

RAPPORT FINAL

MODELISATION FEU FAÇADE :

Restitution de l'étude de ressourcement et de l'étude de maturation

Grégoire PIANET

Octobre 2021

Siège social

10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction,
Ameublement

Avec le soutien du

CODIFAB
comité professionnel de développement
des industries françaises de l'ameublement et du bois



1. CONTEXTE DU PROJET Modélisation FEU FACADE.....	4
2. OBJECTIFS DU PROJET.....	4
2.1 Bois et feu façade	4
2.2 La complexité du feu façade bois	5
2.3 Ambition du projet.....	5
2.4 Organisation du projet	6
2.4.1 Phase d'étude préliminaire	6
2.4.2 Phase de ressourcement.....	6
2.4.3 Phase de maturation.....	6
3. ETUDE PRELIMINAIRE.....	7
3.1 Synthèse des travaux réalisés.....	7
3.2 Conclusions	7
4. TRAVAUX DE RESSOURCEMENT	8
4.1 Contexte de réalisation de la phase de ressourcement	8
4.2 Démarche mise en place	8
4.3 Analyse préliminaire	10
4.4 Complexité des processus impliqués en matière de feu de façade	11
4.5 Travaux expérimentaux réalisés.....	13
4.5.1 Echelle matière : expérimentations ATG	13
4.5.2 Echelle matériau : Expérimentations cône calorimètre	14
4.5.2.1. Le cône calorimètre.....	14
4.5.2.2. Perte de masse pour le Douglas :.....	15
4.5.2.3. Taux de dégagement de chaleur (HRR) pour le Douglas.....	16
4.5.3 Echelle intermédiaire : essais Panneau Radiant	17
4.5.3.1. Description de l'essai sur panneau radiant	17
4.5.3.2. Résultats des essais sur panneau radiant	17
4.5.1 Grande échelle : essais LEPIR2.....	17
4.6 Travaux numériques réalisés.....	18
4.6.1 Modèle à échelle matière : ATG	18
4.6.2 Modèle à échelle matériau : Cône calorimètre	20
4.6.3 Modèle à échelle intermédiaire : Panneau Radiant.....	23
4.6.3.1. Résultats du modèle simple sur le Douglas.....	23
4.6.3.2. Résultats du modèle complexe sur le Douglas.....	25
4.6.3.1. Synthèse	26
4.6.4 Modèles à grande échelle : LEPIR2	27
4.7 Conclusions de l'étude de ressourcement.....	28

5.	ETUDE DE MATURATION	31
5.1	Remise en perspective des travaux	31
5.1.1	Exigences réglementaires feu façade en France	31
5.1.2	Essai de façade selon le protocole LEPIR2	32
5.1.3	Ingénierie de la réaction au feu	34
5.1.3.1.	Ouvertures réglementaires	35
5.1.3.2.	Applications potentielles en ISI	36
5.1.4	Approches de modélisation existantes	37
5.1.4.1.	Approche prescrite	37
5.1.4.2.	Approches mixtes par flux critique	37
5.1.4.3.	Approches mixtes par température d'ignition.....	38
5.1.4.4.	Approche par calcul de pyrolyse.....	38
5.1.5	Approches par pyrolyse : freins à lever	39
5.2	Phase de maturation.....	40
5.2.1	Mise en place et prise en main des outils.....	40
5.2.1.1.	Code de calcul FDS – interface Pyrosim	40
5.2.1.1.	Mise en place de moyens de calcul	40
5.2.1.1.	Mise en place de moyens humains.....	40
5.2.2	Mise en place et optimisation d'une configuration SBI	41
5.2.2.1.	Mise en place du modèle	41
5.2.2.2.	Calibration du SBI	43
5.2.2.3.	Test sur un parement combustible.....	44
5.2.2.4.	Pistes d'optimisation	45
5.2.2.5.	Synthèse : faisabilité et pistes d'amélioration	45
5.2.3	Optimisation de la configuration LEPIR2.....	46
5.2.3.1.	Calibration de la chambre à feu	46
5.2.3.2.	Optimisation du maillage.....	48
5.2.3.3.	Evaluation du modèle sur façade combustible	49
5.2.3.4.	Synthèse : faisabilité et pistes d'amélioration	50
6.	PERSPECTIVES.....	51
6.1	Etude des possibilités d'exploitation.....	51
6.1.1	Rappel des différentes méthodologies en ingénierie de sécurité incendie	51
6.1.1.1.	Approche Paramétrique (P)	51
6.1.1.2.	Approche Conservative (C).....	51
6.1.1.3.	Approche Relative (R).....	51
6.1.2	Applications potentielles du modèle PPRIME	51
6.1.3	Perspectives de développement.....	52
7.	ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE.....	53
8.	ANNEXE 2 : CODE DE CALCUL FDS	54
9.	ANNEXE 3 : GLOSSAIRE	55

1. CONTEXTE DU PROJET MODELISATION FEU FACADE

La construction bois connaît depuis quelques années un développement significatif des ouvrages multi-étagés bois de grande hauteur (BGH). Au même titre que les autres matériaux de structure, à savoir béton et acier principalement, cette émergence est accompagnée par des études scientifiques, des innovations techniques et par le développement d'outils normatifs supportés par les pouvoirs publics et les organisations professionnelles de la filière bois.

A la base des outils normatifs de justification se trouvent le plus souvent des études expérimentales permettant de justifier des systèmes constructifs génériques répondant à certains niveaux d'exigence réglementaires. Plus particulièrement 27 essais en four de résistance au feu ont été réalisés suivant les normes d'essais européennes dans le cadre des plans bois 1 et 2 ; lesquels ont permis de faire émerger des solutions de parois bois résistantes au feu.

Suivant le même principe, des solutions techniques validées de façades à ossature bois ont été rendues possibles grâce à la réalisation d'une dizaine d'essais LEPIR2ⁱⁱ ([1] [2]), solutions qui ont pu appuyer la mise en place d'une appréciation de laboratoireⁱⁱⁱ (APL) en application de l'Instruction Technique 249 (IT249 [3]) accessible sous la forme du Guide Bois Construction et Propagation du Feu par les Façades [4].

Toutefois ces essais expérimentaux représentant des coûts très importants, le « droit dur » ainsi que l'outil normatif de justification se sont dotés de possibilités et conditions de recours aux approches par calcul d'ingénierie du comportement au feu^{iv}, notamment introduites par les arrêtés du 22 mars 2004 relatifs à la résistance au feu [5] et au désenfumage. Utilisés de façon appropriée, ces outils d'ingénierie permettent de justifier des dispositions spécifiques sans essais et à un coût bien moindre.

Pour prendre le cap d'une application de ces méthodes d'ingénierie aux constructions bois multi-étagées, l'Institut Technologique FCBA avec le soutien de financements publics et des organisations professionnelles de la filière bois a mis en place le projet Modélisation Feu Façade.

