



ETUDE

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

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 deuxième partie de l'étude sur les conditions d'applicabilité de l'ingénierie de la sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur, concerne les méthodes d'ingénierie permettant de prendre en compte l'influence et la contribution du bois structural pour les simulations numériques de développement d'un incendie et les actions thermiques en résultant.

Le présent rapport fait référence à une 4^{ème} phase d'étude relative à un guide méthodologique présentant une synthèse des travaux effectués. Ce guide méthodologique / rapport de synthèse fait l'objet de l'annexe 3 de la publication d'ADIVbois "Note de préconisation pour la sécurité incendie des BBGH sup 28 m"

Référence	Efectis	CSTB
Affaire/projet :	SA-17-000977	26068352
Document :	18-000289-MDU/GAU	

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

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 : 34

	Rédacteur	Vérificateur
Efectis France	Mathieu DUNY Gildas AUGUIN	Gildas AUGUIN
CSTB	El Mehdi KOUTAIBA Quentin JULLIEN Paul LARDET	Paul LARDET

SUIVI DES MODIFICATIONS

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

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	4
2. MÉTHODOLOGIE	4
2.1 INTRODUCTION	4
2.2 DESCRIPTION DES MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DU BOIS	5
2.2.1 Méthode 1 : méthode itérative prescrite.....	5
2.2.2 Méthode 2 : méthode implicite par flux critique.....	6
2.3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE	8
2.3.1 Code de calcul.....	8
2.3.2 Hypothèses de calcul	8
2.3.3 Grandeurs exploitées	9
2.3.4 Limites des modèles incendie en situation de sous-oxygénation	9
3. APPLICATION DES MÉTHODES DE CONTRIBUTION DU BOIS AU CAS D'UN INCENDIE DE LOGEMENT DANS UN BÂTIMENT D'HABITATION	11
3.1 CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE	11
3.2 FOYER PRIMAIRE	12
3.3 BOIS DE STRUCTURE MONOPOLISABLE.....	12
3.4 ÉNERGIE LIBÉRÉE.....	13
3.5 TEMPÉRATURE	15
4. APPLICATION DES MÉTHODES DE CONTRIBUTION DU BOIS AU CAS D'UN INCENDIE DE BUREAU	17
4.1 CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE	17
4.2 FOYER PRIMAIRE	17
4.3 BOIS DE STRUCTURE MONOPOLISABLE.....	18
4.4 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE 1	18
4.5 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE 2	22
5. BILAN SUR LES MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DU BOIS	25
5.1 ANALYSE DES MÉTHODES.....	25
5.2 PROBLÉMATIQUE DES CAS DE SOUS-OXYGÉNATION : PROPOSITION D'UNE MÉTHODE	25
5.2.1 Mise en évidence des limites de la modélisation	25
5.2.2 Modélisation par approche simplifiée.....	29
5.3 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE POUR LES ÉTUDES ISI	32
5.4 : COMPLÉMENTS DE TRAVAUX À ENVISAGER	33
6. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	34

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 (bâtiments d'habitation de la 3^{ème} et 4^{ème} famille et bâtiments relevant du Code du travail dont la hauteur du plancher le plus haut est inférieure 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 et révisée en juillet 2017 [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 à 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 [2],
- Phase 2 : étude du développement de feu avec prise en compte de la contribution du bois pour deux configurations types de local,
- Phase 3 : étude du comportement au feu d'une structure bois dans les deux configurations définies précédemment,
- Phase 4 : synthèse et guide méthodologique.

L'objet du présent rapport est de définir et d'évaluer les méthodes d'ingénierie permettant de prendre en compte l'influence et la contribution du bois sur les simulations numériques de développement d'un incendie et les actions thermiques en résultant. Les simulations permettant de déterminer les actions thermiques sont réalisées à l'aide du logiciel FDS (Fire Dynamics Simulator) [9][10] utilisé conjointement par le CSTB et Efectis depuis de nombreuses années pour la réalisation d'études variées.

Ce rapport présente :

- les méthodes développées par le groupement CSTB/Efectis pour répondre à la problématique posée,
- leur application sur les deux configurations de locaux, à savoir un logement T4 dans un bâtiment d'habitation, et un espace unique de bureau de plus de 150 m²,
- l'analyse sur la faisabilité et pertinence de ces méthodes,
- une proposition de méthodologie.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 INTRODUCTION

L'un des enjeux de cette étude est de pouvoir prendre en compte la contribution du bois dans le développement d'incendie, avec la possibilité de reproduire les phénomènes d'auto-extinction.

En étude d'ingénierie incendie, l'évaluation du comportement au feu des structures sous incendie réel consiste en premier lieu à étudier le développement d'incendie et à définir les actions thermiques en fonction des scénarios d'études retenus. Pour cette étude les caractéristiques des combustibles en

termes de débit calorifique (MW) et de charge calorifique (MJ) prise en compte sont celles données dans les Eurocodes.

Une approche simplifiée de prise en compte de la contribution du bois de structure, consiste alors à augmenter la durée de l'incendie au prorata de la quantité de bois mobilisable, tout en conservant la puissance (débit calorifique) du foyer primaire. Cette approche a deux limites. Tout d'abord, on suppose dans ce cas que tout le bois de structure participe à l'incendie. Les phénomènes d'auto-extinction, s'ils ont lieu, ne sont pas reproduits. L'approche serait donc enveloppe dans certains cas. Seconde limite, l'augmentation du débit calorifique par les surfaces de bois en feu n'est pas considérée. On peut alors sous-estimer l'augmentation des températures ou l'augmentation d'imbrulés dans le compartiment et une large combustion externe. L'approche pourrait donc être éventuellement non sécuritaire dans d'autres cas, notamment pour une évaluation des propagations en façade.

Ainsi une approche plus adaptée pour prendre en compte le bois de structure, consiste à ajouter des surfaces de feu supplémentaires (foyers secondaires) correspondant aux surfaces de bois. Une approche empirique de la dégradation du bois serait alors retenue où un débit de pyrolyse est imposé à la surface de bois dès lors que celle-ci atteint un critère d'inflammation. L'étude bibliographique a montré en effet les contraintes quant à l'emploi de modèles de dégradation complexes, où de nombreuses données spécifiques à chaque produit « bois » doivent être connues ou bien caractérisées expérimentalement. Pour définir la quantité de bois mise en jeu et pouvoir reproduire les phénomènes d'auto-extinction, le débit de pyrolyse ne serait plus libéré quand le critère d'inflammation n'est plus conservé.

Au regard du retour d'expériences des études d'ingénierie réalisées en France depuis 2004 par les différents laboratoires ou les bureaux d'études, il a été choisi deux méthodes pour utiliser cette approche :

- Une méthode simplifiée qu'on appellera « méthode itérative prescrite » (Méthode 1) pour une implémentation classique dans les modélisations avec un critère simple d'ignition et des calculs itératifs ;
- Une méthode plus détaillée qu'on appellera « méthode implicite par flux critique » (Méthode 2), nécessitant une modification du code source du logiciel FDS pour tenir compte d'une loi d'ignition en fonction de bilan thermique en surface du bois, et la réalisation d'un calcul unique.

2.2 DESCRIPTION DES MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DU BOIS

2.2.1 Méthode 1 : méthode itérative prescrite

Il s'agit tout d'abord de découper les surfaces de paroi, plafond et plancher de bois de structure en surfaces élémentaires ayant les propriétés thermiques du bois. Des surfaces de l'ordre de 1 à 2 m² maximum sont préconisées. Pour des éléments de structure spécifiques comme des poteaux ou des poutres, on pourra utiliser des surfaces plus petites.

Dans un premier temps, une simulation de référence, appelée « itération 0 », est réalisée avec le foyer primaire. Elle permet de déterminer en se basant sur une température d'ignition du bois de 300°C, comme identifiée lors de l'analyse bibliographique [2], les surfaces élémentaires pouvant être impliquées et sous quel délai. Un critère de flux incident de 8 kW/m² peut aussi être retenu au lieu d'un critère de température.

Ensuite une nouvelle simulation ou « itération 1 », est réalisée en considérant les surfaces impliquées aux instants repérés. Une cinétique rapide (atteinte de la puissance maximale en 30 secondes) et un débit calorifique surfacique pour le bois de 100 kW/m² sont considérés. Ce processus peut être réitéré jusqu'à obtenir une convergence des surfaces de bois à prendre en compte.

À ce stade, deux approches sont envisagées pour estimer la durée de contribution du bois structurel à la combustion.

Pour la première approche, à chaque itération, un calcul de transfert thermique dans le bois est réalisé à posteriori à partir de l'évolution de température de surface. Sur la base de l'isotherme à 300°C, on estime la profondeur de bois consommée. On a ainsi pour chaque surface de bois en feu une courbe élémentaire et spécifique d'évolution du débit calorifique.

La deuxième approche consiste plus simplement à prescrire forfaitairement une courbe élémentaire de débit calorifique en supposant à priori que 80% de l'épaisseur de bois (20% résiduel sous forme de charbon ou cendre) brûlera. Toutefois, on vérifie à chaque itération que la température de surface est toujours bien supérieure au critère de 300°C. Dans le cas contraire, il sera considéré l'extinction de la surface à l'instant repéré.

Remarque : La première approche sera appliquée pour le cas de logement. On étudiera lors de l'application de la méthode au cas de bureau les deux approches pour définir celle à retenir.

Il est important de rappeler que les paramètres d'ignition de 300°C ou de 8 kW/m² sont des valeurs génériques, mais doivent être vérifiés pour chaque type de structure de bois étudiée.

2.2.2 Méthode 2 : méthode implicite par flux critique

Afin d'estimer la durée de combustion, le CSTB a étudié les phénomènes d'allumage et d'extinction du bois qui conditionnent *de facto* cette durée.

Des travaux préliminaires réalisés au CSTB (essais au cône calorimètre sur échantillons de structures bois) ont mis en évidence que les températures d'inflammation et d'extinction du bois dépendent des conditions thermiques auxquelles est soumise la paroi.

Une exploitation ultérieure de ces essais a permis de mettre en évidence un critère unique d'inflammation et d'extinction, de la forme $T_{limite} = f(FLUX_{net})$. La grandeur T_{limite} correspond à une valeur de température de surface de bois au-dessus de laquelle les flammes apparaissent, et en dessous de laquelle les flammes disparaissent. Cette limite correspond à l'apparition ou à la disparition visuelle des flammes vives lors des essais, et non celle de l'incandescence, qui peut se prolonger sur des durées importantes après extinction des flammes. L'effet de l'incandescence n'est pas pris en compte par cette approche.

La méthode décrite ici fait l'hypothèse que l'apparition des flammes coïncide avec le début de pyrolyse. En pratique la pyrolyse du bois démarre avant l'apparition des flammes, mais cela n'a pas d'impact significatif sur le comportement du bois ou les actions thermiques.

La Figure 2-1 présente les données d'essai et la mise en forme du critère associé.

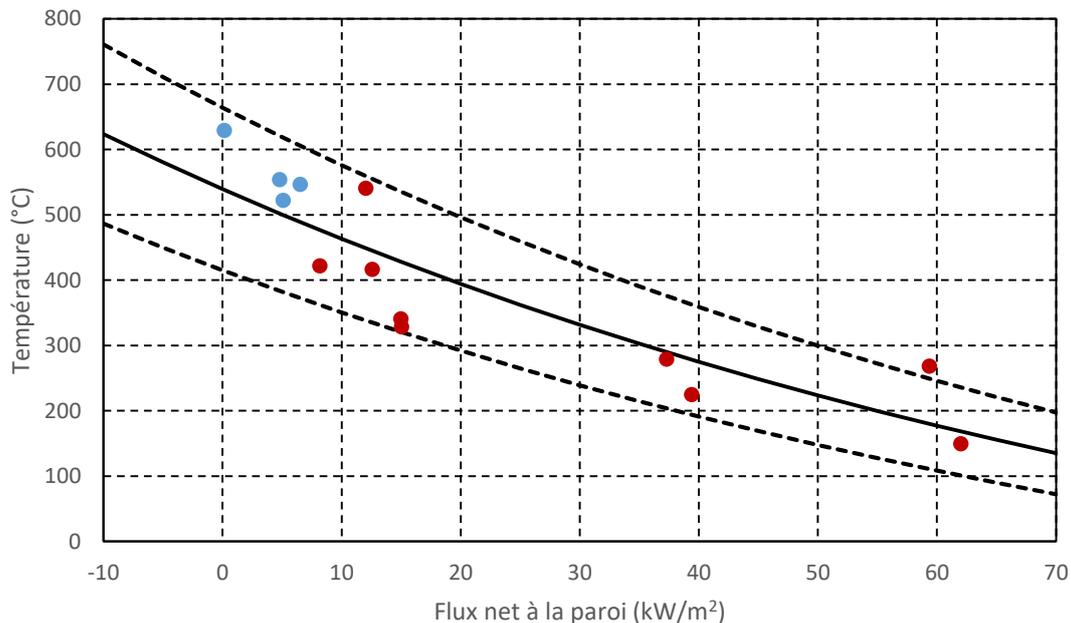


Figure 2-1: Conditions thermiques à l'allumage (en rouge) et à l'extinction (en bleu)

Les points rouges présentent les résultats des différents tests d'allumage, les points bleus ceux des tests d'extinction. Les valeurs de températures sont celles relevées à la surface du bois lors des essais. Les mesures ont été faites par thermocouples implémentés de plusieurs manières, afin de limiter l'impact des méthodes de mesure. Les valeurs de flux sont reconstruites à partir des données d'essais disponibles (en particulier flux radiatif incident).

La courbe noire en trait plein présente la meilleure corrélation des données sous la forme :

$$T_{limite} = T_0 \cdot e^{\varphi/\varphi_0} \quad \text{[Équation 1]}$$

avec $T_0 = 529.7^\circ\text{C}$
et $\varphi_0 = 103.4 \text{ kW/m}^2$

Les courbes en traits pointillés de la Figure 2-1 présentent la même corrélation pour des valeurs dispersées à -3σ et $+3\sigma$.

