucocode}$ [mm/min]	0,65	0,65	0,65	0,5	0,5
M_{Rk} [Safir],k	1,7	2,4	1,26	3,96	15,82
M_{Rk} [Safir],m	1,96	2,96	1,96	5,3	18,84
$\beta_{0,k}$ [mm/min]	0,78	0,777	0,82	0,66	0,54
$\beta_{0,m}$ [mm/min]	0,76	0,746	0,764	0,61	0,48

Tableau B-4 : Section 90x225^{ht} mm – Moments résistants à chaud et vitesse de carbonisation

On note un écart significatif entre le calcul numérique et le calcul simplifié utilisant la méthode de la section réduite. Cet écart est d'autant plus important que la section étudiée est peu épaisse. La figure suivante présente les isothermes calculées pour la section en GL24h superposée avec la section efficace équivalente de la méthode de la section réduite. Dans un premier temps, ces superpositions semblent plutôt cohérentes, même si la hauteur de la section efficace est supérieure à l'isotherme 300°C. Néanmoins, on constate que la température de la section à l'intérieure de la section efficace est de l'ordre de 70°C. Suivant les facteurs de réduction de l'Eurocode 5, cela entraîne une perte de plus de 45% de résistance en compression et de 22% en traction.

On retient également que le calcul thermique est à effectuer avec la masse volumique moyenne.

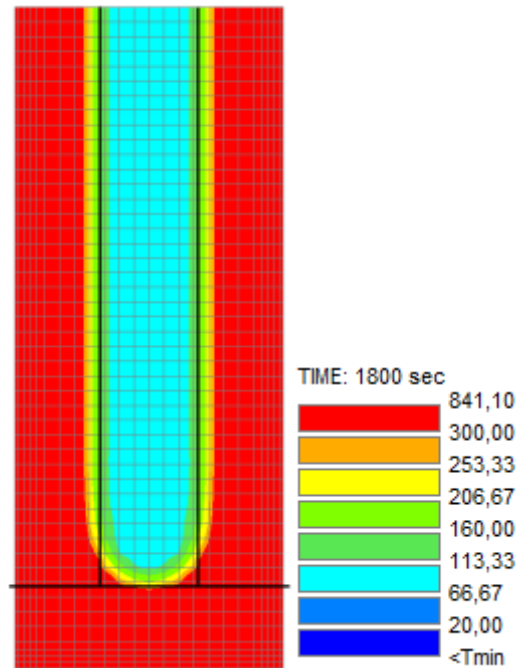


Figure B-2 : Section 90x225 mm² en GL24h – Exposition 30 minutes – Utilisation de ρ_m et tracé de la section efficace équivalente calculée suivant la NF EN 1995-1-2.

Si on s'intéresse à des durées de stabilité au feu, pour une poutre en bois de 90x225 dimensionnée vis-à-vis de sa flèche, pour un C24 et une durée de stabilité de 44 minutes calculée avec l'Eurocode 5, le calcul SAFIR donnerait une durée de 40 minutes. Par contre, pour du bois LMC GL24h, l'écart est plus important. La durée de stabilité au feu serait de 50 minutes avec la méthode simplifiée de l'Eurocode et de 40 minutes avec SAFIR.

B.1.2. Poutre de section 140x495 mm²

- Calculs à froid :

Dans un premier temps, on calcule le moment résistant des sections en flexion pure, sans tenir compte du déversement. Les résultats sont présentés au tableau suivant.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
M _{Rk} [EC5]	137,2	182,9	137,2	171,5	400
M _{Rk} [Safir]	137,7	183,3	137,4	171,8	400,9

Tableau B-5 : Section 140x495^{ht} mm – Moment résistant.