2. OBJECTIFS DU PROJET

Dans le cadre du projet, il a été décidé de focaliser les moyens sur le développement d'une méthodologie expérimentale et numérique multi-échelles d'analyse de la **propagation des feux de façade en bois**. Les sections suivantes expliquent ce choix :

2.1 Bois et feu façade

Le risque de propagation d'un incendie en façade dans le cadre de la construction bois grande hauteur est une question qui reste omniprésente dans l'esprit des services de secours, des autorités publiques et des organismes de contrôle, pour plusieurs raisons :

- Le fait de la combustibilité du bois est un élément nouveau comparativement aux autres matériaux utilisés en structure. Pour des bâtiments bois de faible hauteur évacuables rapidement telles que les habitations individuelles bois, le retour d'expérience (RETEX) montre qu'il n'y a pas de sujet, mais pour les bâtiments bois collectifs de plus grande hauteur apparus plus récemment, la combustibilité de la structure bois doit être prise en compte ;
- D'une façon plus générale qui concerne tous les matériaux de structure, le développement extrêmement rapide des systèmes d'isolation thermique par l'extérieur induit par les aides publiques a vu de nombreuses constructions et réhabilitation employer de façon non sécuritaire des isolants combustibles en façade. Le RETEX très fourni de feux de façades impliquant des isolants extérieurs combustibles a pour effet de stigmatiser et freiner le développement de systèmes constructifs bois grande hauteur, bien que le bois soit très rarement impliqué à ce jour dans des feux de façade.
- Plus particulièrement depuis le drame de la tour Grenfell à Londres en juin 2017, ont suivi des travaux d'état de l'art et d'analyse de risque ayant entraîné des impacts réglementaires importants ([6] [7]) en particulier sur la limitation du bois en façade.
- Plus récemment, en lien avec les contraintes de coût carbone de la construction, on voit se multiplier des constructions traditionnelles en structure béton présentant en façade de nombreux éléments bois

(balcons, platelages, parements, garde-corps, claustras, brise-soleil,...) dans le but de réduire l'impact écologique. Des feux de façade sur ces ouvrages collectifs, comme à Draguignan en mars 2019, aboutissent invariablement à une stigmatisation de la construction bois même s'il ne s'agit pas dans ce cas d'une construction bois.

La figure ci-dessous illustre ces quelques retours d'expérience en matière de feu de façades :



Figure 1 Retours d'expérience en matière de feu façade sur trois bâtiments

2.2 La complexité du feu façade bois

D'un point de vue plus phénoménologique, le feu de façade est caractérisé par une complexité et un couplage des transferts thermiques qui associe à la fois réaction au feu^v et résistance au feu^{vi}. De plus les échelles spatiales spécifiques aux façades rendent la propagation du feu très sensible à l'effet de petits détails constructifs.

L'exemple le plus simple est celui de la lame d'air verticale au contact d'un produit combustible ou d'un produit combustible continu sur toute la hauteur d'un bâtiment multi-étagé. Cette disposition favorise la mise en place « d'effets cheminée » pouvant propager un incendie sur de nombreux étages en quelques minutes seulement. Il apparait qu'un simple dispositif de recoupement de la lame d'air et/ou du combustible (exemple bande de laine de roche horizontale) permet de neutraliser cet effet.

2.3 Ambition du projet

L'importance à la fois de la petite échelle et de la grande échelle contribuant à la complexité du feu de façades bois opposent un défi de taille à l'approche par simulation numérique. En effet cette approche est utilisée la plupart du temps sur une échelle unique et complétée de modèles expérimentaux pour traduire des effets à

plus petite échelle ne pouvant être simulés sans un accroissement exponentiel du temps et des capacités de calcul.

Le projet Modélisation Feu Façade a donc pour ambition de mettre en place une approche numérique et expérimentale multi-échelle spécifique.

2.4 Organisation du projet

Il a été prévu de dissocier le projet en trois phases consécutives.

- La première phase dite d'étude préliminaire a permis d'évaluer les capacités des outils numériques et modèles existants pour la simulation d'un feu de façade bois et de répertorier les freins à leur exploitation ;
- La deuxième phase dite de ressourcement s'est attachée à une approche fondamentale de mise en place de modèles expérimentaux et numériques visant à lever les freins identifiés;
- La troisième phase dite de maturation s'est attachée à étudier le transfert des modèles obtenus au sein d'outils d'ingénierie de sécurité incendie, la faisabilité des calculs -avec des moyens de bureau d'étude- à l'échelle représentative d'une façade, et les possibilités de valorisation de l'outil obtenu pour une application en ingénierie de sécurité incendie sur des projets de construction.

L'organisation des trois phases en termes de moyens et de financement est résumée ci-après :

2.4.1 Phase d'étude préliminaire

Il s'agissait à ce stade d'étudier la faisabilité d'une application des outils d'ingénierie de sécurité incendie existant à la caractérisation de la propagation d'un feu en façade. Ces travaux pilotés par l'IT FCBA et l'institut PPRIME (UPR CNRS 3346) au sein de l'Université de Poitiers ont été réalisés par Huy-Quang Dong, dans le cadre d'un post-doctorat de 6 mois (premier semestre 2016), et financés par le CODIFAB^{vii}.

2.4.2 Phase de ressourcement

L'approche fondamentale a nécessité la mise en place d'une bourse de thèse CIFRE, fruit d'un prolongement du partenariat entre FCBA et PPRIME. Des travaux concernant la thèse intitulée « *Développement d'une méthodologie expérimentale et numérique multi-échelles d'analyse de la propagation des feux de façade en bois* » ont été réalisés par Julien Sauvagère entre 2017 et 2019. Le financement de la bourse de thèse a été porté par la Région Nouvelle-Aquitaine (CRNA), l'Association Nationale Recherche Technologie (ANRT) et le CODIFAB.

2.4.3 Phase de maturation

Le transfert des développements fondamentaux ayant fait l'objet des travaux universitaires précédents a été assuré en premier lieu par des échanges entre le laboratoire PPRIME et des ingénieurs FCBA au sein de l'unité R&D et de l'unité Ingénierie. Les ingénieurs FCBA ont ensuite assuré une étape de mise en place de matériel spécifique, d'achat de logiciel de mise en donnée, de formation interne, et enfin d'une prise en main des modèles. Ces travaux étalés entre le deuxième semestre 2020 et le premier semestre 2021 ont été financés par la Région Nouvelle-Aquitaine et le CODIFAB.

L'objet du présent rapport étant de faire état des travaux financés par la Région Nouvelle-Aquitaine, les résultats de la première phase seront très brièvement rappelés dans la section §3. La section §4 présentera une synthèse des travaux de ressourcement présentés par ailleurs dans le rapport d'étude [8] et la section §5 s'attachera à présenter en détails les différentes étapes ayant permis d'aboutir à la valorisation des travaux réalisés.

3. ETUDE PRELIMINAIRE

Cette étude a été réalisée sur une période de 6 mois par un post-doctorat du laboratoire PPRIME.

3.1 Synthèse des travaux réalisés

Les travaux ont été réalisés dans le but d'estimer la capacité du code FDS V6.1 à simuler des essais de façade LEPIR2 (voir §5.1.2) selon les étapes suivantes :

- Bibliographie, prise de connaissance avec le protocole LEPIR et deux rapport d'essais de la filière bois (LEPIR n° 1 et n°2) ;
- Préparation et configuration de la géométrie de la façade de l'essai n°2 (épicéa 25 mm) ;
- Analyse paramétrique du feu de bûcher ;
- Sélection d'un modèle de dégradation thermique par pyrolyse pour l'épicéa et le PVC issus de la littérature ;
- Simulations de la façade de l'essai n°2 avec deux longueurs de déflecteurs (type A : débord de 10 cm, type B : débord de 50 cm), et quatre feux de bûchers prescrits avec un maximum de puissance atteint entre 650 et 850 s (1500, 2250, 3000 et 5000 kW), ainsi qu'un feu calé sur le profil de courbe de température de la chambre à feu lors de l'essai n°2 avec également quatre puissances maximum (1500 kW, 2000 kW, 2640 kW, 3300 kW), pour un total de 16 cas-tests (voir exemple sur la figure suivante).