Pour des valeurs de flux net classiques de l'ordre de 20 kW/m^2 , on retrouve bien des températures d'inflammation proche de $400^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$. Cette température ne correspond pas au début de pyrolyse du bois qui a lieu à une température de l'ordre de 300°C , mais bien à son inflammation.

L'implémentation de l'approche dans le modèle FDS ne considère pas la quantité de bois disponible. Aussi, ce modèle ne permet pas pour le moment de prédire l'extinction par épuisement du combustible bois. Ce point fait partie des pistes d'amélioration de la méthode. Sans cette amélioration, pour les cas où il n'y a pas d'auto-extinction, il est donc nécessaire d'évaluer manuellement la durée de combustion du bois. Cela peut par exemple être fait sur la base du débit calorifique cumulé et de la chaleur de combustion du bois. Toutefois, l'intégration d'une combustion totale du bois disponible n'est pas l'objectif de la présente étude, ce cas pouvant être plus simplement traité.

Il est important de souligner que les paramètres de corrélation doivent être vérifiés par caractérisation pour chaque essence et chaque forme de bois employée (brut, lamellé-collé, CLT, etc.). Les essais de caractérisations sur échantillons doivent fournir les températures d'inflammation et d'extinction dans différentes conditions de flux. On pourra se référer à la norme ISO 5660-1.

2.3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

2.3.1 Code de calcul

Compte tenu de la volumétrie et de la problématique, on utilise le modèle de champ tridimensionnel FDS (Fire Dynamics Simulator) développé aux États-Unis par le NIST (National Institute of Standards and Technology), et employé par Efectis et le CSTB depuis de nombreuses années, pour calculer la contribution du bois à l'incendie ainsi que déterminer les actions thermiques dans les locaux choisis. La version 6.5.2 [10] a été utilisée. Elle a été modifiée pour prendre en compte la méthode présentée au paragraphe 2.2.2.

FDS est un modèle de champs aux volumes finis permettant de résoudre sur une grille de calcul tridimensionnelle les équations de la mécanique des fluides décrivant le mouvement des fluides à faible nombre de Mach. Ce type d'écoulement est caractéristique des incendies en bâtiment. La turbulence est modélisée à l'aide de la technique de simulation des grandes échelles ou LES (Large Eddy Simulation en anglais).

Un modèle de combustion basé sur une hypothèse de réaction infiniment rapide, un modèle de rayonnement et un modèle de conduction de la chaleur dans les parois sont couplés à ce modèle aérodynamique de façon à représenter les phénomènes principaux mis en jeu lors d'un incendie en bâtiment.

Ce code fournit, en fonction du temps et en tous points tels que la température des gaz, mais également des informations sur les transferts thermiques dans les solides permettant d'obtenir entre autres les températures de surface.

Le lecteur pourra se référer à McGrattan [9] pour une présentation exhaustive du logiciel et des modèles employés.

Le domaine dans lequel seront calculées les grandeurs physiques constitue le modèle numérique. Idéalement, il doit représenter la géométrie et les dimensions réelles du bâtiment.

Les modèles retenus résultent de ce compromis entre la finesse de résultat recherchée et le temps de calcul pour la géométrie et les dimensions réelles des espaces étudiés. Des tailles de maille élémentaire de dimensions 0,20 m à 0,35 m sont donc employées. Du fait de cette discrétisation, des adaptations légères de la géométrie, sans incidence sur les résultats de calculs, peuvent être faites.

2.3.2 Hypothèses de calcul

Les propriétés thermo-physiques du bois extraites de l'Eurocode 5 [11] et présentées dans le (* : à ces niveaux de température on considère qu'il ne reste plus qu'une valeur résiduelle de l'ordre de 10% [2])

Tableau 2.1 ont été retenues. Nous considérerons un bois de masse volumique (sec) de 450 kg/m³ et d'un taux de teneur en eau de 12 % massique (soit une masse volumique de 504 kg/m³ à 20 °C). L'émissivité du bois est de 0,8 conformément à l'Eurocode 5.

Température [°C]	Conductivité thermique [W/m/K]	Chaleur spécifique [J/kg/K]	Masse volumique [kg/m ³]
20	0,120	1530	504
99	0,133	1770	504
100	0,133	13600	504
119	0,136	13580	450
120	0,136	2120	450
200	0,150	2000	450
250	0,123	1620	418,5
300	0,097	710	342
350	0,070	850	234
400	0,077	1000	171
500	0,090	1200	148,5

Température [°C]	Conductivité thermique [W/m/K]	Chaleur spécifique [J/kg/K]	Masse volumique [kg/m ³]
600	0,176	1400	126
800	0,350	1650	117
1200	1,500	1650	50*

(* : à ces niveaux de température on considère qu'il ne reste plus qu'une valeur résiduelle de l'ordre de 10% [2])

Tableau 2.1 : Propriétés thermo-physiques du bois)

Du béton est utilisé pour représenter le sol. Les propriétés extraites de l'Eurocode 2 partie 1-2 [6] sont employées, ainsi qu'une émissivité de 0,8. La masse volumique du béton est considérée constante et égale à 2300 kg/m³.

On rappelle que le débit calorifique surfacique dégagé par le bois est fixé à 100 kW/m² conformément à [2]. Pour la réaction de combustion, un combustible de type cellulosique dont les caractéristiques sont les suivantes est retenu :

- Composition : C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5} ;
- Taux de production massique de suies : 1,0 % ;
- Taux de production massique de CO : 0,4 % ;
- Chaleur de combustion prise en compte dans les simulations : 14 MJ/kg.

Pour la fraction de l'énergie rayonnée par la flamme, la valeur par défaut de FDS est utilisée, à savoir une fraction radiative de 0,35.

Enfin, afin de tenir compte de la ruine des vitrages, un critère de ruine de 15 kW/m² a été retenu. Pour éviter un problème de sous-ventilation en début d'incendie un ouvrant est ouvert.

2.3.3 Grandeurs exploitées

Les simulations réalisées visent d'une part à caractériser la contribution du bois à l'incendie, et d'autre part à évaluer les actions thermiques subies par les éléments de structure. Les grandeurs étudiées sont les suivantes :

- Le débit total calorifique de l'incendie
- Le débit calorifique dégagé dans le local
- La température de surface et des gaz en °C.

2.3.4 Limites des modèles incendie en situation de sous-oxygénation

Le principe de la modélisation d'un scénario de feu en ingénierie est basé sur la prescription d'une courbe d'évolution du débit calorifique sur une surface qui représente la vitesse de production des gaz de pyrolyse en fonction du temps.

Le combustible et la ventilation (apport en oxygène) sont les principaux facteurs contrôlant le développement du foyer d'incendie dans un local. On a donc un contrôle du développement :

- Soit par le combustible c'est-à-dire sans limitation en oxygène
- Soit par la ventilation, en fonction de la surface d'ouvrant disponible dans le local.

Pour un foyer contrôlé par le combustible, l'apport en oxygène est suffisant pour qu'il puisse libérer l'énergie librement, alors que pour un foyer contrôlé par la ventilation, la puissance dégagée est limitée par l'apport en oxygène.

Mais, si dans la réalité le matériau combustible en sous-ventilation peut continuer à pyrolyser en produisant des gaz inflammables qui sont susceptibles de s'embraser quand ils retrouvent des conditions de ventilation adaptées (flammes à l'extérieur par exemple), et à apporter de l'énergie dans le local, la modélisation va continuer de fournir un apport de masse en gaz combustible dans le volume. Cet apport de masse de gaz de pyrolyse conduit à modifier les conditions aérauliques d'entrée d'air frais dans le local et placer les foyers primaires et secondaires en sous-oxygénation. En conséquence, la modélisation des conditions aérauliques peut avoir une rétroaction forte, en particulier sur la prédiction des actions thermiques.

Cette problématique est présente dans les cas usuels d'ingénierie incendie en l'absence de bois. Toutefois, les hypothèses de modélisation employées dans ces cas, en particulier pour la modélisation de la réponse thermique des parois, permettent de compenser les éventuelles erreurs en termes d'actions thermiques dues à la modélisation aéraulique. Dans le cas présent où l'on cherche à prédire la contribution des structures bois à l'incendie, il est nécessaire d'avoir des hypothèses beaucoup plus fines, qui ne permettent pas cette compensation. La bonne modélisation des conditions aérauliques est donc beaucoup plus importante que pour une ingénierie classique.

Ainsi, dans le cas de configurations de locaux où le foyer primaire présente une puissance à la limite de capacité de régime de ventilation, il est à craindre que l'apport supplémentaire de la combustion du bois conduise à favoriser des conditions de sous-oxygénation avec une réduction de la puissance à l'intérieur. Pour ces situations, une attention particulière devra portée sur l'application des méthodes proposées.

3. APPLICATION DES MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DU BOIS AU CAS D'UN INCENDIE DE LOGEMENT DANS UN BÂTIMENT D'HABITATION

3.1 CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE

La typologie d'appartement proposée est un appartement type T4 (cf. Figure 3-1) dont l'ossature est partiellement en bois.



Figure 3-1 : Schéma de l'appartement

On considère un feu dans un salon/salle à manger (cf. Figure 3-1) d'une surface de 26 m² (5 × 5,2 m²) et d'une hauteur de 2,5 m. Cette pièce communique avec un balcon-terrasse via une baie vitrée de 1,95 m de large et 2,4 m de haut. La pièce dispose de deux fenêtres de 0,6 × 0,75 m² et 1 × 0,75 m² de dimensions. La baie et les fenêtres sont supposées totalement ouvertes dès le début du scénario.

La Figure 3-2 présente le modèle géométrique FDS pour les simulations

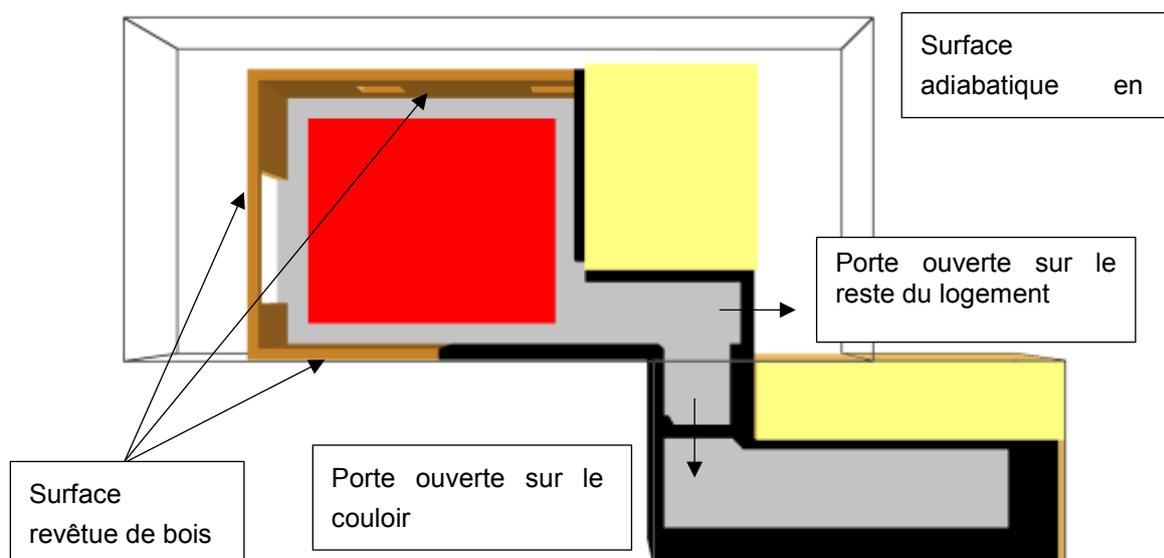


Figure 3-2 : Logement Vue de dessus (plafond revêtu de bois masqué) du modèle géométrique FDS

3.2 FOYER PRIMAIRE

La puissance surfacique hors contribution du bois est prise égale à 250 kW/m^2 ([6],[7]). Si l'on ignore la structure bois, le débit calorifique dans la pièce atteint $6,5 \text{ MW}$ en admettant un embrasement généralisé (choix sécuritaire). La charge calorifique pour un logement est d'après [7] de 930 MJ/m^2 . L'évolution temporelle du débit calorifique est tracée en noir sur la Figure 3-3. La puissance croît d'abord comme αt^2 , où t désigne le temps. La vitesse de développement du feu (cf. référence [6]) est caractérisée par un coefficient $\alpha=1/300^2 \text{ MW/s}^2$ (cinétique moyenne). Elle signifie que le débit calorifique est égal à 1 MW à $t = 300 \text{ s}$.

Le plateau horizontal est limité par la phase de décroissance qui commence lorsque 70 % de la charge calorifique totale a été consommée. D'après ces hypothèses basées sur l'Eurocode, l'état stationnaire se situe entre les instants 765 s et 3114 s . L'extinction se produit à $t = 5346 \text{ s}$, soit une durée de combustion de presque $1 \text{ h}30 \text{ min}$.

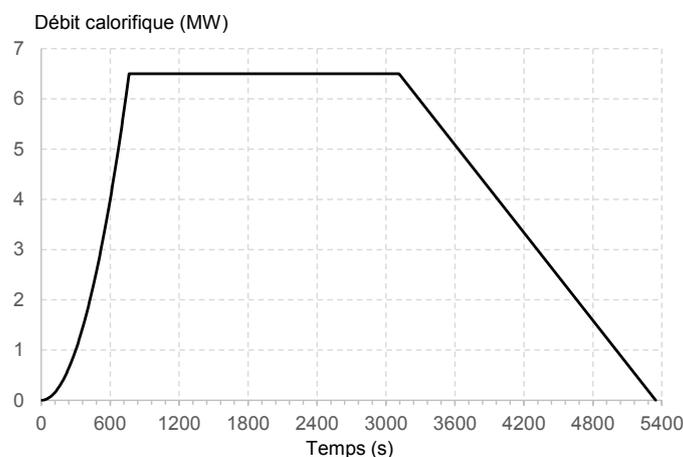


Figure 3-3 : Évolution temporelle du débit calorifique pour le foyer primaire de logement

Ce scénario ne prend pas en compte de propagation de l'incendie aux autres pièces du logement. Il a été convenu que seule la porte de la cuisine est fermée et intègre pendant toute la durée du scénario. Les autres portes sont ouvertes afin de permettre un accès à l'oxygène plus important pour le foyer.