On note que les moments résistants calculés suivant la NF EN 1995-1-1 et avec SAFIR sont quasiment identiques

On effectue le calcul en tenant compte du déversement. On étudie une poutre de 15 m non maintenue au déversement sauf à ces extrémités, avec imperfection de l/300 ou l/500 (respectivement dans le cas du bois massif ou du bois lamellé collé). On calcule le moment résistant en appliquant sur la poutre un moment constant. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau B-3.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
M _{Rk} [EC5]	100,6	123,7	84,9	105,6	197,7
M _{Rk} [Safir]	106	119	93,4	108	205

Tableau B-6 : Section 140x495^{ht} mm – Moment résistant / déversement pour une poutre de 12 m.

SAFIR donne des valeurs légèrement supérieures (~5%) mais les ordres de grandeurs sont bien similaires.

- Calculs à chaud (suivant feu normalisé) :

On étudie la section 140x495 mm² en flexion après 60 minutes d'exposition à un feu normalisé. Le bois est considéré à 12% d'humidité. La masse volumique prise en compte dans le calcul thermique est soit la masse volumique caractéristique (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient k), soit la masse volumique moyenne (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient m). La poutre est considérée exposée sur 3 faces.

À titre d'exemple on présente les champs de température obtenu pour la section en GL24 après 30 et 60 minutes d'exposition et utilisation de la masse volumique moyenne.

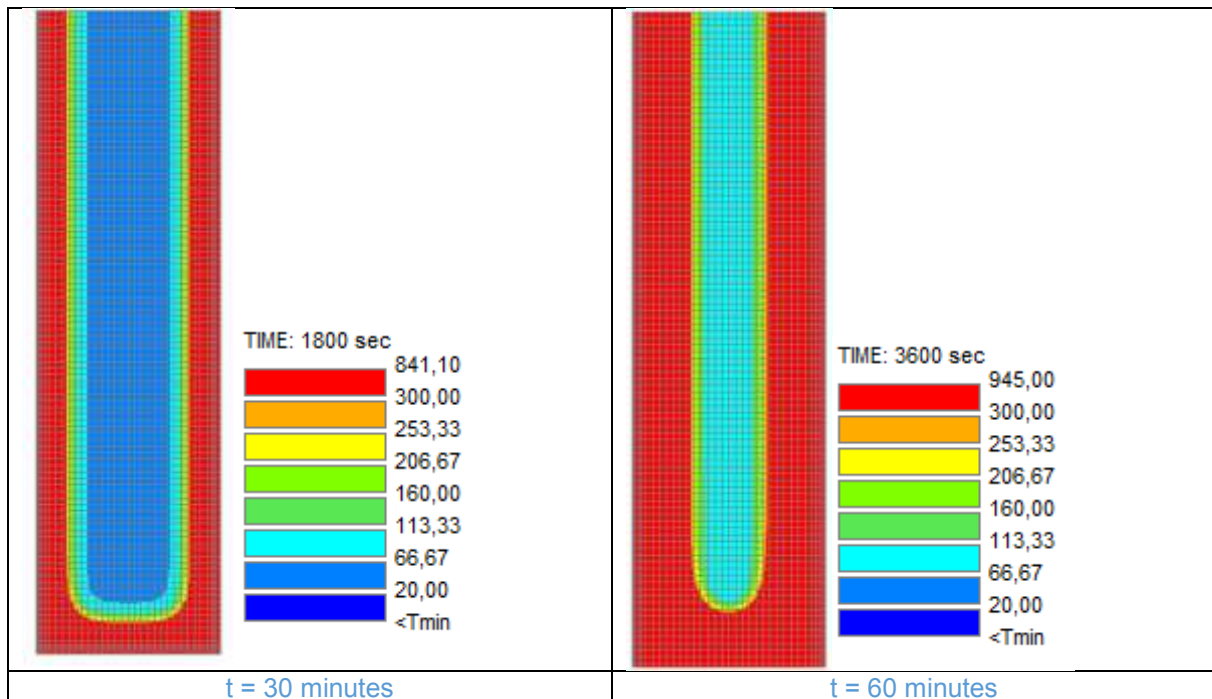


Figure B-3 : Section 140x495 mm² en GL24h – Exposition 30 et 60 minutes – Utilisation de ρ_m .