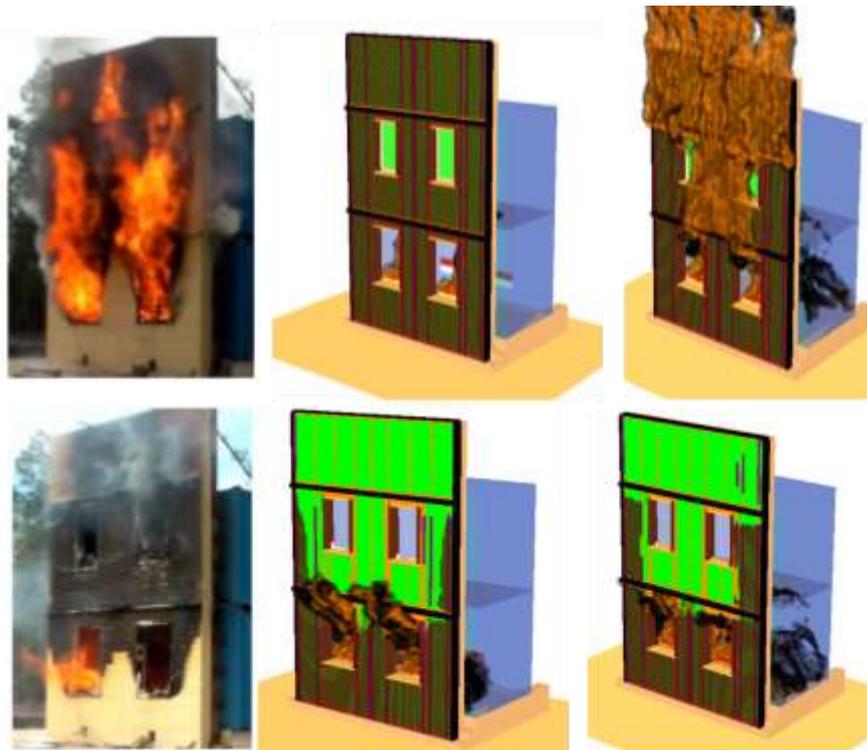


Figure 2 Etude préliminaire, simulation de l'essai filière n°2 à 5 minutes et à 20 minutes.

3.2 Conclusions

Il apparaît une grande variabilité des résultats selon la puissance paramétrée pour le bûcher qui constitue un élément difficile à évaluer expérimentalement sans essai dédié (un essai sur façade inerte aurait été nécessaire pour cela). Malgré la gamme de puissance de bûchers testée, la propagation violente au dernier niveau du dispositif de façade est systématiquement atteinte alors qu'elle n'est pas observée sur ces temps expérimentalement.

La faisabilité d'une exploitation du logiciel FDS est actée mais le rapport pointe un trop grand nombre de paramètres empiriques qu'il faudrait déterminer via une étude spécifique associée à l'amélioration nécessaire du modèle de pyrolyse.

4. TRAVAUX DE RESSOURCEMENT

4.1 Contexte de réalisation de la phase de ressourcement

Il convient de préciser à ce stade du rapport que la phase de ressourcement a été particulièrement affectée par la démission du doctorant en 2019.

Cet évènement qui n'a pas pu être anticipé a entraîné la perte d'une grande partie des données expérimentales ou du moins une impossibilité de les exploiter du fait de l'absence de traçage des expériences réalisées par le doctorant. La phase de modélisation consécutive aux essais n'a pas pu être réalisée par le doctorant.

Le suivi a également été affecté par le départ fin 2019 du nouveau responsable de projet FCBA avant sa fin de période d'essai et le délai important nécessaire à son remplacement.

Pour rétablir la situation, l'IT FCBA et l'Institut PPRIME ont signé à compter de début 2020 des avenants au contrat de collaboration initial. En objet de ces avenants, il a été convenu de missionner la société Duorisk dirigée par deux anciens doctorants du laboratoire PPRIME spécialisés en pyrolyse et en modélisation.

Le nouveau responsable de projet FCBA rentré en fonction en mai 2020 a pu progressivement reprendre contact avec le laboratoire PPRIME et la société DUORISK pour superviser le déroulement des essais complémentaires, puis la mise en place progressive des modèles numériques aux différentes étapes de l'approche multi-échelle. Le rapport d'étude DUORISK [8] a été remis fin avril 2021.

4.2 Démarche mise en place

Une démarche multi-échelles (Scaling-up) a été déployée [9] et présentée dans le rapport Duorisk « Feu de bâtiments en bois : étude multi-échelle de matériaux constitutifs de façades » [8].

L'approche multi-échelle est utilisée classiquement pour pouvoir représenter numériquement les incendies à échelle réelle. Elle consiste à passer d'une façon graduelle de l'échelle matière à l'échelle réelle tout en validant et intégrant de nouveaux phénomènes physiques et thermiques à chaque changement d'échelle.

Il s'agit ainsi d'initier l'étude à l'échelle la plus élémentaire, puis d'ajouter à échelle croissante de la complexité afin de se rapprocher des conditions réelles d'un incendie.

La démarche mise en place est synthétisée dans la liste suivante :

1. Etudier à partir des données de la littérature la réactivité physique et thermique des matériaux considérés, leurs conditions de décomposition thermique et leurs réactions au feu. Cette étape vise notamment à décrire le matériau et notamment ses propriétés intrinsèques nécessaires à connaître pour en déterminer la décomposition thermique (densité, conductivité thermique, capacité thermique, enthalpie de réaction, enthalpie de combustion des gaz issus de la décomposition, *etc.*).
2. Réaliser des essais expérimentaux à petite échelle (Analyse Thermogravimétrique **ATG^{viii}**) et analyser les résultats en vue de déterminer un mécanisme apparent de décomposition des matériaux considérés. Le mécanisme apparent est défini sur la base des plages de températures où est observée une perte de masse du matériau. Cette perte de masse impliquant la transformation d'espèces solides en sous espèces solides, liquides ou gazeuses, ces dernières étant potentiellement combustibles.

3. Proposer un mécanisme cinétique de décomposition thermique au sens de la loi cinétique d'Arrhenius et estimer la valeur des paramètres cinétiques (i.e. paramètres régissant la transformation des espèces chimiques) associés à chaque réaction composant ce mécanisme. Cette étape repose notamment sur le développement et l'utilisation d'un code spécifique d'optimisation inverse basé sur la méthode des essais particuliers (PSO [8]). Le mécanisme de décomposition désigné comme modèle cinétique devant pouvoir être utilisé pour de la simulation à différentes échelles jusqu'à une échelle réelle.
4. Vérifier la validité du mécanisme développé à l'échelle de la matière par l'intermédiaire de simulations numériques. Les résultats issus de celles-ci étant comparés à la base expérimentale obtenue lors de la réalisation des essais **ATG^{ix}**.
5. Réaliser des essais expérimentaux à l'échelle matériau à l'aide du dispositif du **cône calorimètre^x** permettant d'obtenir des informations sur la réaction au feu du matériau en considérant les phénomènes de transfert thermique en profondeur du solide, ainsi que la réactivité des espèces en phase gazeuse (combustion). Cette étape permet d'obtenir des valeurs expérimentales de référence auxquels seront comparés les résultats de simulation de l'étape suivante ;
6. Réaliser des simulations numériques intégrant le modèle de décomposition thermique pour chaque matériau dans des conditions exactement similaires aux expériences menées en cône calorimètre pour valider l'emploi du modèle et vérifier la valeur des différents paramètres régissant le transfert thermique au sein du matériau et la réactivité des espèces gazeuses émises lors de la décomposition ;
7. Etudier la sensibilité du modèle numérique global aux variations des différents paramètres physico chimiques (densité, conductivité thermique, capacité thermique, enthalpie de réaction, enthalpie de combustion des gaz issus de la décomposition, etc.) et numériques (maillage, modèles de résolution, etc.) pour identifier la robustesse des simulations à l'échelle du matériau ;
8. Etudier à échelle intermédiaire à l'aide du dispositif du panneau radiant, la propagation verticale de flamme et évaluer la capacité du modèle numérique à la décrire numériquement ;
9. Réaliser des simulations numériques à grande échelle permettant de vérifier la validité du modèle de pyrolyse développé pour chaque matériau pour attester de la propagation de l'incendie le long de la façade en comparaison avec des essais expérimentaux à grande échelle réalisés à l'aide du banc LEPIR2.