3.3 BOIS DE STRUCTURE MONOPOLISABLE

On considère dans le cas du logement, du bois directement exposé aux flammes sur une partie des surfaces du salon. L'épaisseur du revêtement en bois a été fixée à 15 cm . La répartition envisagée (et arbitraire) est la suivante (voir Figure 3-2) :

- Le plafond est revêtu de bois,
- Le mur Nord est revêtu de bois,
- Le mur Ouest est revêtu de bois,
- Le mur Est n'est pas revêtu de bois,
- Le mur Sud est partiellement revêtu de bois (la moitié Ouest),
- Le sol n'est pas revêtu de bois.

Pour la méthode 1, des surfaces élémentaires de $0,8 \text{ m}$ de large, et $0,8 \text{ m}$ de long (pour les murs et le plafond) sont modélisés.

3.4 ÉNERGIE LIBÉRÉE

On montre dans un premier temps sur la Figure 3-4, l'évolution de la puissance obtenue avec la méthode 1 lorsqu'on considère la contribution de toutes les parois et du plafond. On constate sur l'énergie libérée que la contribution du bois est bien prise en compte avec une augmentation du débit calorifique totale de près de 5MW. Une grande partie de l'énergie est libérée à l'extérieur du local via les ouvrants. L'augmentation de la puissance est de l'ordre de 2MW à l'intérieur.

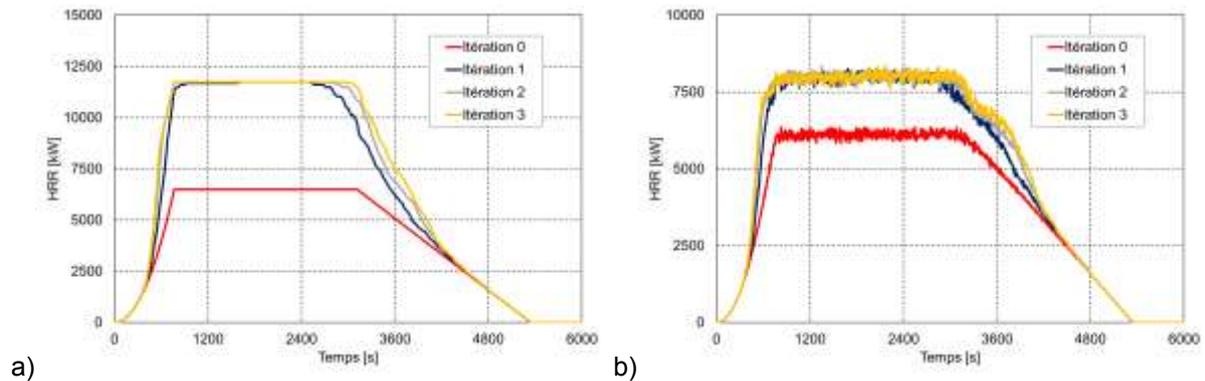


Figure 3-4 : Évolution du débit calorifique a) total b) libéré à l'intérieur du logement avec la Méthode 1 pour le cas avec contribution de toutes les parois

La Figure 3-5 ci-dessous présente les courbes de débits calorifiques obtenus avec la méthode 2 pour différents cas de contribution du bois :

- Parois verticales + plafond (courbe rouge)
- Parois verticales seules
- Trois ou deux parois verticales
- Aucune paroi (courbe bleue foncée, seul le foyer primaire est présent)

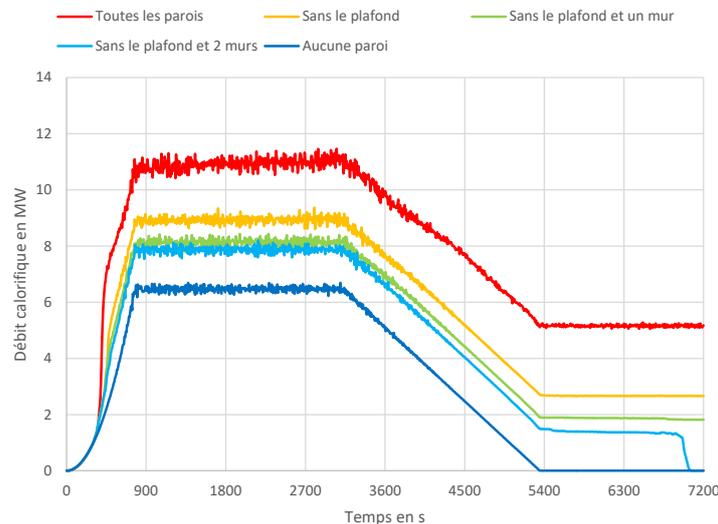


Figure 3-5 : Évolution du débit calorifique total avec la Méthode 2 pour différentes configurations de contribution des parois en bois

Ces courbes montrent la contribution du bois, qui s'élève à 5MW en régime permanent lorsque toutes les parois sont mobilisables, comme pour la méthode 1. Cette contribution dure au-delà de la durée du foyer primaire. L'auto-extinction survient lorsque seules deux parois verticales sont exposées.

La Figure 3-6 présente l'évolution de la puissance liée uniquement à la contribution du bois dans ce dernier cas : Cette contribution diminue quelques minutes avant l'extinction du foyer primaire, marquant le début de l'auto-extinction. Elle devient nulle moins de 30 min après l'extinction du foyer primaire.

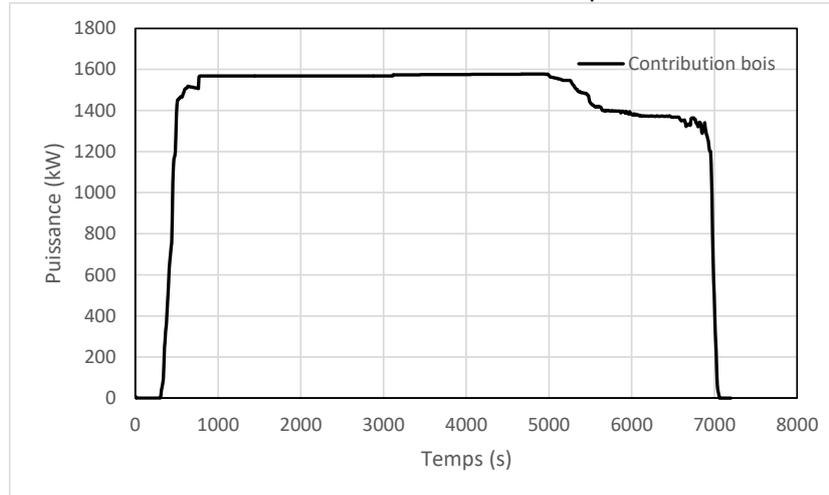


Figure 3-6 : contribution du bois en cas d'auto-extinction

Lorsqu'on compare la puissance libérée avec les deux méthodes pour la configuration où toutes les parois et le plafond participent (cf. Figure 3-7), on constate que le démarrage de la contribution a lieu au même moment et que la puissance libérée lorsque l'incendie est pleinement développé est quasi identique. La principale différence entre les deux méthodes intervient après l'extinction du foyer primaire qui entraîne dans le cas de la méthode 1, l'extinction des foyers secondaires (parois en bois).

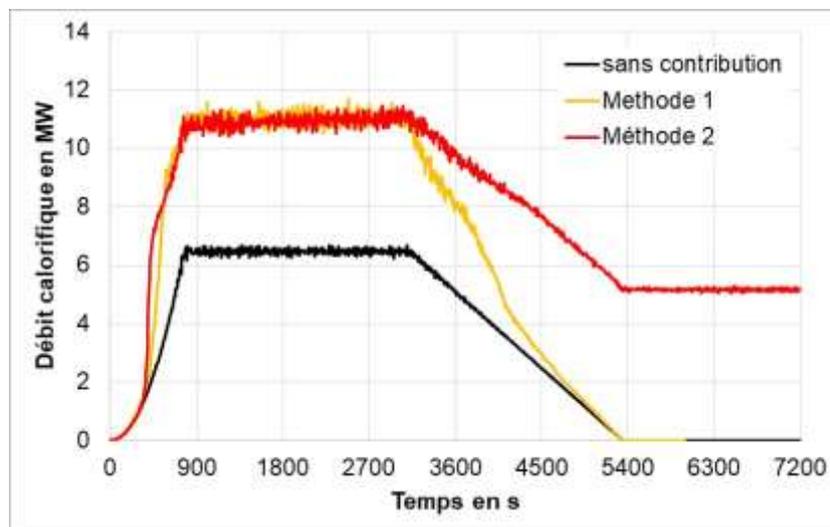


Figure 3-7 : Évolution du débit calorifique total avec la Méthode 1 et la Méthode 2 pour le cas avec contribution de toutes les parois

On rappelle que dans ce cas, la quantité de bois mis en jeu avec la méthode 1 est déterminée à partir de la profondeur de bois brûlé définie par l'isotherme à 300°C via un calcul de transfert thermique à postériori. Cette approche semble donc montrer une forte dépendance au foyer primaire.

3.5 TEMPÉRATURE

La Figure 3-8 présente les champs de température pendant la phase pleinement développée de l'incendie avec et sans contribution du bois (toutes les parois) pour la méthode 1. On note bien une augmentation de la température dans le volume.

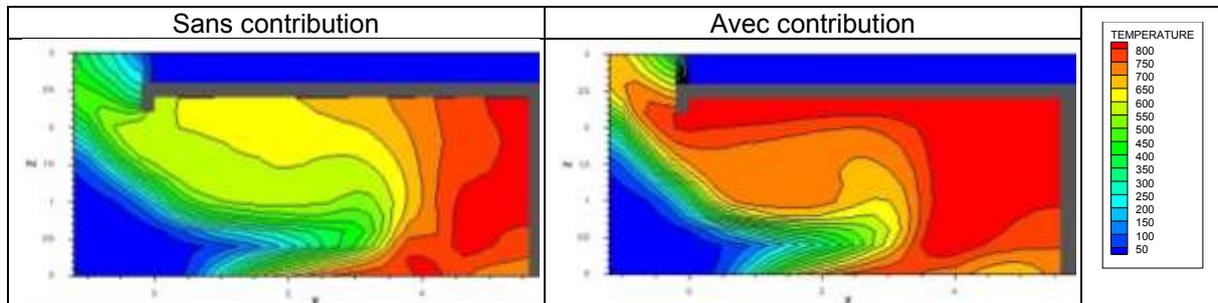


Figure 3-8 : Champs de température lors de l'incendie pleinement développé dans le logement avec la méthode 1

La contribution conduit à une augmentation significative des agressions reçues par les parois qui accusent une température de l'ordre de 850°C.

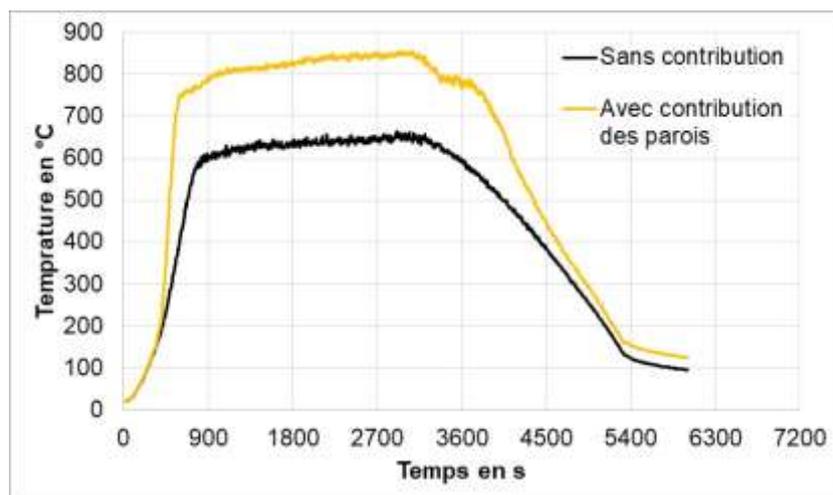


Figure 3-9 : Évolution de la température moyenne de surface des parois combustibles avec la Méthode 1 pour le cas sans contribution et le cas avec contribution de toutes les parois

La Figure 3-10 présente les champs de température pendant la phase pleinement développée de l'incendie pour les 5 cas de contribution du bois pour la méthode 2.

Elle montre l'augmentation de température d'ambiance dans le local avec l'augmentation de la contribution du bois. Par ailleurs, elle met également en évidence la complexité des écoulements au niveau de l'ouverture au fur et à mesure que le débit de gaz de pyrolyse augmente avec la contribution.