On voit sur la figure précédente que la partie supérieure n'est pas influencée par les effets de bords. On détermine ainsi à ce niveau, à partir de l'isotherme 300°C, la vitesse de carbonisation unidirectionnelle calculé à partir du transfert thermique effectué par le logiciel SAFIR.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$M_{Rk,flexion}$ [EC5]	33,4	44,5	23,2	62,1	144,9
$\beta_{0,Eucocode}$ [mm/min]	0,65	0,65	0,65	0,5	0,5
M_{Rk} [Safir],k	10,55	15,8	7,8	28,6	119,8
M_{Rk} [Safir],m	13,6	20,4	13,6	39,6	141
$\beta_{0,k}$ [mm/min]	0,731	0,72	0,77	0,63	0,49
$\beta_{0,m}$ [mm/min]	0,7	0,68	0,7	0,56	0,46

Tableau B-7 : Section 140x495^{ht} mm – Moments résistants à chaud et vitesse de carbonisation après 60 minutes

Comme dans le cas précédent, l'écart est relativement important, avec des valeurs calculées sous SAFIR bien plus faibles que celles calculées avec la méthode de la section réduite. Cela est principalement dû aux dimensions de la section par rapport à la durée d'exposition et à la température de 70°C environ dans le bois à cœur.

On effectue le calcul des moments résistants pour une durée d'exposition de 30 minutes, uniquement dans le cas du calcul thermique avec la masse volumique moyenne. Les résultats sont présentés au tableau B-8.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$M_{Rk,flexion}$ [EC5]	73,2	97,7	67,1	103	241
M_{Rk} [Safir],m	52	71,4	52	83,6	231

Tableau B-8 : Section 140x495^{ht} mm – Moments résistants à chaud et vitesse de carbonisation après 30 minutes

On constate que l'écart entre les deux méthodes diminue, pour les raisons évoquées précédemment. Le calcul thermomécanique reste le plus défavorable.

B.1.3. Poutre de section 300x500 mm²

On effectue uniquement le calcul des moments résistants à chaud en utilisant pour le transfert thermique la masse volumique moyenne. Les résultats sont fournis dans les tableaux B-9 et B10. On note que pour cette section avec une épaisseur plus importante, l'écart entre les méthodes est plus faible et varie de 25% environ pour une heure d'exposition à 10% pour 30 minutes d'exposition.

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$M_{Rk,flexion}$ [EC5]	217	290	210	287	670
M_{Rk} [Safir],m	192	259	189	264	666

Tableau B-9 : Section 300x500^{ht} mm – Moments résistants à chaud et vitesse de carbonisation après 30 minutes

En kN.m	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
$M_{Rk,flexion}$ [EC5]	164	219	150	232	543
M_{Rk} [Safir],m	137,6	187	132	200	400

Tableau B-10 : Section 300x500^{ht} mm – Moments résistants à chaud et vitesse de carbonisation après 60 minutes

B.2 ÉTUDE D'UN POTEAU

Les efforts résistants sont calculés sans prise en compte des coefficients de sécurité ni coefficient de modification, que ce soit dans le calcul simplifié de l'EC5 ou pour le calcul numérique (les efforts résistants sont calculés directement à partir des valeurs caractéristiques des matériaux).

Des imperfections géométriques sont introduites dans les calculs numériques. Les valeurs prises en compte sont les déviations de rectitude limites du §10.2 de la NF EN 1995-1-1 :

- $l/500$ pour le bois lamellé collé
- $l/300$ pour le bois massif

Les efforts résistants sont calculés à partir des données introduites dans SAFIR :

- Module d'élasticité $E_{0,g,moy}$

- Coefficient de poisson $\nu = \frac{E_{0,g,moy}}{2G_{g,05}} - 1$
- Résistance en compression $f_{c,0,g,k}$
- Résistance en traction : $f_{t,0,g,k}$

B.2.1. Poteau de section 250x250 mm

On étudie un poteau de section 250x250 mm², bi articulé et de hauteur 5 m (longueur de flambement égale à 5 m également). On effectue le calcul pour différentes classes de bois. Les imperfections géométriques sont prises en compte par le biais d'une courbure initiale sinusoïdale.