Les simulations numériques ont pour objectif de caractériser une problématique réelle d'incendie pour une part, mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection face au risque et d'autre part, dimensionner les équipements concourants à la sécurité en cas de concrétisation du scénario choisi. De fait, les modèles utilisés pour alimenter le code de simulation d'incendie se doivent d'être les plus fiables possibles. Cette fiabilité ne peut être atteinte que par une démarche rigoureuse de construction desdits modèles et par une validation qui doit permettre de s'assurer que les données obtenues via les modèles sont conformes à l'expression d'un scénario d'incendie qui représente une réalité possible.

Le projet « Feu de Bâtiment en Bois » a permis d'appliquer la méthodologie de construction et de valider un modèle de décomposition thermique de matériaux en bois dans un scénario d'incendie.

Le test LEPIR2 a été modélisé pour reproduire le comportement d'une solution constructive constituée d'un bardage en douglas. Une reproduction fidèle du test a été réalisée et deux propositions de modélisation du foyer ont été proposées.

A la suite de ce projet, le projet Modélisation Feu Façade prévoit une caractérisation précise du banc LEPIR et notamment d'évolution de son foyer au cours du temps (manipulation des ouvrants, taux de dégagement de chaleur).

4.3 Analyse préliminaire

Une étude bibliographique a été menée pour définir la réactivité chimique et thermique des matériaux bois et leurs conditions de décomposition. Dans cette étude, le Douglas et le contreplaqué de peuplier ont été choisis en concertation avec l'IT FCBA pour servir de cas d'étude pour les expérimentations et la modélisation. Cette étude bibliographique a permis de définir les gammes de variations des paramètres importants régissant la décomposition des matériaux sous l'effet de la chaleur.

La conductivité thermique et la chaleur spécifiques sont les deux paramètres ayant fait l'objet d'une approche commune pour permettre une meilleure prise en compte de l'échauffement.

Douglas

La densité du Douglas varie selon les sources mais est généralement supérieure à 500 kg.m⁻³ (moyenne de 550 kg.m⁻³) au regard de la littérature.

Son émissivité est quant à elle comprise entre 0,85 et 0,9 selon les sources et sa conductivité mesurée en fonction du taux d'humidité est de 0,12 à 0,14 W.m⁻¹.K⁻¹ à température ambiante. La température d'ignition du douglas est en moyenne de 620 °C.

N.D.L.R. cette valeur de 650°C reportée dans le rapport PPRIMEE/DUORISK est particulièrement dépendante du protocole d'évaluation qui dépendra de l'éclairage énergétique, de la présence d'une flamme pilote, de la nature et de la position du ou des thermocouples au moment de l'inflammation. Une valeur basse située entre 300°C et 365°C est généralement admise suivant les travaux de V. Babrauskas [10])

Contreplaqué de peuplier

Des propriétés génériques propres aux bois, et des données plus précises sur le peuplier brut mais pas nécessairement dans sa mise en œuvre en contreplaqué ont été retenus de l'étude bibliographique [11].

Selon ces sources, une densité plus faible du peuplier est mise en avant, 337 kg.m⁻³ selon certains auteurs, pour des pourcentages d'humidité de l'ordre de 2 %.

La conductivité du peuplier est équivalente à celle du douglas avec des valeurs à température ambiante pouvant aller 0,11 à 0,13 W.m⁻¹.K⁻¹, et ce toujours en fonction de sa teneur en eau.

4.4 Complexité des processus impliqués en matière de feu de façade

L'étude soulève la nécessité de prendre en compte l'ensemble des processus dans la modélisation avec un couplage fort des phases condensée et gazeuse : le transfert de chaleur dans la paroi ou l'échauffement de la surface en présence de feu de façade, la décomposition thermique, les émissions gazeuses, l'inflammation du mélange gazeux : mélange aéraulique, LII (Limite inférieure d'inflammabilité) –LSI (Limite supérieure d'inflammabilité), température et la propagation du front de flamme.

Les modèles actuels présentent toutefois les limites suivantes :

- ✓ Modèle de pyrolyse sommaire et imprécis
- ✓ Mauvaise description de l'inflammation

Ils ne sont à ce jour pas capables de décrire le débit d'espèce volatile, l'inflammation et donc la propagation de flamme, les températures, etc. C'est la raison pour laquelle, il y a aujourd'hui un besoin de développer les sous-modèles adéquats (pyrolyse, inflammation).

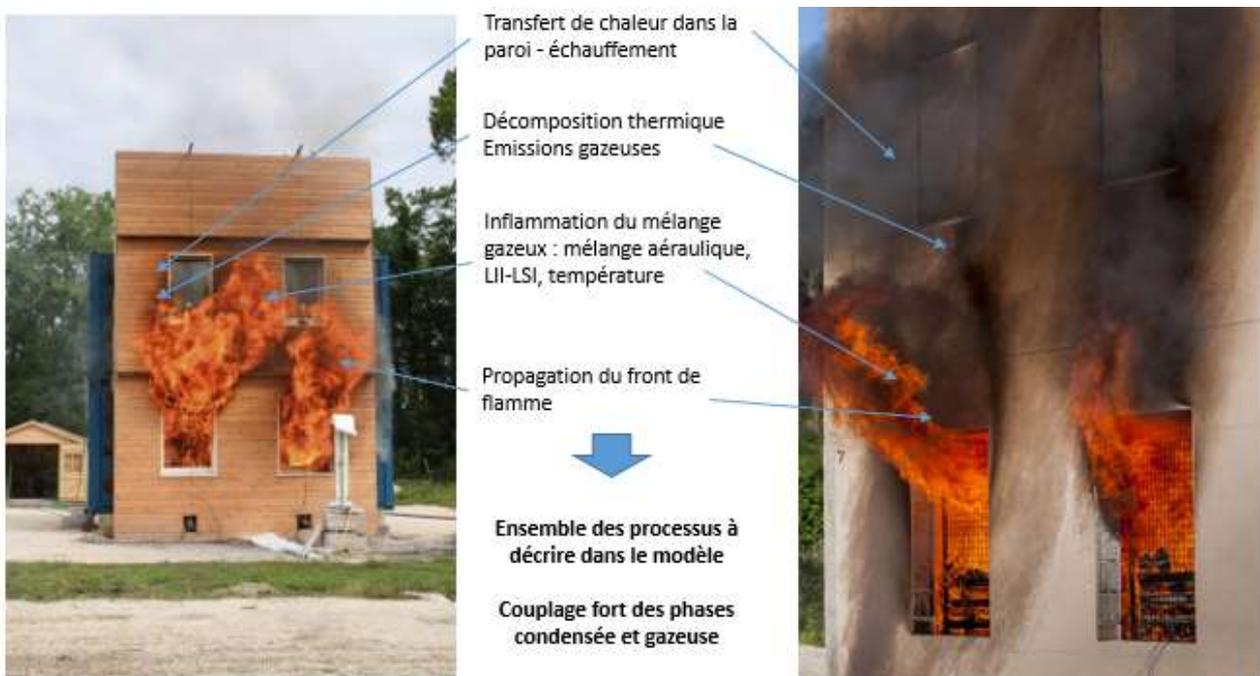


Figure 3 processus à prendre en compte pour la modélisation d'un feu de façade.

L'étude a utilisé l'approche multi-échelle, classiquement pour pouvoir représenter numériquement les incendies à échelle réelle. Elle consiste à passer d'une façon graduelle de l'échelle matière à l'échelle réelle tout en validant et intégrant de nouveaux phénomènes physiques et thermiques à chaque changement d'échelle. Il s'agit ainsi d'initier l'étude à l'échelle la plus élémentaire, puis d'ajouter à échelle croissante de la complexité afin de se rapprocher des conditions réelles d'un incendie [8].