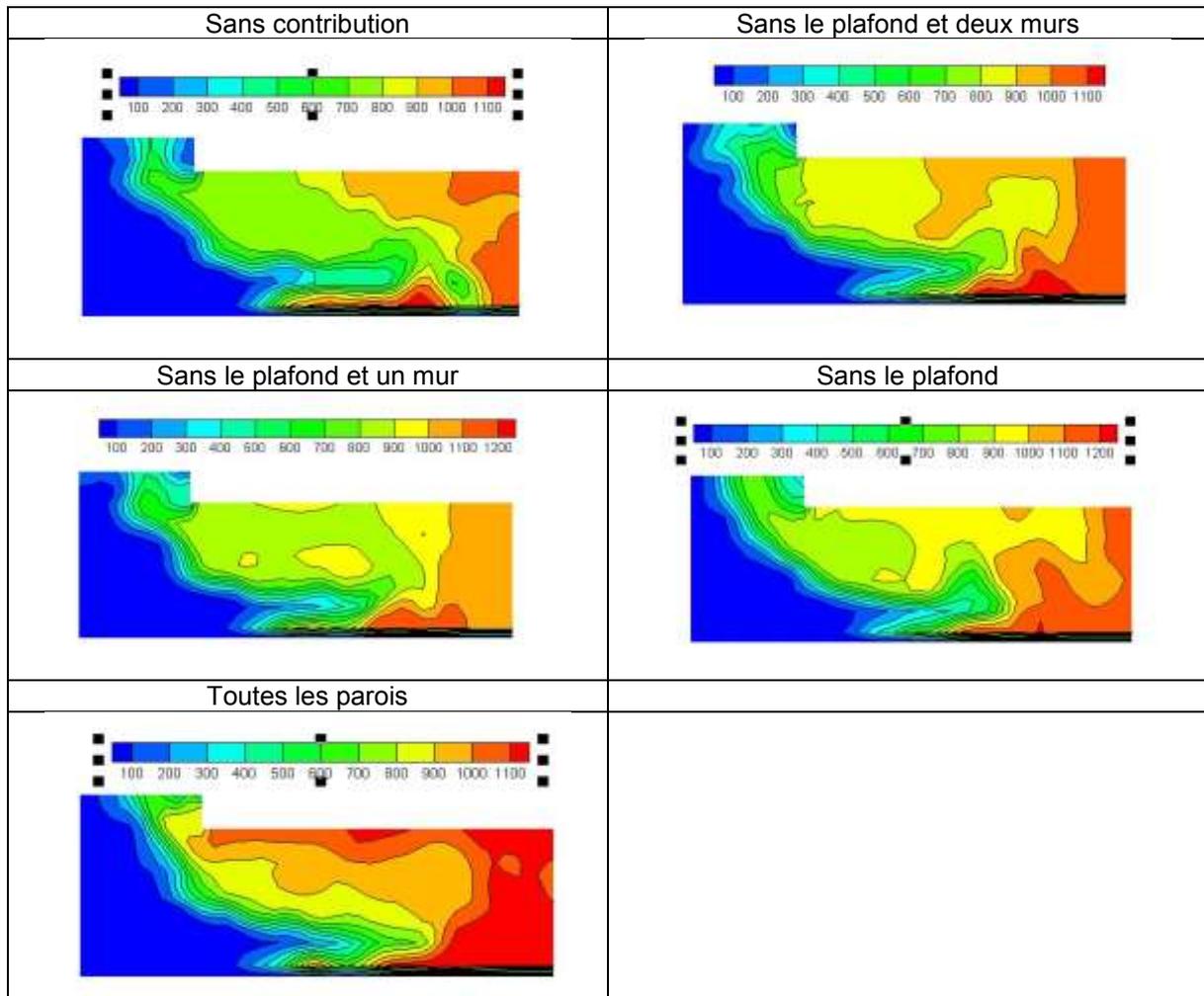


Figure 3-10 : Champs de température lors de l'incendie pleinement développé dans le logement avec la méthode 2 pour différents cas de contribution des parois en bois

4. APPLICATION DES MÉTHODES DE CONTRIBUTION DU BOIS AU CAS D'UN INCENDIE DE BUREAU

4.1 CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE

On considère un local de bureau de surface $14 \times 11,2 \text{ m}^2$ et de hauteur $2,8 \text{ m}$ avec 2 faces contiguës disposant de fenêtres de $1,6 \text{ m}$ de hauteur (cf. Figure 4-1). Le local comprend des poteaux en bois ainsi qu'un plafond et des parois en bois.

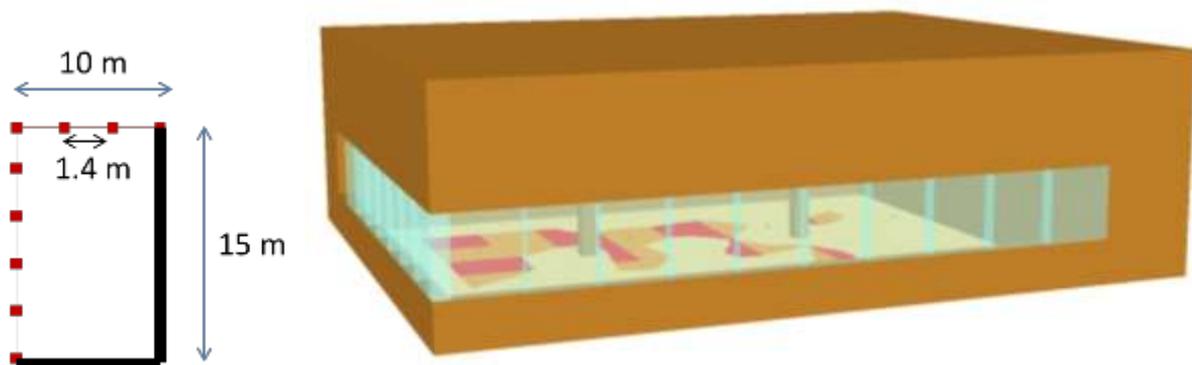


Figure 4-1 : Présentation de la géométrie du cas de « bureau »

4.2 FOYER PRIMAIRE

On considère un foyer sur toute la surface du bureau de surface $14 \times 11,2 \text{ m}^2$ et de hauteur $2,8 \text{ m}$. Conformément aux Eurocodes [5] une puissance surfacique de 250 kW/m^2 et une charge calorifique de 730 MJ/m^2 ont été retenues. Le foyer primaire est situé au niveau du sol avec un départ localisé dans un coin, puis se propage comme indiqué sur la Figure 4-2.

Le débit calorifique de ce foyer est présenté sur la Figure 4-3. Il atteint $39,2 \text{ MW}$ en pic. Sur cette figure est également indiqué le débit calorifique correspondant à chaque surface élémentaire de propagation du foyer primaire.

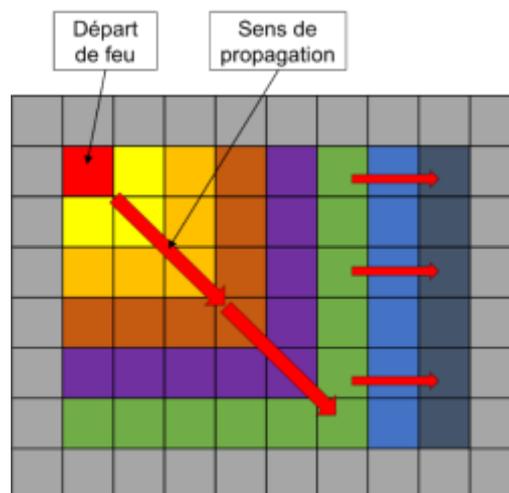


Figure 4-2 : Schématisation de la propagation du foyer primaire

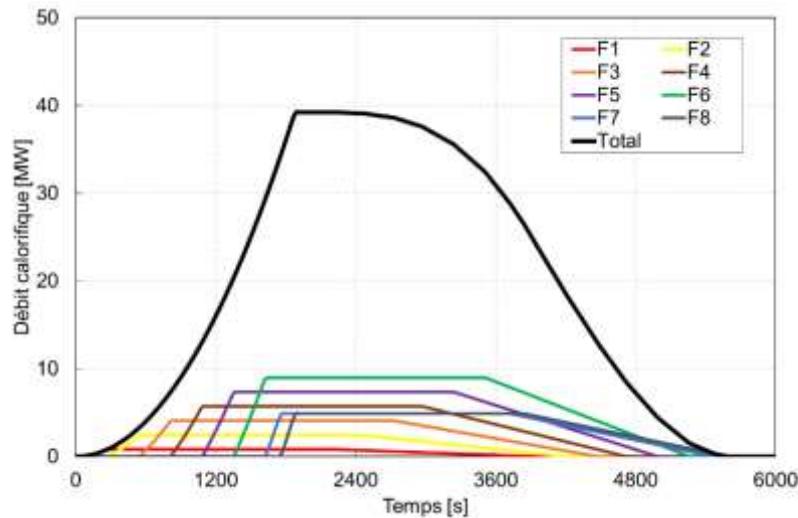


Figure 4-3 : Débits calorifiques totaux et associés à chaque surface de propagation

4.3 BOIS DE STRUCTURE MONOPOLISABLE

On considère une ossature bois composée de poutres (plancher) et de poteaux. La quantité de bois moyenne est fixée à $0,3 \text{ m}^3$ par m^2 de plancher. Il s'agit de la valeur moyenne d'un IGH de 15 étages (étude de cas réalisée par ADIVbois). Pour un bureau de 150 m^2 , cela correspond à une quantité de bois de 45 m^3 de bois. On considère que ce volume de bois est réparti sur la surface contribuant à l'incendie (plafond, murs et allèges). Des épaisseurs de bois de 180 mm seront ainsi utilisées.

Plusieurs configurations de surfaces de bois exposées seront considérées :

- Cas 0 : aucune paroi n'est en bois – 100% des surfaces de paroi/plafond du bureau sont protégées ou en matériau incombustible
- Cas 1 : seul le plafond est en bois (32 % des surfaces exposées) – les autres du bureau sont protégées ou en matériau incombustible
- Cas 2 : seule une paroi (la plus longue) est en bois (83 des surfaces exposées)– le reste des surfaces est protégé ou en matériau incombustible
- Cas 3 : seule la moitié de la paroi la plus longue est en bois - 39% des surfaces de paroi/plafond du bureau sont protégées ou en matériau incombustible

Pour la méthode 1, des surfaces élémentaires de $1,4 \times 1,4 \text{ m}^2$ de bois (foyers secondaires) sont employées pour les murs et le plafond.

4.4 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE 1

On montre Figure 4-4 l'évolution du débit calorifique total, et la part libérée à l'intérieur du compartiment dans le cas où seul le plafond est en bois (soit 32% des surfaces exposées protégées) en appliquant la méthode 1. Dans ce cas, la quantité de bois mis en jeu est déterminée à partir de la profondeur de bois brûlé définie par l'isotherme à 300°C via un calcul de transfert thermique à postériori.

On constate que la contribution du bois est prise en compte avec une augmentation du débit calorifique (15 MW). Mais, une grande partie de l'énergie est libérée à l'extérieur du compartiment. Le foyer primaire déjà limité par la surface d'ouvrant ne peut brûler plus de combustible à l'intérieur. On obtient même une réduction de la puissance à l'intérieur par sous-oxygénation.

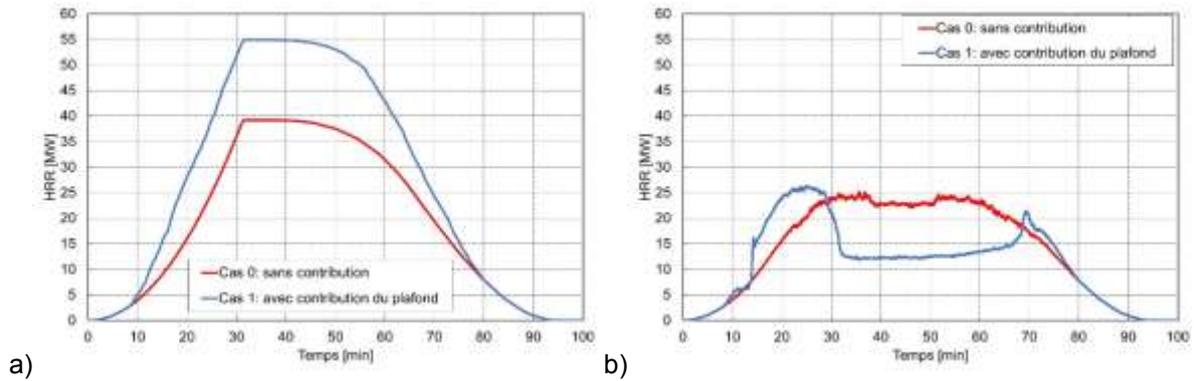


Figure 4-4 : Évolution du débit calorifique a) total b) libéré à l'intérieur du local Bureau avec la Méthode 1 – comparaison du cas sans contribution et du cas avec contribution du plafond

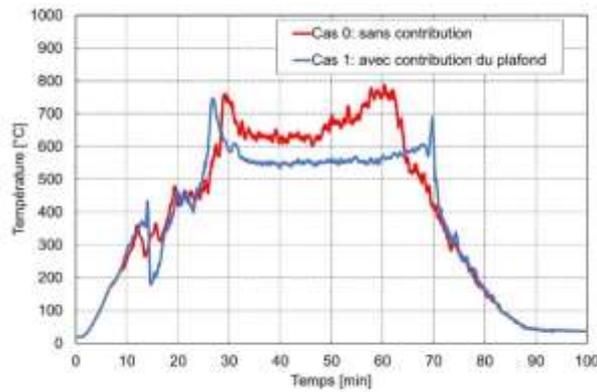


Figure 4-5 : Évolution de la température moyenne à l'intérieur du compartiment - avec la Méthode 1 – comparaison du cas sans contribution et du cas avec contribution du plafond