- Calculs à froid :

On calcule pour différentes classes de bois l'effort normal résistant de la section, par les méthodes de l'Eurocode 5 et par l'approche par éléments finis.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N _{Rk} [EC5]	1022	1136	737	894	1516
N _{Rk} [Safir]	919	986	735	789	1262

Tableau B-11 : Poteau 250x250 mm – Effort normal résistant.

On constate que l'approche numérique donne des résultats sécuritaires de 10 à 20% environ.

- Calculs à chaud (suivant feu normalisé) :

On étudie la section 250x250 mm² en compression simple après 30 et 60 minutes d'exposition à un feu normalisé. Le bois est considéré à 12% d'humidité. La masse volumique prise en compte dans le calcul thermique est soit la masse volumique caractéristique (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient k), soit la masse volumique moyenne (dans ce cas les résultats sont affectés d'un coefficient m). Le poteau est considéré exposé sur 4 faces.

À titre d'exemple on présente les champs de température obtenu pour la section en GL24 après 30 et 60 minutes d'exposition et utilisation de la masse volumique moyenne.

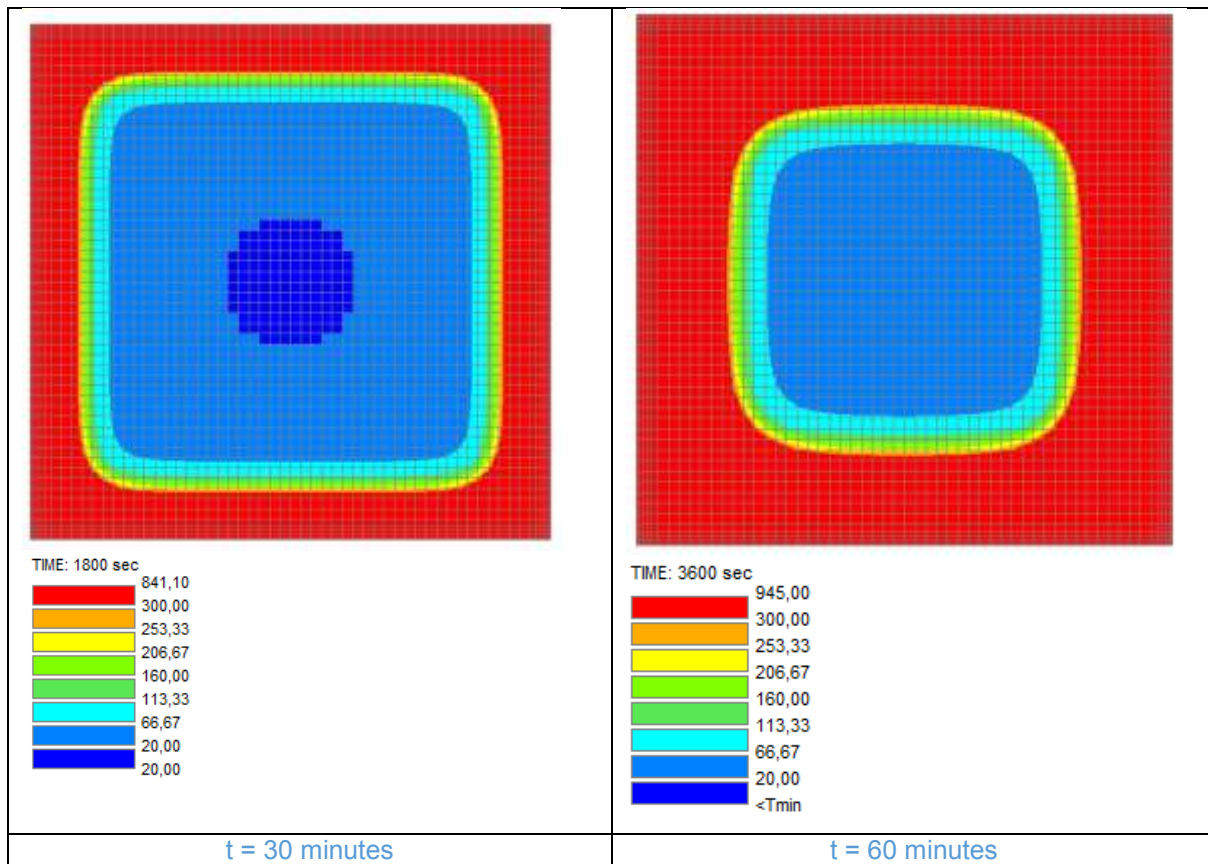


Figure B-4 : Section 250x250 mm²en GL24h – Exposition 30 et 60 minutes – Utilisation de ρ_m .

Les tableaux suivants présentent les efforts normaux résistants admissibles pour le poteau après 30 ou 60 minutes d'exposition. On constate que les efforts calculés avec SAFIR sont plus faibles que ceux calculés avec la méthode de la section réduite.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N_{Rk} [EC5]	406	466	262	428	753
N_{Rk} [Safir]m	255	290	208	293	645

Tableau B-12 : Poteau 250x250 mm – Effort normal résistant après 30 minutes d'exposition.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N_{Rk} [EC5]	158	183	85	220	394
N_{Rk} [Safir]k	78	93	54	110	303
N_{Rk} [Safir]m	90	108	74	139	369