La figure suivante schématise l'articulation de l'approche multi-échelle.

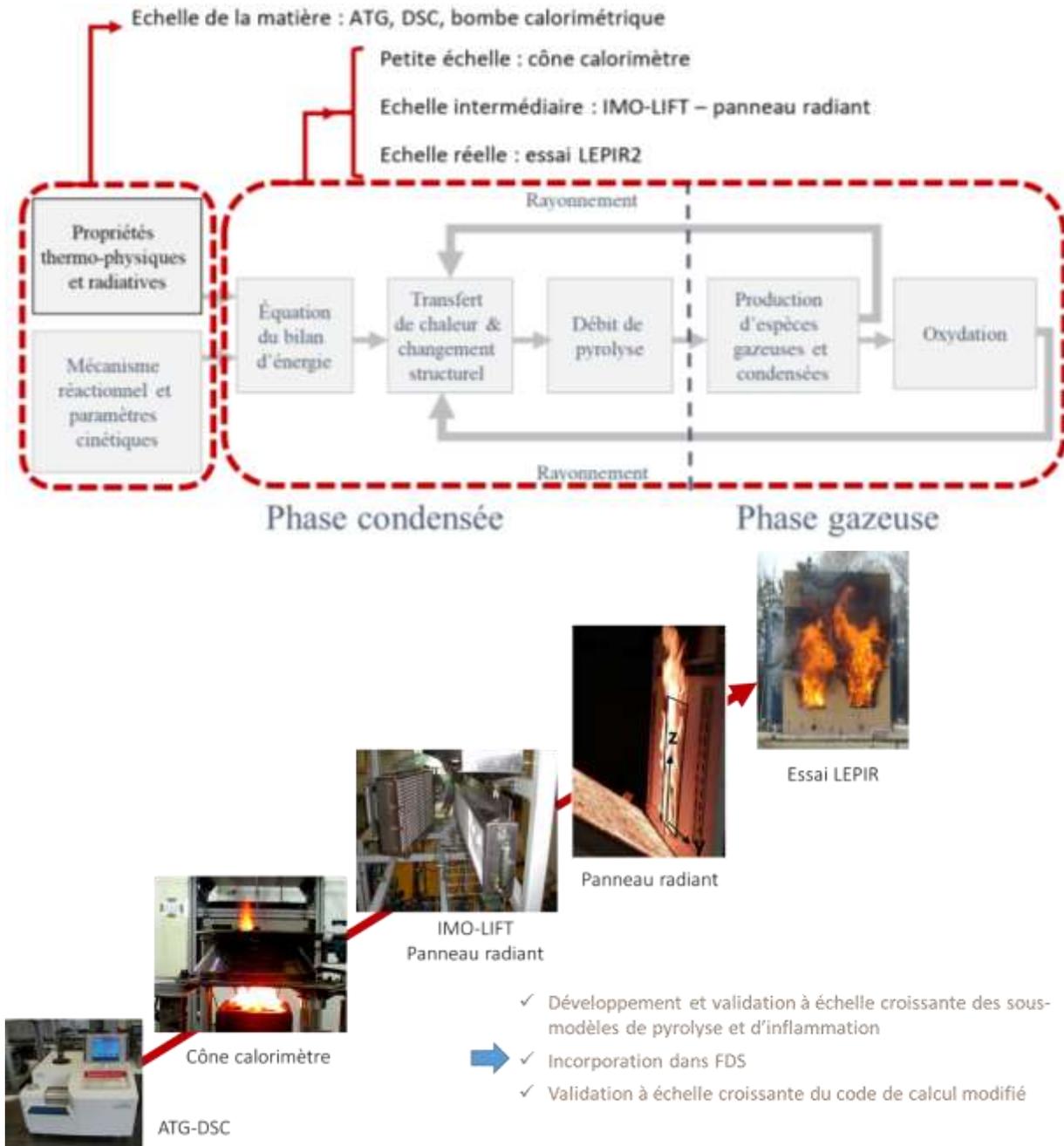


Figure 4 Schéma des processus à simuler dans l'approche multi-échelle

En synthèse :

A l'échelle matière

Les essais exploités sont décrits succinctement dans le glossaire page 55 (**ATG^{xi}, DSC^{xii}, bombe calorimétrique^{xiii}**).

A l'échelle matériau, on utilise les résultats du **cône calorimètre**.

A l'échelle intermédiaire, l'étude exploite des résultats au **panneau radiant**.

A grande échelle la modélisation est comparée aux résultats d'essai **LEPIR2**.

4.5 Travaux expérimentaux réalisés

4.5.1 Echelle matière : expérimentations ATG

A partir de cette base bibliographique, des essais ont été réalisés à l'échelle dite de la matière (soit quelques milligrammes de produit solide en ATG) pour déterminer la réactivité à la température des deux matériaux. Ces analyses ont permis de mettre en avant les différentes phases de décomposition des matériaux en fonction de la température, du point de vue de leur perte de masse, et de déduire pour chacun d'eux un mécanisme de décomposition thermique apparent, cohérent avec leurs phases de décomposition.

Les analyses à échelle de la matière ont été effectuées à l'aide d'un analyseur thermogravimétrique Mettler-Toledo type TGA/DSC 3.



Figure 5 : Vue de l'ATG utilisé au sein de l'Institut Pprime

Analyseur Thermogravimétrique Mettler-Toledo type TGA/DSC 1	
Plage de Température	Ambiant jusqu'à 1100 °C
Précision de la mesure	± 0,3 °C
Reproductibilité de la mesure	± 0,2 °C
Résolution de la température du four	0,001 °C
Vitesse de chauffage	Jusqu'à 150 °C.min ⁻¹
Volume max du creuset	900 µl
Balance	
Résolution	1 µg
Reproductibilité du blanc	±10 µg
Creuset	
Matière	Alumine
Volume	70 µl
Diamètre intérieur	5 mm
Diamètre extérieur	6 mm
Hauteur	4,7 mm

Echantillons	Condition	Essai retenu
Douglas	Air 10 °C.min ⁻¹	Essai 1
	N ₂ 10 °C.min ⁻¹	Essai 1
	Air 20 °C.min ⁻¹	Essai 1
	N ₂ 20 °C.min ⁻¹	Essai 1
Contreplaqué peuplier	Air 10 °C.min ⁻¹	Essai 2
	N ₂ 10 °C.min ⁻¹	Essai 1
	Air 20 °C.min ⁻¹	Essai 2
	N ₂ 20 °C.min ⁻¹	Essai 1

Tableau 1 : Caractéristiques du dispositif expérimental, essais retenus en ATG au regard des conditions de répétabilité

Les essais réalisés sur le Douglas et le contreplaqué Peuplier ont permis d'identifier les essais de référence représentant des évolutions « moyennes » pour l'établissement du modèle de décomposition thermique : bonne répétabilité des essais, plages de températures des réactions au feu stables.

4.5.2 Echelle matériau : Expérimentations cône calorimètre

Après avoir validé à l'échelle matière l'opportunité d'utiliser des mécanismes de décomposition créés sur la base expérimentale obtenue avec le dispositif ATG, l'étape suivante revient à évaluer la capacité du code FDS et desdits mécanismes réactionnels à reproduire la décomposition thermique des matériaux dans un environnement plus complexe et faisant intervenir notamment la notion de gradient thermique.

Pour ce faire, une méthodologie reposant sur une base expérimentale a été utilisée. Les matériaux Douglas et contreplaqué peuplier ont donc été testés en cône calorimètre à différents éclairagements énergétiques.