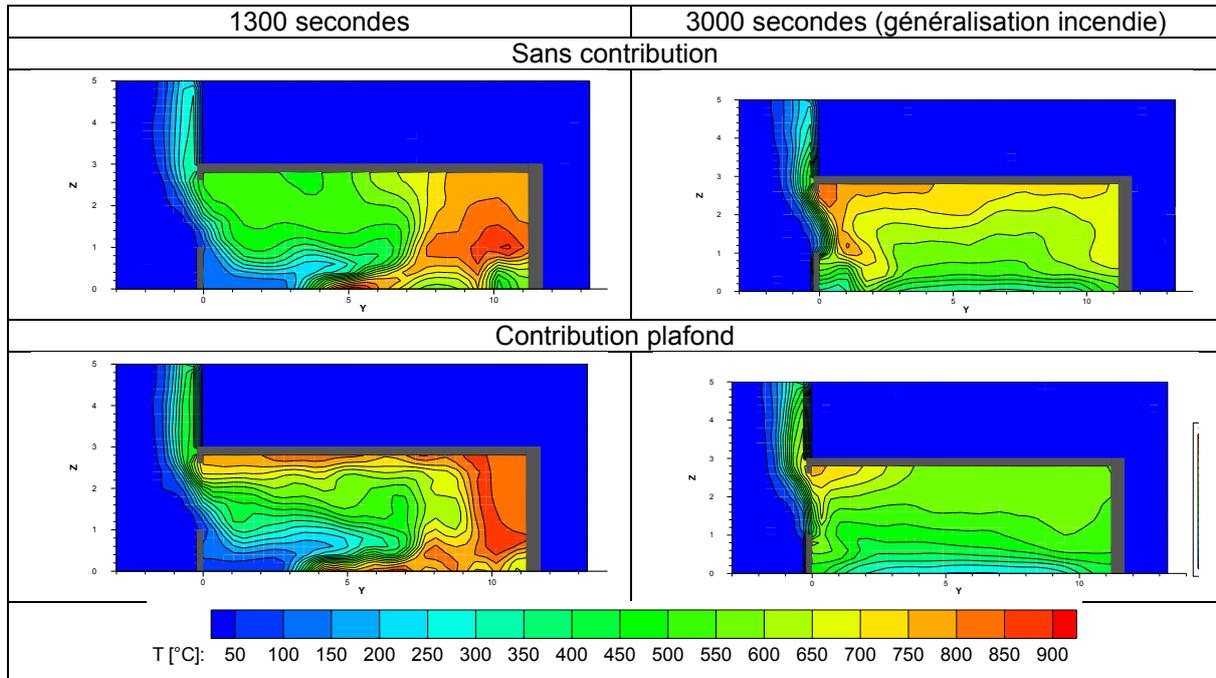


Figure 4-6 : Champs de température à l'intérieur du compartiment Bureau avec la Méthode 1 – comparaison du cas sans contribution et du cas avec contribution du plafond en bois

On observe sur la Figure 4-5 que si la moyenne des températures de gaz dans tout le local en début d'incendie est légèrement plus importante avec contribution du bois, elle est moins élevée lors de l'incendie pleinement développé, à cause d'un fort brassage avec l'air frais qui rentre massivement dans le local du fait d'un apport « artificiel » de masse de gaz de pyrolyse comme on peut l'observer sur les champs de température (cf. Figure 4-6). Ce résultat est lié en grande partie aux limites de la modélisation comme évoqué au § 2.3.4.

Indépendamment de cette défaillance du modèle numérique à bien prendre en compte la sous-oxygénation (ou saturation en gaz combustible dans le local), on notera comme pour l'application au cas de logement, une forte dépendance de la contribution de quantité de bois avec l'évolution du foyer primaire où la contribution du plafond en bois s'arrête avec l'extinction de celui-ci.

On propose alors d'employer une seconde approche pour définir la quantité de bois à prendre en compte comme indiqué au § 2.2.1. Cette fois-ci on suppose a priori la contribution de 80% du bois de la surface impliquée. L'extinction d'une surface élémentaire n'a lieu que si la température de surface est inférieure au critère d'inflammation de 300°C.

On peut observer la contribution du bois sur l'évolution du débit calorifique à l'intérieur du local pour les 3 cas (cf. Figure 4-7). Cette fois-ci la contribution ne s'arrête plus avec le foyer primaire. Il est possible d'obtenir des durées d'incendie plus importantes avec un auto-entretien de la combustion des foyers secondaires qui vont au-delà de deux heures en cas de contribution du plafond ou de la paroi. Dans le cas d'une demi-paroi, on observe même une auto-extinction de la surface de bois monopolisable au bout de 113 minutes, pour un foyer primaire qui dure 93 minutes.

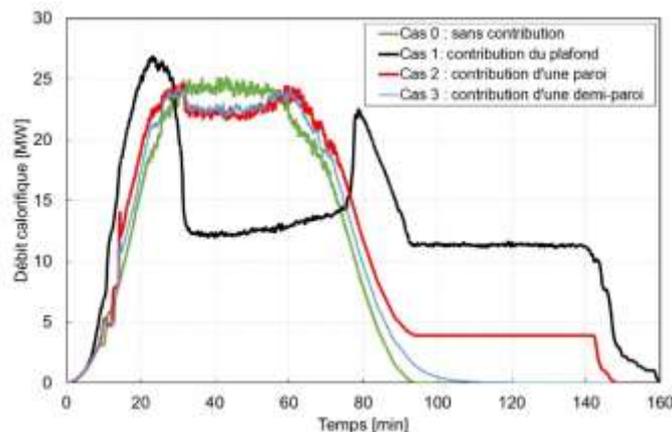


Figure 4-7 : Évolution de la puissance libérée à l'intérieur du compartiment Bureau pour différentes surfaces de contribution avec la Méthode 1

Indépendamment de cette prise en compte plus fine de la quantité de bois, on retrouve malgré tout le problème de sous-oxygénation ou saturation en gaz de pyrolyse, impliquant une libération importante de l'énergie en dehors du local (à l'extérieur) et réduisant celle à l'intérieur du local. On retrouve également sur l'évolution de la température moyenne des gaz dans le compartiment (cf. Figure 4-8), cet effet de réduction des niveaux de température avec l'augmentation de la surface en feu du bois monopolisable du fait du fort brassage avec l'air frais entrant (cf. Figure 4-9). Mais les valeurs restent encore pénalisantes pour le bois.

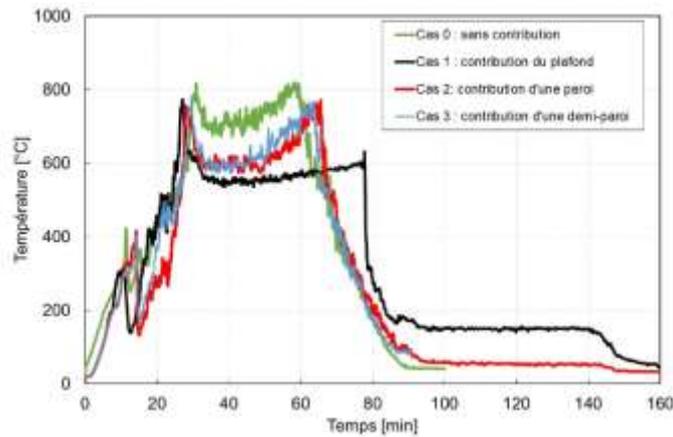


Figure 4-8 : Évolution de la température moyenne dans le compartiment Bureau pour différentes surfaces de contribution avec la Méthode 1

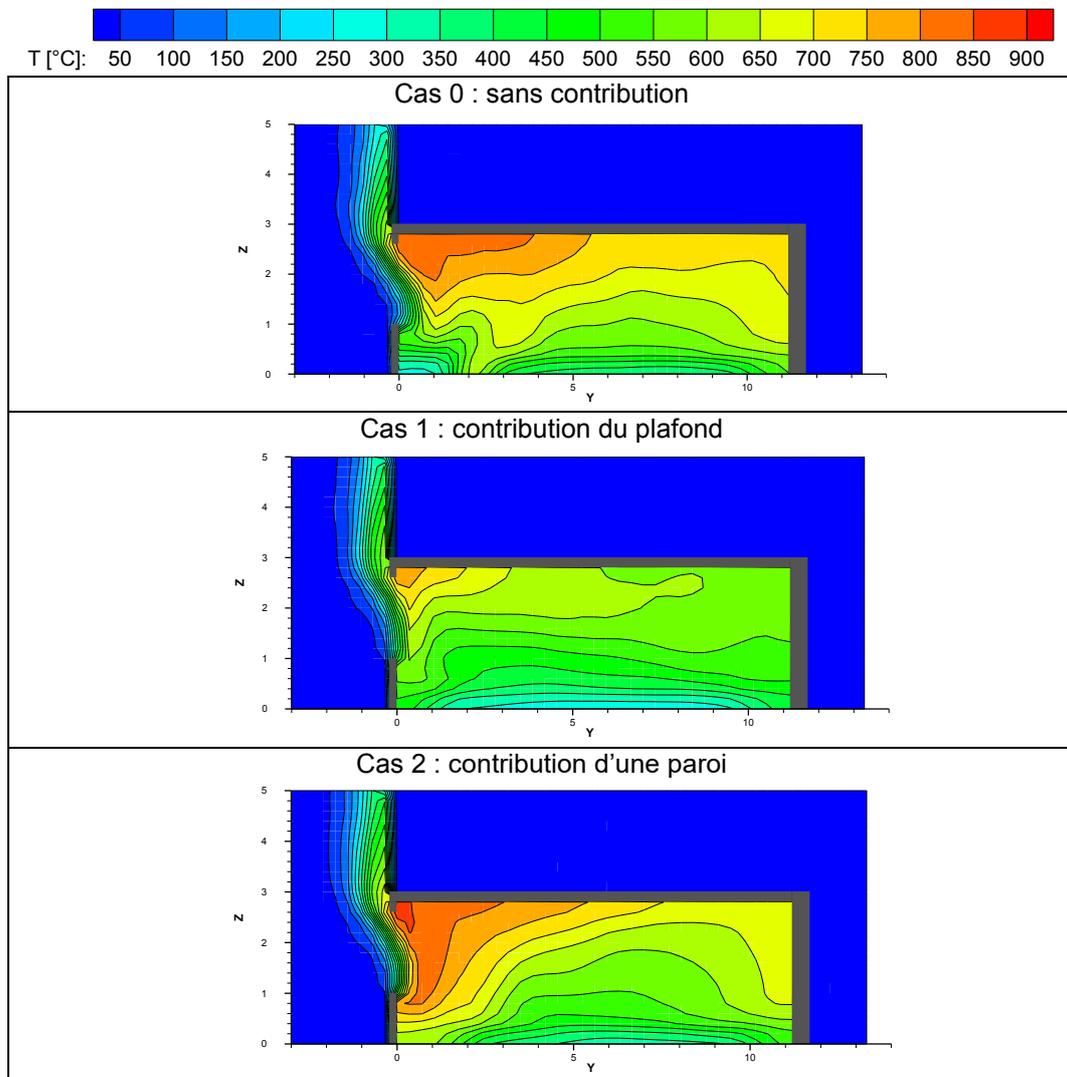


Figure 4-9 : Champs de température dans le compartiment Bureau pour différentes surfaces de contribution avec la Méthode 1 (feu pleinement développé)

On illustre sur Figure 4-10 l'influence du critère d'inflammation dans le cas 2 où seule la paroi contribue à l'incendie. Ainsi avec un critère de 350°C, un phénomène d'auto-extinction apparaît autour de 100 minutes. Le critère de 300°C reste acceptable, et est enveloppé. Une caractérisation fine de ce paramètre est donc importante pour reproduire plus fidèlement la durée de combustion et les phénomènes d'auto-extinction.

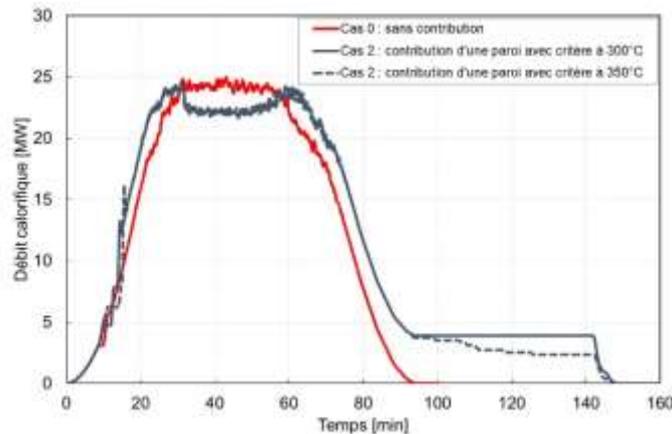


Figure 4-10 : Évolution du débit calorifique libéré dans le compartiment Bureau pour le cas 0 et cas 2 en fonction du critère d'inflammation avec la Méthode 1

4.5 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE 2

L'utilisation de la méthode 2 sur les cas d'incendie de bureau montre les mêmes types de résultats que la méthode 1. Sur la Figure 4-11 présentant les courbes de puissance des cas 0, 1 et 2, on observe ainsi le phénomène de sous-oxygénation, où l'apport massif en gaz de pyrolyse dans le local conduit à une réduction importante de la puissance à l'intérieur. L'accès à l'oxygène dans le local est limité et conduit à une combustion déportée à l'extérieur du local. Cet effet, essentiellement numérique, conduit à sous-estimer les actions thermiques vues dans le local (cf. Figure 4-12 et Figure 4-13).

La Figure 4-12 présente les températures moyennes dans le local. Elles mettent en évidence l'impact de la sous-oxygénation du foyer dans le modèle, qui sous-estime sensiblement les températures pour le cas 1.