Tableau B-13 : Poteau 250x250 mm – Effort normal résistant après 60 minutes d'exposition.

B.2.2. Poteau de section 400x400 mm

On effectue pour ce cas uniquement les calculs à chaud en considérant la masse volumique moyenne du bois. On constate que les résultats donnés par le calcul numérique sont toujours plus pénalisant.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N _{Rk} [EC5]	2540	2653	1877	2471	3885
N _{Rk} [Safir]m	1615	1696	1290	1654	3241

Tableau B-14 : Poteau 400x400 mm – Effort normal résistant après 30 minutes d'exposition.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N _{Rk} [EC5]	1823	1941	1200	1904	3047
N _{Rk} [Safir]m	1057	1135	837	1190	2515

Tableau B-15 : Poteau 400x400 mm – Effort normal résistant après 60 minutes d'exposition.

En kN	GL24h	GL32c	C24	D30	D70
N _{Rk} [EC5]	628	715	295	942	1593
N _{Rk} [Safir]m	387	449	310	594	1524

Tableau B-16 : Poteau 400x400 mm – Effort normal résistant après 120 minutes d'exposition.

B.3. CONCLUSIONS

Au regard des cas testés, il apparaît :

- Que la masse volumique moyenne est à utiliser pour les calculs de transfert thermique.
- Que la résistance à la flexion (f_m) est à prendre en compte comme résistance en compression et en traction dans SAFIR pour les éléments travaillant en flexion (poutres)
- Qu'il convient de prendre en compte une valeur du coefficient de poisson de sorte à disposer pour les calculs de torsion / gauchissement de la valeur du module d'élasticité transversal à 5% d'exclusion ($G_{g,05}$)
- Que l'utilisation des propriétés thermiques et mécaniques du bois à hautes températures données dans l'annexe B de la NF EN1995-1-2 donne en général des résultats plus conservatifs que les résultats obtenus avec la méthode simplifiée de l'Eurocode 5 (méthode de la section réduite sous feu normalisé).



A D I V **B O I S**

www.adingbois.org