Les sections suivantes permettront de décrire le dispositif utilisé et de présenter les résultats obtenus pour les deux matériaux aux éclairagements énergétiques de 20, 35 et 50 kW.m⁻².

4.5.2.1. Le cône calorimètre

Le cône Calorimètre est un banc d'essai classiquement utilisé pour attester la réaction au feu des matériaux. Il répond à la norme ISO 5660-1 (ISO 5660, 2015). Il permet le suivi de nombreux paramètres tels que le temps d'ignition, la perte de masse, la vitesse de perte de masse, le taux de dégagement de chaleur (HRR) dans des conditions d'incendie bien-ventilées (ISO 19706, 2010). Ce dispositif ne sera pas présenté dans toute sa complexité dans le présent rapport. L'utilisation de ce dispositif (dont un schéma est présenté ci-dessous) implique pour autant un certain nombre d'hypothèses concernant les conditions expérimentales qu'il convient de préciser ici :

- L'éclairage énergétique imposé à la surface de l'échantillon est uniforme et maintenu constant pendant toute la durée de l'expérience.
- Le processus peut être considéré comme étant unidimensionnel et ne permet d'étudier le transfert de chaleur que dans la profondeur du matériau.

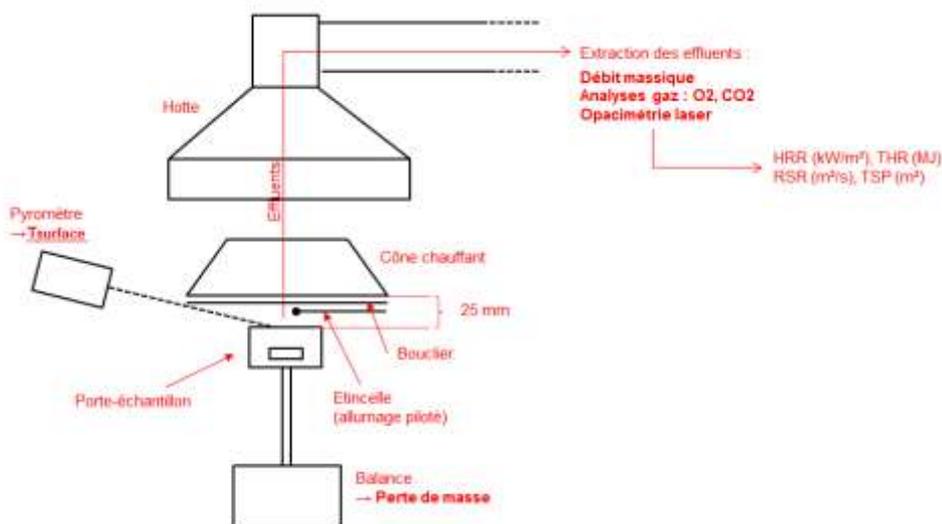


Figure 6 : Schéma du dispositif du cône calorimètre selon la norme ISO 5660

Dans l'étude MODFEU, trois éclairagements énergétiques, ont été considérés : 20, 35 et 50 kW.m² pour le douglas et pour le contreplaqué Peuplier. Ces éclairagements énergétiques sont respectivement représentatifs d'un feu naissant, croissant et à un stade de développement avancé mais non pleinement développé. Les paramètres d'études sélectionnés sont listés ci-après :

- Perte de masse et vitesse de perte de masse.
- Taux de dégagement de chaleur.

4.5.2.2. Perte de masse pour le Douglas :

Nous pouvons ici remarquer deux typologies de comportements :

- Le premier correspond à une décomposition relativement lente au début de l'essai (caractéristique d'un comportement pré-inflammation) puis accentué à partir d'environ 400 s. Ce comportement correspond à celui observé pour un éclairage énergétique de 20 kW.m².
- Le second correspond à une inflammation plus rapide de l'échantillon, excluant la phase de décomposition lente et menant à une décomposition rapide dès le début d'essai. Ce comportement est observé pour les deux autres éclairagements énergétiques. En fin d'essai, les courbes de perte de masse montrent un comportement asymptotique permettant de conclure quant à l'obtention d'une masse résiduelle correspondant à un mélange de char et de cendres. L'expérience devant être prolongée pendant un temps très long pour n'obtenir que du résidu.

Au regard des résultats de ces essais, nous pouvons conclure quant au caractère répétable des essais menés à l'échelle du cône calorimètre, lesquels permettent une analyse numérique ultérieure et le travail autour d'une courbe de taux de dégagement unique par simplification.

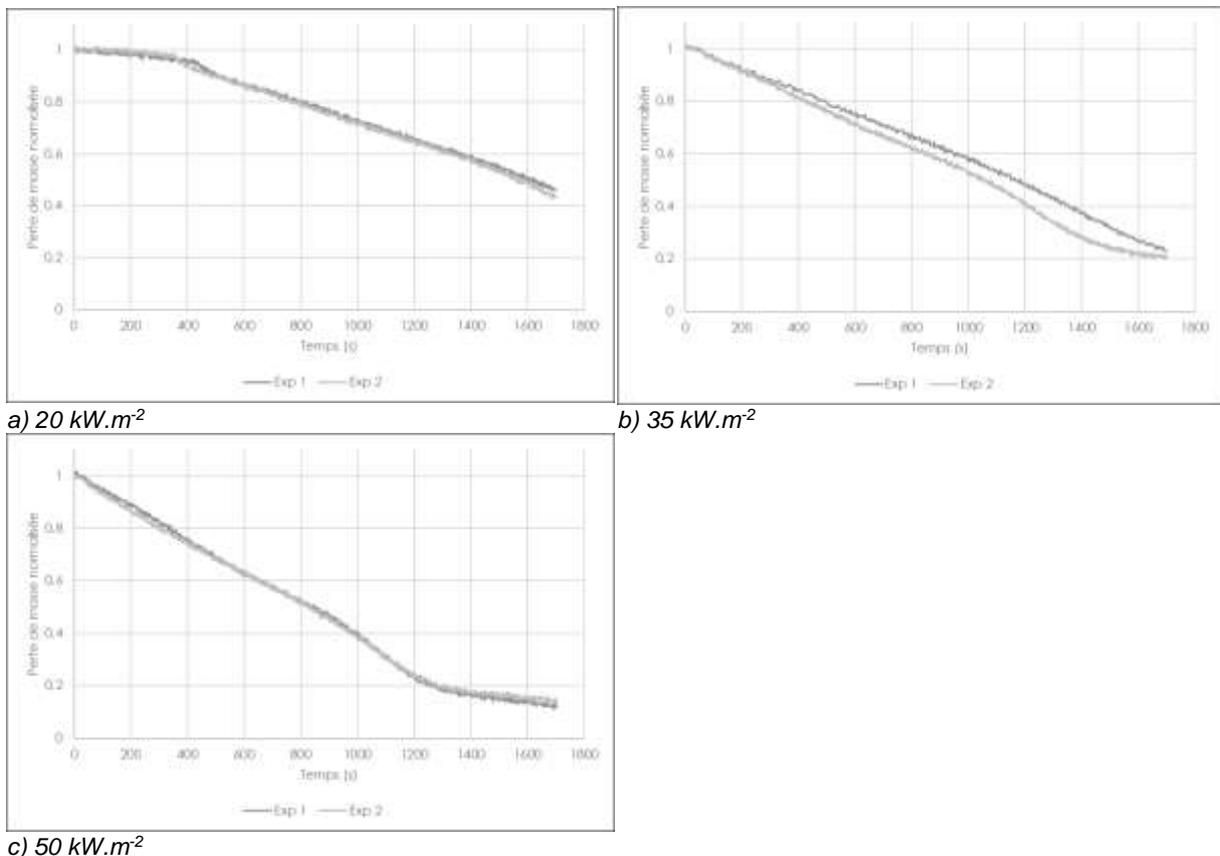
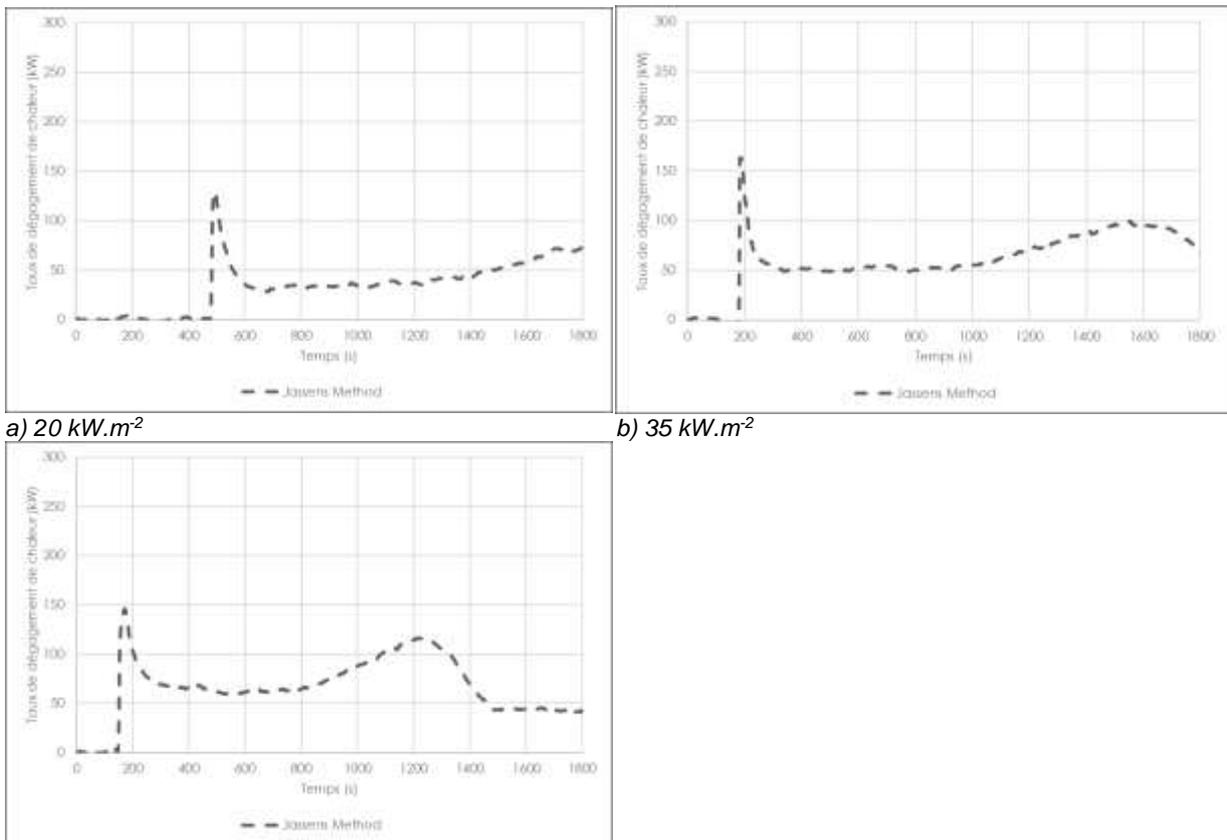