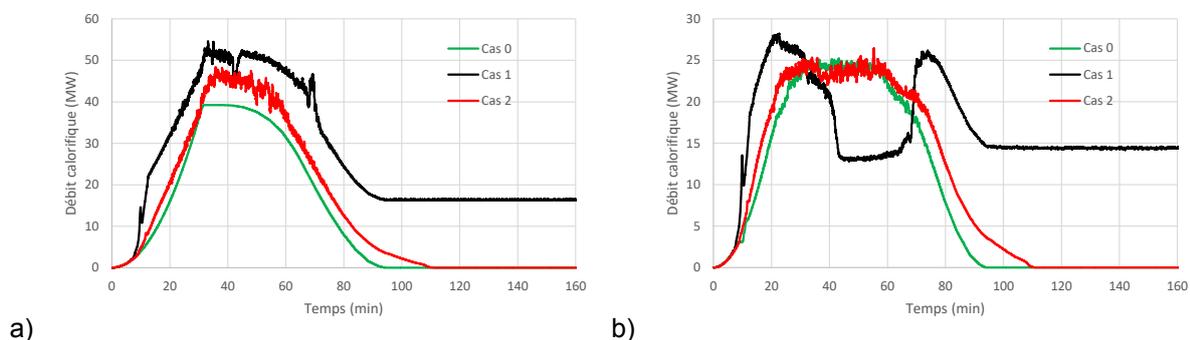


Figure 4-11 Évolutions du débit calorifique a) total b) libéré à l'intérieur du local Bureau avec la Méthode 2 – comparaison des cas 0, 1 et 2

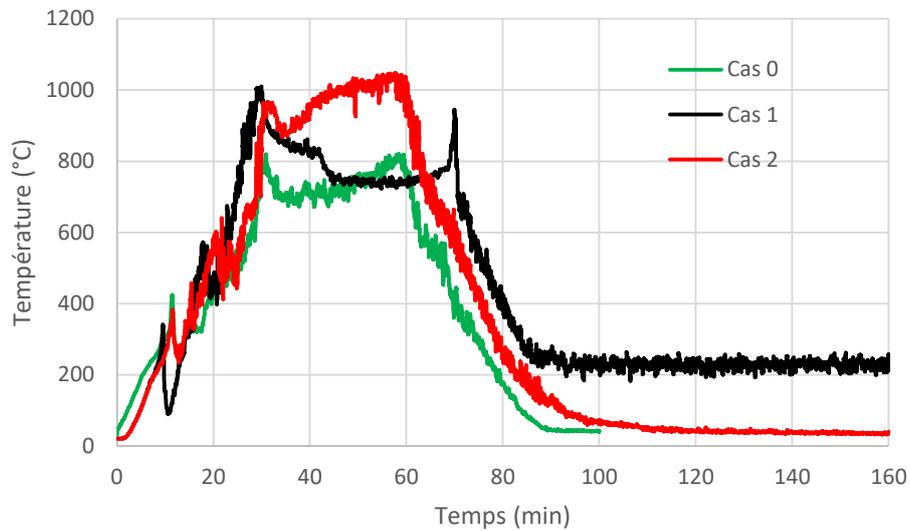


Figure 4-12 : Évolution de la température moyenne dans le compartiment Bureau pour différentes surfaces de contribution avec la Méthode 2

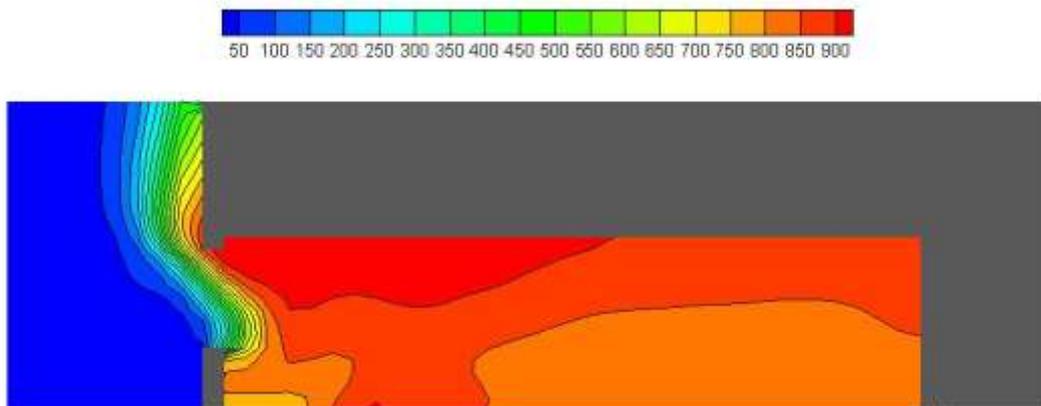


Figure 4-13 : Champs de température à l'intérieur du compartiment Bureau avec la Méthode 2 – Cas 1

Si l'on compare les deux méthodes pour un cas où le phénomène de sous-oxygénation est limité (cas 2 : contribution d'une paroi), on observe que les deux méthodes conduisent à monopoliser la même surface de bois. Le découpage des surfaces de bois en surfaces élémentaires de 2 m² employé pour la méthode 1 semble donc suffisant.

On notera que la méthode 2 permet d'identifier une phase d'auto-extinction en fin de sinistre alors que la méthode 1 consomme 80% de la masse du bois monopolisable¹.

¹ On suppose lors d'un sinistre que 20% de la masse est transformé en charbon et cendre

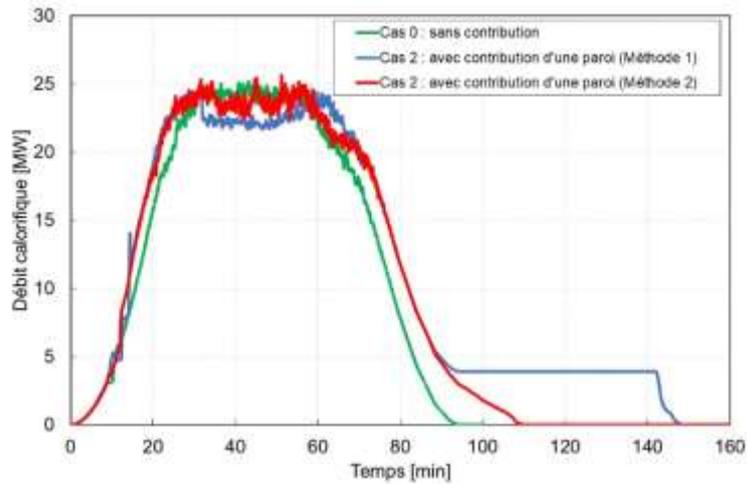


Figure 4-14 : Évolution du débit calorifique libéré à l'intérieur du local Bureau dans le cas de la contribution d'une paroi – comparaison Méthode 1 et Méthode 2

Les comparaisons en termes de températures montrent un comportement assez différent entre les deux méthodes (cf. Figure 4-15). Ceci illustre la sensibilité des modélisations à l'oxygénation du foyer et la localisation de la combustion.

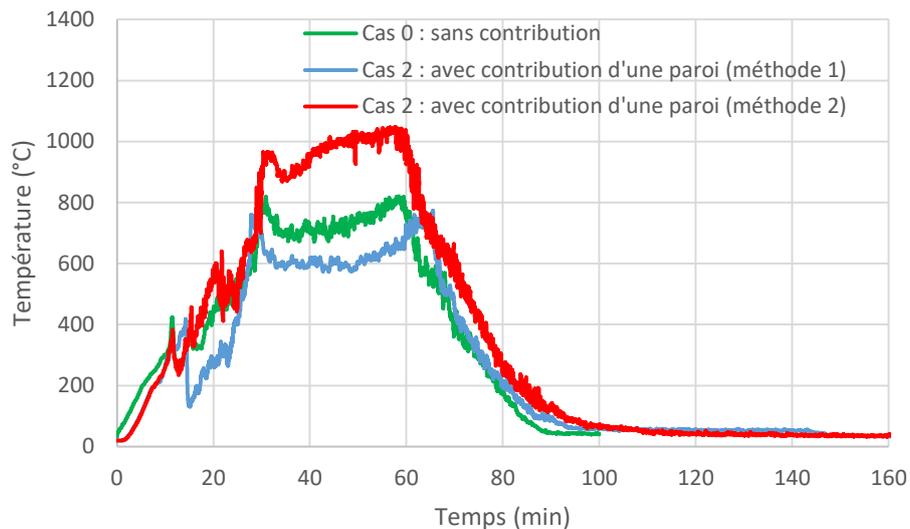


Figure 4-15 : Évolution des températures moyennes à l'intérieur du local Bureau dans le cas de la contribution d'une paroi – comparaison Méthode 1 et Méthode 2

5. BILAN SUR LES MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DU BOIS

5.1 ANALYSE DES MÉTHODES

Les deux méthodes ont montré leur capacité à prendre en compte la contribution du bois monopolisable en début d'incendie et lorsqu'il est pleinement développé en se basant soit sur un critère simple d'inflammation à 300°C pour la Méthode 1 et sur un critère de couple flux thermique/température limite pour la Méthode 2.

La Méthode 2 permet de prendre en compte l'auto-extinction plus précisément et de façon moins pénalisante. Elle semble qualitativement pertinente.

Avec la Méthode 1, il a été observé que la prise en compte de la quantité de bois à impliquer en considérant un état d'avancement de la carbonisation (isotherme à 300°C) était trop dépendante du foyer primaire. Une extinction dès lors que la température de surface redevient inférieure au critère de 300°C apparaît être une approche plus adaptée. Pour cette méthode, le critère d'inflammation a une influence non négligeable sur la quantité de bois impactée et la durée de contribution. Ainsi, lorsqu'on passe d'un critère de 300°C à 350°C, on obtient une auto-extinction des éléments en bois pour 20 % de la surface exposée dans le cas du bureau où une paroi seule contribue à l'incendie.

On notera que le ratio de surface exposée pour laquelle l'auto-extinction survient est de l'ordre de 30% dans les exemples étudiés. Cette valeur de ratio est une valeur qui doit dépendre de chaque cas d'étude.

Il peut être également déduit que les deux méthodes mettent en évidence une forte participation du plafond du fait de sa surface et de son exposition aux températures les plus élevées.

Par contre, quelles que soient les méthodes, les modélisations ont du mal à prédire une sous-oxygénation des foyers. En effet, dans le cas du bureau où le foyer primaire est déjà sous ventilé, le compartiment est déjà saturé en gaz combustibles. Ainsi, lorsque qu'il y a contribution du bois, les gaz de pyrolyse supplémentaires sont, soit consommés à l'extérieur et ne contribuent pas à l'échauffement de la structure, soit ils saturent encore plus le compartiment, engendrant une diminution de la température globale. Ainsi dans ces cas particuliers de régime de sous-oxygénation ou de saturation en gaz de pyrolyse, il paraît complexe de prédire de façon pertinente la contribution du bois avec les outils de modélisation actuels et en employant une approche empirique de la dégradation du bois (débit de pyrolyse constant prescrit à l'inflammation). Un contournement de cette difficulté est proposé par la suite.

Remarque : l'utilisation de modèle de dégradation plus complexe, qui limiterait en fonction des conditions de températures et de ventilation le débit de pyrolyse, n'est pas adaptée à une approche d'ingénierie (besoin en caractérisation fine des paramètres, temps de calcul, validation des modèles, etc.). Toutefois cela reste une piste à explorer

5.2 PROBLÉMATIQUE DES CAS DE SOUS-OXYGÉNATION : PROPOSITION D'UNE MÉTHODE

5.2.1 Mise en évidence des limites de la modélisation

On se propose dans un premier temps de montrer l'apparition de ce phénomène de saturation en gaz de pyrolyse. Pour ce faire, on applique la méthode 2 à une configuration réelle ayant fait l'objet d'un essai où les températures et le débit calorifique ont pu être mesurés.

L'étude bibliographique réalisée précédemment ([2]) a permis de cibler une série d'essais exploitables. Il s'agit des essais de McGregor [12] et Medina-Hevia [13]. Ces essais sont particulièrement intéressants, car ils présentent des comparaisons instrumentées entre des locaux avec et sans contribution du bois.

Ces essais ont été menés sur des compartiments similaires, de dimensions 3,5 x 4,5 x 2,5 m et présentant une ouverture unique de 2 x 1,1 m. Les structures (parois verticales et planchers) ont été réalisées en CLT 3 plis de 105 mm d'épaisseur. Pour les essais de McGregor [12], ceux-ci ont été menés avec des parois intégralement protégées ou intégralement non protégées. Dans le cas de parois protégées, les parois verticales et le plafond étaient protégés par deux plaques de plâtre résistantes au feu de 12,7 mm d'épaisseur. Le plancher était protégé par une plaque de plâtre résistante au feu de 15,9 mm et une plaque de ciment de 12,7 mm. Pour les essais de Medina-Hevia [13], la même protection a été appliquée. Seules une ou deux parois verticales ont été laissées non protégées.

Dans un premier temps, un modèle a été mis au point pour recalibrer les données obtenues sans contribution du bois. Le foyer a été prescrit à partir de la valeur expérimentale fournie dans les rapports [12] et [13]. Une valeur pic de l'ordre de 5,5 MW est estimée. Les valeurs prédites sont alors du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées. Toutefois, s'agissant d'un feu réel de mobilier, certains phénomènes ne peuvent être reproduits.