Figure 7 : Perte de masse du matériau douglas aux éclairagements énergétique de a) 20, b) 35 et c) 50 kW.m²

4.5.2.3. Taux de dégagement de chaleur (HRR) pour le Douglas

Les taux de dégagement de chaleur ou Heat Release Rate associé à la décomposition et à la combustion des matériaux ont été évalués grâce à la méthode de déplétion d'oxygène prescrite par la norme ISO 5660-2 et basée sur les travaux de Parker (Parker, 1984), Janssens (Janssens, 1991) et Thornton (Thornton, 1917).

Les taux de dégagement de chaleur (HRR) présentés pour le douglas en Figure 8 sont représentatifs du comportement du bois en cône calorimètre. Le pic initial de HRR correspond à l'inflammation du matériau. S'en suit l'établissement d'un régime plus stable puis une augmentation pour atteindre un second pic. Ce dernier est notamment lié à une augmentation de la vitesse de perte de masse du solide, résultant du retour thermique provoqué par la présence de l'isolant en face arrière de l'échantillon.



a) 20 kW.m²

b) 35 kW.m²

c) 50 kW.m²

Figure 8 : Heat Release Rate du matériau douglas aux éclaircements énergétique de a) 20, b) 35 et c) 50 kW.m²

4.5.3 Echelle intermédiaire : essais Panneau Radiant

Dans l'étude [8] les expérimentations à échelle intermédiaire ont été réalisées via un panneau radiant permettant de mettre en avant les conditions de propagation verticale de flamme.

4.5.3.1. Description de l'essai sur panneau radiant

La propagation verticale de la flamme est étudiée via un dispositif expérimental constitué d'un panneau radiant de surface $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ alimenté par un mélange propane/air servant de source d'éclairage énergétique. L'angle formé entre le panneau et l'échantillon étant de 45° .

L'échantillon, testé d'une surface de $0,1 \times 0,6 \text{ m}^2$ est positionné verticalement sur un porte-échantillon en silicate de calcium et monté sur un socle en acier, reposant sur des paliers à roulements et permettant de monter l'ensemble sur un rail de guidage linéaire. Le rail est fixé sur une table de manipulation permettant de déplacer l'ensemble avec précision.

La figure suivante extraite de (Colombiano, 2020) [8] présente le dispositif expérimental dans son intégralité lors d'un essai.

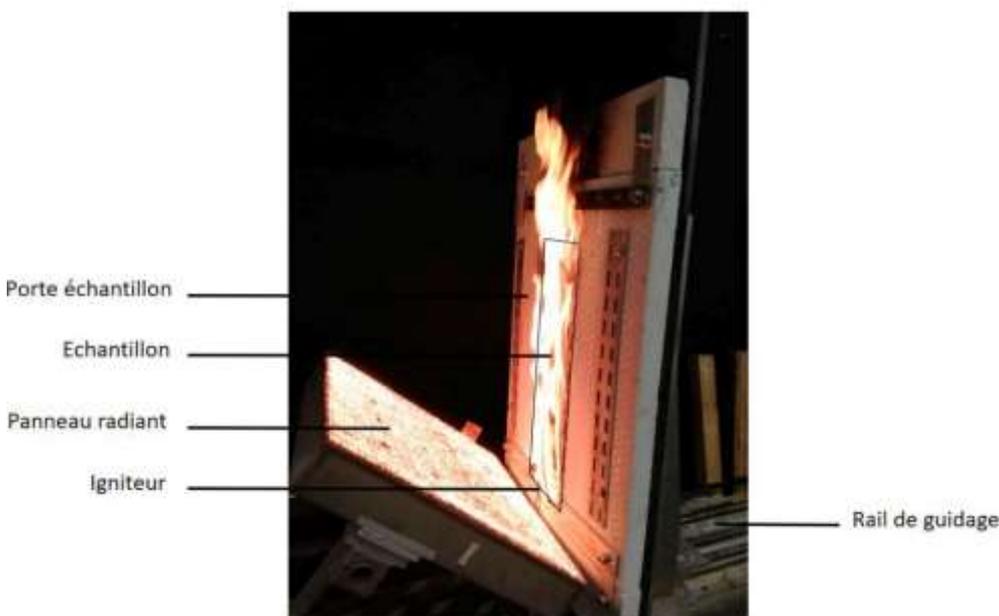


Figure 9 : Présentation du dispositif expérimental panneau radiant (Colombiano, 2020) [8]

4.5.3.2. Résultats des essais sur panneau radiant

Les résultats décrits dans le rapport d'étude [8] sont comparés aux résultats de modélisation présentés en section §4.6.3 page 23

4.5.1 Grande échelle : essais LEPIR2

Les données d'essais LEPIR2 exploitées dans le cadre de l'étude sont fournies par l'IT FCBA.