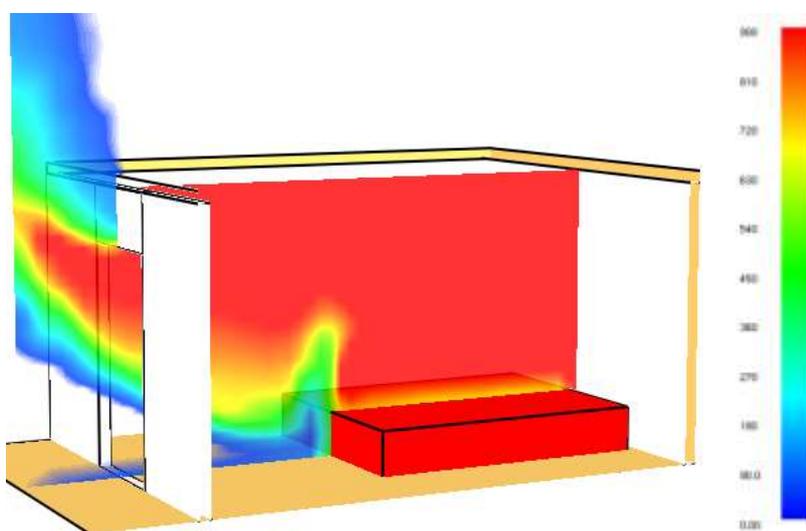


Figure 5-1 : Champs de température lors de l'incendie – Essai McGregor [12]

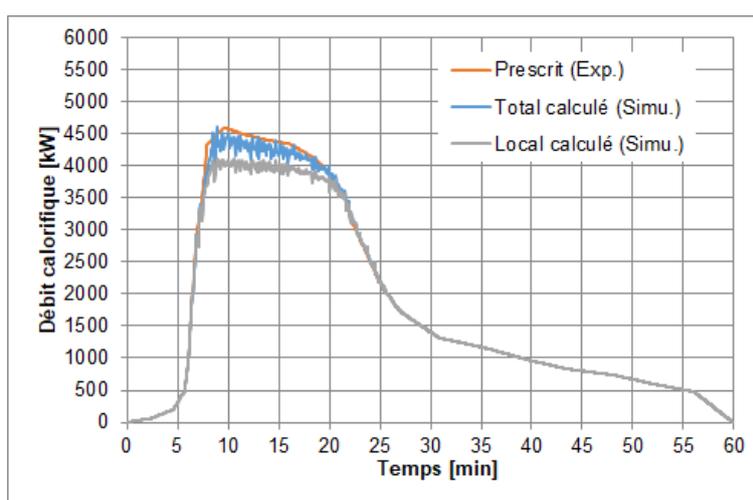


Figure 5-2 : Évolution du débit calorifique Essais Vs Prédiction numérique– Medina-Hevia [13]

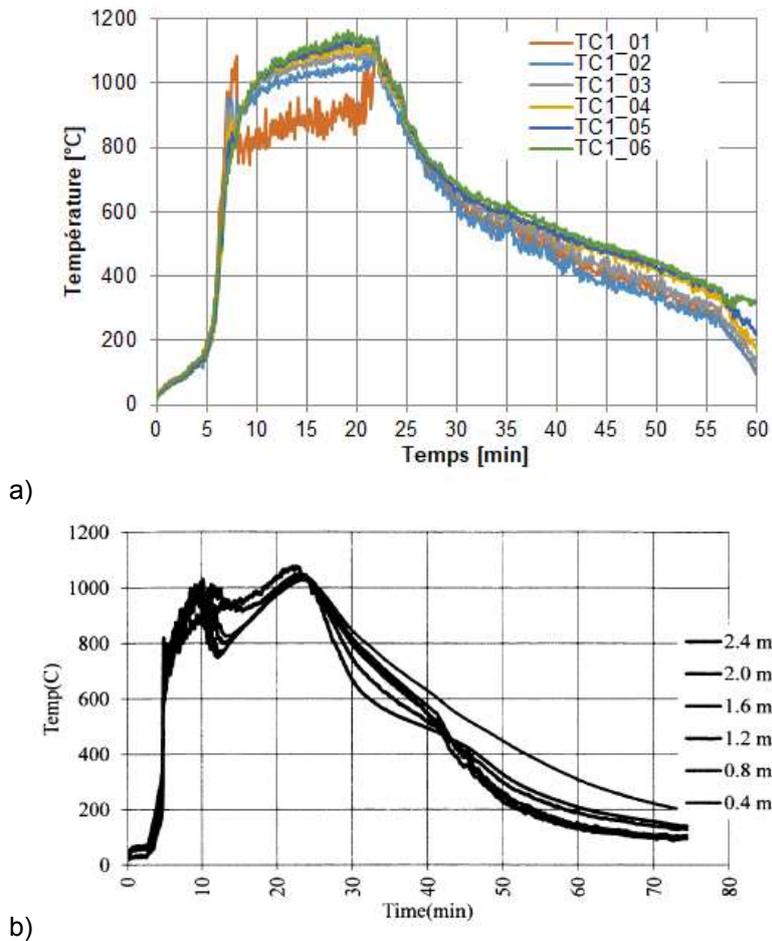


Figure 5-3 : Comparaison des températures a) prédites numériquement et b) mesurées sur l'un des arbres thermocouples placés dans le local – Essai McGregor [12] tout protégé

Remarque : la prédiction d'essais réels est toujours sujette à caution, surtout quand la modélisation est réalisée à posteriori et sans information complète sur les données d'entrée.

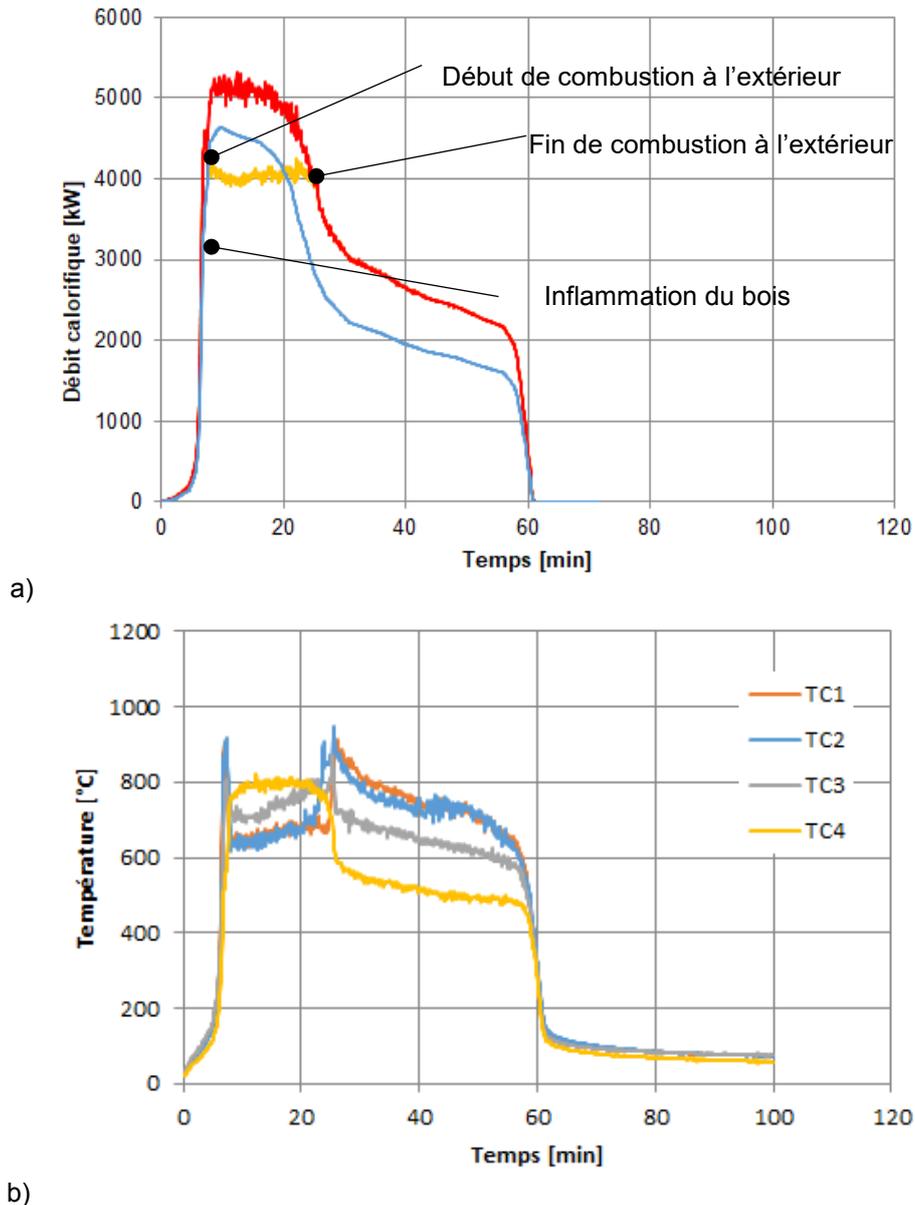
Ce modèle a été ensuite modifié pour prendre en compte la configuration avec les deux parois combustibles des essais de Medina Hevia [13] correspondant au test 2. La Figure 5-4 présente les résultats obtenus en termes de courbes de puissance (a) et de température (b) en résultant.

On constate une inflammation rapide de la paroi en bois, moins de 6 min après le début de la simulation, et moins de deux minutes avant le début de la phase de forte puissance. On retrouve ainsi un pic de débit calorifique et une décroissance de cette puissance comme lors des essais (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**a).

Toutefois, très rapidement après, une partie de la combustion se produit en dehors du local, et ce, jusqu'à $t=25$ min. Ce phénomène n'est pas quantifié dans les essais, la mesure de la puissance étant une valeur totale, mais il est illustré qualitativement par des photos dans les travaux de Medina Hevia. Il est a priori surévalué dans les simulations en modifiant les écoulements au niveau de l'ouverture. Il conduit à une sous-estimation des actions thermiques pendant l'intervalle où la simulation le prédit (cf. Figure 5-4b).

Ainsi la contribution en termes de dégagement d'énergie est bien restituée, la méthode consistant à introduire un débit de gaz de pyrolyse fixé conduit à modifier les conditions aérauliques dans le local. La décharge de la puissance se fait alors principalement à l'intérieur et les températures se réduisent fortement à l'intérieur.

Remarque : lors des essais de Média Hévia avec deux parois contributives en bois (Test1 et Test2), une délamination du CLT a conduit à reprise de l'incendie après 30 à 40 minutes d'essais. Ce phénomène n'est pas reproduit pas le modèle.



**Figure 5-4 : Simulation de l'essai de Medina-Hevia [13] avec deux parois combustibles (Test 2)
a) débit calorifique ; b) température moyenne sur hauteur**

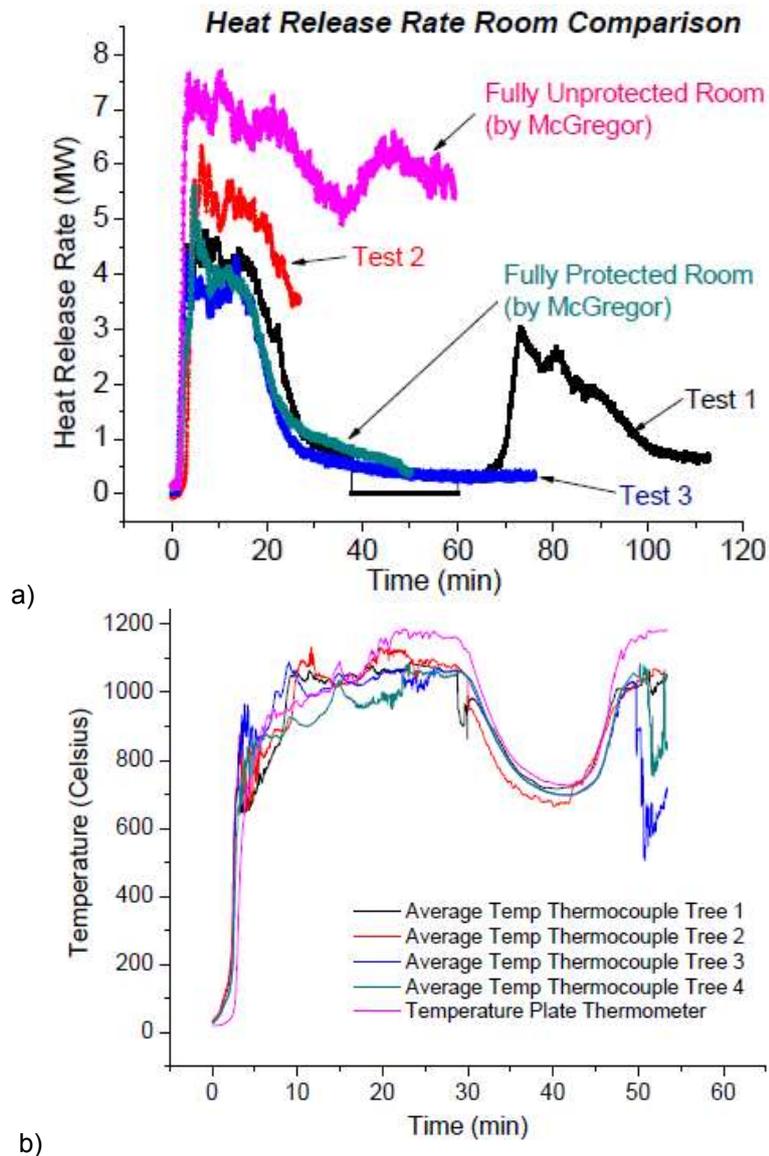


Figure 5-5 : Résultats des essais de Medina Heviar [13] (Test 2)
a) débit calorifique (courbe rouge) ; b) température moyenne sur hauteur

5.2.2 Modélisation par approche simplifiée

Afin de contourner la problématique de sous-oxygénation du foyer, les essais de Medina-Hevia [13] et McGregor [12] ont été simulés par une approche simple et sécuritaire qui pourrait être celle appliquée en ingénierie :

- Un foyer primaire a été pris en compte, sans modélisation explicite de la contribution du bois, et avec une densité de charge calorifique de 780 MJ/m^2 issue de l'Eurocode.
- La puissance du foyer primaire a été limitée à celle admissible numériquement à l'intérieur du local (débit calorifique maximal que permet d'atteindre l'amenée d'air lors de la simulation).
- La durée du foyer primaire a été modifiée pour prendre en compte la charge de bois mobilisable en supposant que tout le bois disponible dans le local brûle sur toute son épaisseur. Pour cela, on a considéré une chaleur de combustion de $17,5 \text{ MJ/kg}$. Il est possible de faire varier la quantité de bois mobilisé.

La Figure 5-6 présente la courbe de puissance en résultant (courbe rouge). Cette méthode conduit à des durées de feu très importantes, de l'ordre de 3 heures. La courbe noire correspond au foyer primaire. La réduction de la quantité de bois mobilisée conduirait aux courbes orangées intermédiaires, qui mobilisent respectivement 25, 50 et 75% du bois après l'extinction du foyer primaire.

Relativement aux résultats des essais de McGregor [12], où la durée du foyer va au-delà de 60 minutes, cette approche apparaît, si ce n'est pertinente au moins sécuritaire.

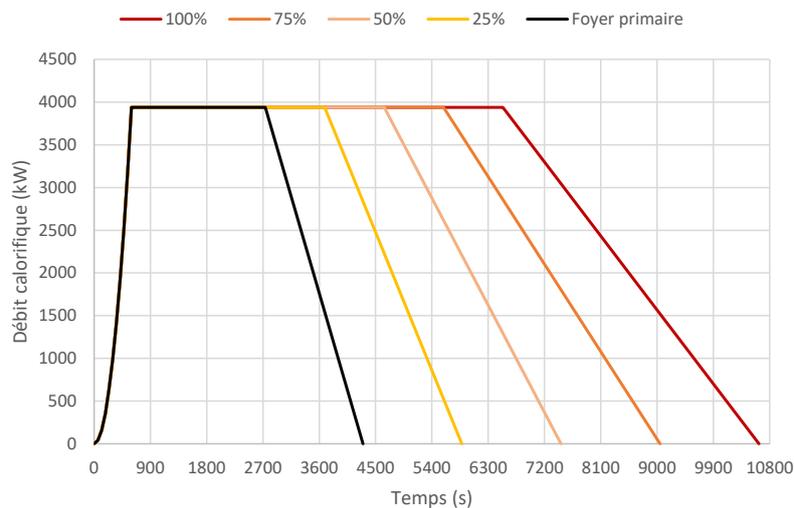


Figure 5-6 : Courbes de puissance pour méthode simplifiée de prise en compte du bois

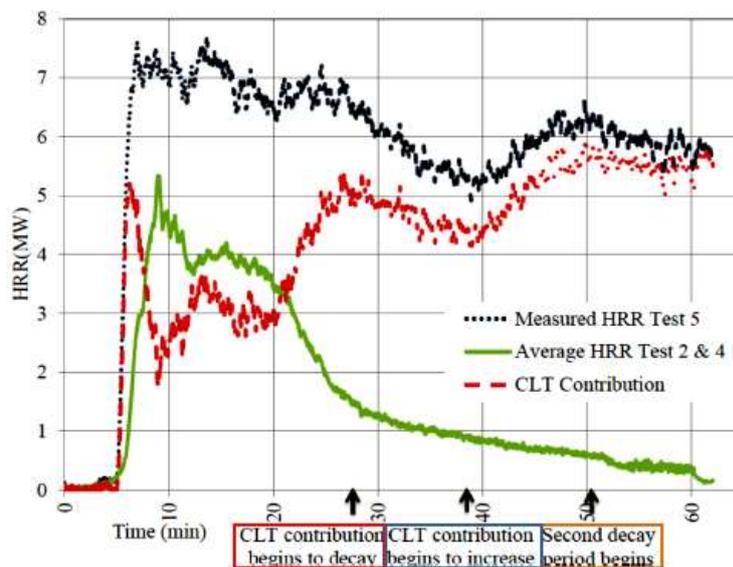


Figure 5-7 : Caractérisation de la contribution des parois en CLT lors des essais de McGregor (fully unprotected) [12] – Évolution du débit calorifique [13]

Sous ces conditions, les niveaux d'action thermiques obtenus sont comparables à ceux mesurés lors des essais de McGregor et Medina-Hevia, comme le présente la Figure 5-8. Cette figure montre les températures obtenues par le modèle le long d'un arbre de thermocouples situé au fond du local pour le cas d'une contribution à 75% du bois monopolisable.

Ces températures varient en régime permanent entre 900 °C et 1100 °C, soit des valeurs identiques à celles mesurées par McGregor et Medina-Hevia (cf. Figure 5-9). Par contre, la durée de feu artificiellement importante conduit à une forte surestimation des durées de l'action thermique (près de 3 h au lieu de 1h), même si la durée des essais avec contribution n'est pas explicitement indiquée dans les documents [12] [13].

Plusieurs pistes sont alors envisageables pour mieux prendre en compte la quantité de bois. Une réduction de la charge de bois monopolisable pourrait alors être imposée, en supposant un rendement de combustion de 50 à 30% par exemple. Une évaluation de la quantité de bois ayant brûlé pendant la combustion du foyer primaire pourrait être faite en se basant sur un calcul de transfert thermique via l'isotherme 300°C. Ces pistes nécessitent bien sûr des évaluations complémentaires basées sur des essais avec des configurations et protocoles maîtrisés et connus.

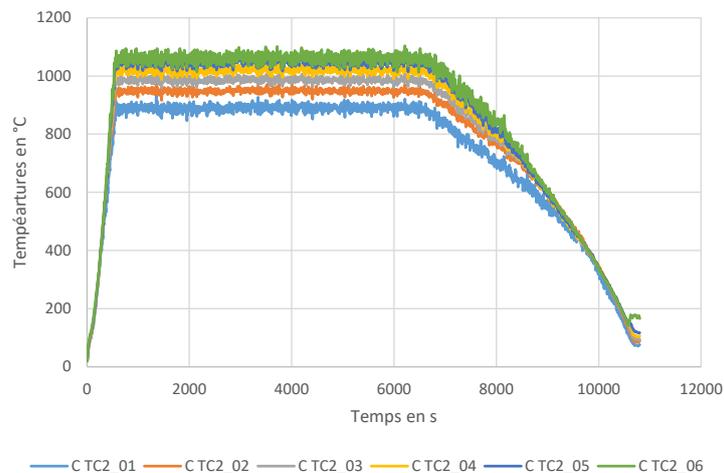


Figure 5-8 : Températures prédites par la méthode simplifiée

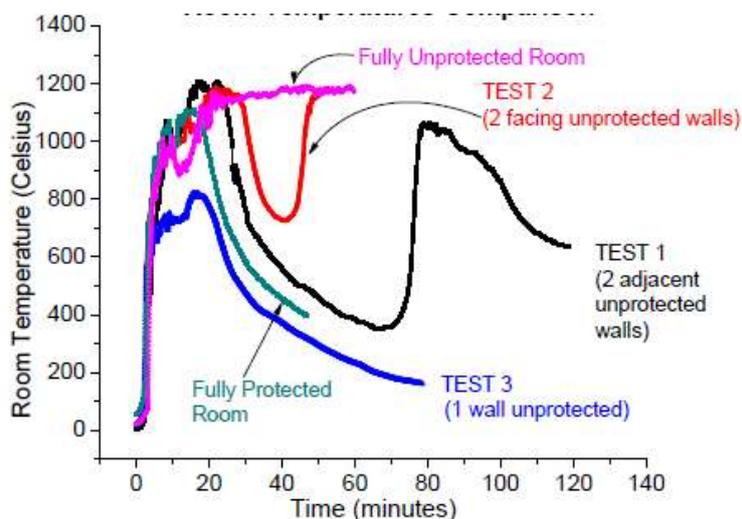


Figure 5-9 : Évolution de la température lors des essais de McGregor [12] et Médina-Hévia [13]

Remarque : on notera que lors des essais, des températures plus faibles ont pu être obtenues avec une paroi contribuant au sinistre (test 3) relativement au cas sans contribution (Fully protected room). Rappelons que les Test 1, 2 et 3 de Médina Hevia [13] ont été réalisés un an après les essais de McGregor [12]. La comparaison avec le scénario de référence (fully protected room) est donc discutable.

5.3 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE POUR LES ÉTUDES ISI

Ainsi sur la base des études qui ont été menées, la prise en compte de la contribution du bois avec auto-extinction est techniquement possible au regard des outils numériques disponibles. Deux méthodes basées sur une approche empirique de la dégradation du bois peuvent être employées.

Une méthode itérative (Méthode 1) conduisant à découper en surface élémentaire de 1 à 2m² les surfaces de bois monopolisable et de les impliquer dans l'incendie initial (foyer primaire) dès lors qu'une température de 300°C (ou bien un autre paramètre comme le flux incident) est atteinte en surface. Un processus itératif de simulations permet d'évaluer la durée de combustion et d'implication de ces surfaces.

Une méthode implicite (Méthode 2), nécessitant une modification du code source FDS, permet de déterminer à chaque instant et chaque point la contribution du bois sur la base d'un couple flux critique et température critique d'inflammation.

Dans tous les cas, une caractérisation précise des critères d'inflammation, qu'ils soient uniques (température ou flux critique) ou plus détaillés (couple flux thermique Vs température limite) doit être faite au moyen d'essais élémentaires. La sensibilité à ceux-ci peut s'avérer importante, et l'utilisation de critères enveloppants trop pénalisante.

Des essais ad hoc à plus grande échelle permettraient de valider plus finement la pertinence des méthodes de modélisation de contribution du bois proposées.

Enfin, face à la problématique de modélisation de foyer sous oxygéné ou saturé en gaz de pyrolyse² où l'ajout de combustible supplémentaire conduit à une réduction « incorrecte » des agressions, une approche simplifiée et sécuritaire consistant à augmenter la durée du foyer primaire ou maximale d'autant que la charge calorifique du bois monopolisable peut être employée. Toutefois, des données expérimentales au travers d'essais réels maîtrisés seraient nécessaires pour limiter et affiner cette durée supplémentaire.

La méthodologie proposée est résumée dans le logigramme ci-dessous :

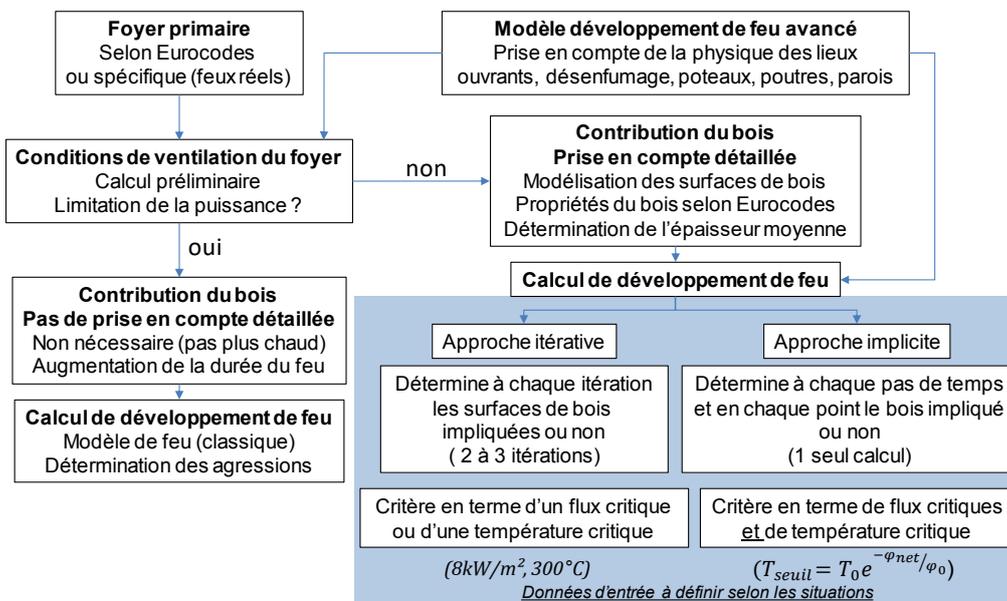


Figure 5-10 : Logigramme méthodologique pour la modélisation de la contribution du bois lors d'une étude d'ingénierie

² À ne pas confondre avec le problème de foyer couvant qui correspond à une autre situation particulière

5.4 : COMPLÉMENTS DE TRAVAUX À ENVISAGER

Les travaux présentés ici ont permis d'identifier des méthodologies viables pour prendre en compte la contribution des structures bois à un incendie. Néanmoins, ces méthodologies restent à consolider sous deux aspects :

- D'une part, la prédiction de la contribution du bois nécessite de modéliser explicitement le comportement des parois. En conséquence, les faiblesses de la modélisation en cas de feu faiblement oxygéné deviennent prépondérantes.

D'autre part, les travaux menés ont permis une validation qualitative de l'approche, en mettant notamment en évidence la capacité à prédire la propagation et l'auto-extinction. Mais cette validation n'a pas été menée de façon quantitative, en particulier à cause de la limitation en cas de feu sous-oxygéné.

Il est donc proposé de prolonger ces travaux afin d'en consolider les conclusions. Des travaux de plusieurs natures seraient envisageables.

- Un travail numérique sur les problématiques de modélisation en sous-oxygénation, afin de réduire l'impact de cette limitation dans les simulations. Le développement de l'utilisation de modèle de pyrolyse simplifié pourrait répondre à ce point ;
- La réalisation d'essais à petite échelle afin de compléter les caractérisations sur lesquelles ces travaux se basent (flux et température d'inflammation), et d'enrichir la portée des méthodes proposées ;
- La réalisation d'essais à moyenne échelle en situation bien ventilée. Ces essais permettraient de valider quantitativement les modèles de contribution du bois indépendamment des problématiques de ventilation ;
- La réalisation d'essais de locaux, afin de valider les méthodes en situation de sous-oxygénation des foyers.

En complément de ces travaux, l'industrialisation de la méthode 2 dans FDS doit être réalisée à terme, afin de rendre l'usage possible pour tous.

L'ensemble de ces propositions seront détaillées dans le rapport de synthèse.

6. 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 – Version du 27/07/2017
- [2] 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, Réf. 17-001650, Décembre 2017
- [3] 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
- [4] 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 – Rapport Efectis-CSTB Réf 18-000290, Février 2018
- [5] NF EN 1991-1-2 -- Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-2 : actions générales - Actions sur les structures exposées au feu - Juillet 2003
- [6] NF EN 1992-1-2 - Eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 1-2 : règles générales – calcul du comportement au feu – Octobre 2005
- [7] NF EN 1992-1-2/NA - Eurocode 2 : calcul des structures en béton – Partie 1-2 : règles générales – calcul du comportement au feu – Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-2 :2005" – Octobre 2007
- [8] NF EN 1995-1-2 - Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : généralités - Calcul des structures au feu- Septembre 2005
- [9] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt "Fire Dynamics Simulator : Technical reference guide and User's guide", NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, 2016.
- [10] Fire Dynamics Simulator (Version 6), www.nist.gov
- [11] NF EN 1995-1-2 - "Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu" – Septembre 2005
- [12] McGREGOR, Contribution of cross-laminated timber panels to room fires. Master thesis, 2013
- [13] MEDINA HEVIA, Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms. Master thesis, 2014



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

www.adingbois.org