4.6 Travaux numériques réalisés

4.6.1 Modèle à échelle matière : ATG

L'objectif du travail à l'échelle de la matière consistait à analyser la décomposition thermique à la plus petite échelle de la méthodologie *scaling up* et ainsi d'acquérir les données nécessaires à caractériser sa réactivité chimique. Les données obtenues à ce stade constituent les paramètres d'entrée pour la simulation numérique de la décomposition à l'échelle matière avec FDS V6.7.5.

Dans ce contexte, les réactions et les mécanismes réactionnels ont été déduits des expériences ATG/DSC et de la littérature.

La modélisation mathématique des réactions a été réalisée sur la base d'un modèle de loi cinétique type Arrhenius appliquée à la phase solide de la forme $w_i = A_i e^{-\frac{E_i}{RT}} (1 - \alpha)^{n_i} Y_{O_2}^m$. Les paramètres cinétiques (A_i, E_i, n_i) de ce modèle, liés à chaque réaction (i) du mécanisme ont été obtenus par optimisation inverse par essais particuliers PSO.

Les quatre figures suivantes synthétisent les résultats obtenus.

Les résultats de l'optimisation ont permis une adéquation correcte entre la courbe MLR expérimentale et la loi cinétique adoptée, et plus particulièrement dans le cas du douglas.

En complément, au regard des critères de validation proposés et appliqués aux simulations numériques menées à cette échelle, les résultats obtenus sont encourageants pour ce matériau.

L'analyse précédemment menée permet de démontrer la bonne capacité du modèle numérique construit pour le douglas à reproduire les expérimentations menées à l'aide de l'ATG. Cette première étape de validation permet d'envisager l'utilisation des modèles cinétiques construits pour les deux matériaux de manière plus ambitieuse c'est-à-dire dans un environnement plus proche de la réalité, intégrant notamment les propriétés thermiques des matériaux.

Une vigilance particulière sera apportée aux résultats suivants du fait des déphasages observés à cette échelle et du fait des écarts de valeurs maximums de pics constatés.

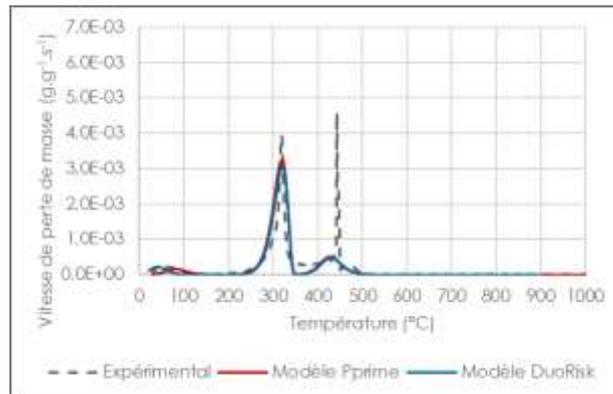


Figure 10 : Vitesse de perte de masse - Douglas - atmosphère oxydante - 10 °C.min⁻¹

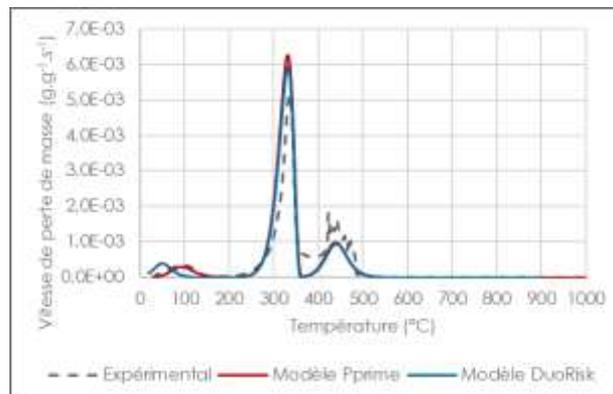


Figure 11 : Vitesse de perte de masse - Douglas - atmosphère oxydante - 20 °C.min⁻¹

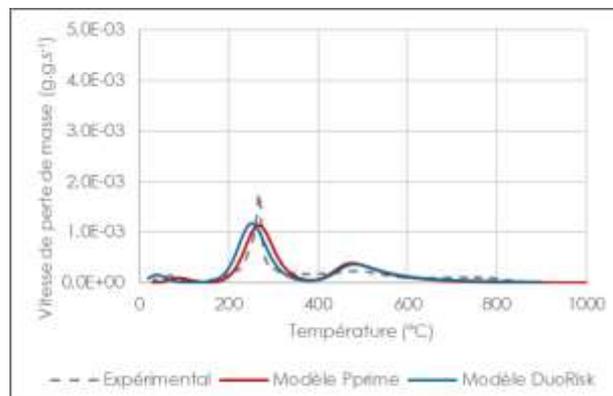


Figure 12 : Vitesse de perte de masse - Contreplaqué peuplier - atmosphère oxydante - 10 °C.min⁻¹

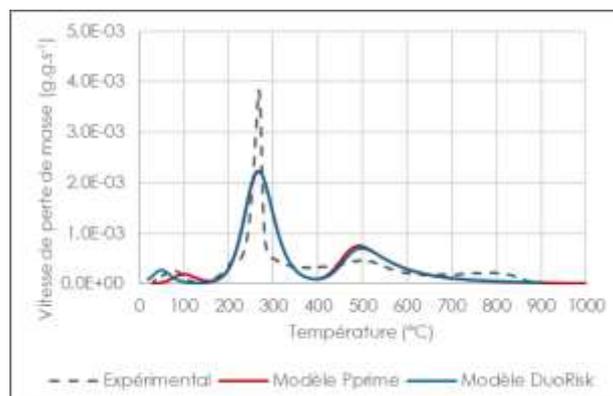


Figure 13 : Vitesse de perte de masse - Contreplaqué peuplier - atmosphère oxydante - 20 °C.min⁻¹

4.6.2 Modèle à échelle matériau : Cône calorimètre

Les résultats d'étude à l'échelle matière (ATG) et à l'échelle de matériau (cône calorimètre) ont permis la validation du modèle cinétique de décomposition et également l'opportunité de son utilisation dans le code FDS pour simuler à l'échelle matière la décomposition thermique des matériaux. Dans la partie suivante, on procède à la modélisation numérique de la décomposition thermique des matériaux.

Pour définir l'opportunité d'utiliser le modèle cinétique construit à l'échelle matière tout en considérant les phénomènes thermiques intervenant au fur et à mesure de l'échauffement et de la décomposition des matériaux, il est nécessaire de bâtir une simulation numérique représentative de la base expérimentale sur laquelle les données ont été collectées. Ainsi, la simulation FDS vise à reproduire à l'identique les conditions de décomposition du matériau rencontrées en cône calorimètre.

L'objectif visé est de pouvoir reproduire fidèlement grâce au modèle la décomposition thermique des matériaux en se basant sur les paramètres clés que sont la vitesse de perte de masse et le taux de dégagement de chaleur produit lors de la combustion. Pour ce faire, il faut donc considérer d'une part la décomposition en phase solide du matériau dans toute sa complexité (intégration des phénomènes physiques de transfert de chaleur, de diffusion des espèces gazeuses) et d'autre part les phénomènes occurrents en phase gazeuse à la surface du matériau et dans son environnement proche (*i.e.* caractéristiques de flamme, retour thermique, *etc.*). A ce stade, la simulation numérique revêt donc un caractère plus complet qu'à l'échelle matière puisqu'elle prend en compte outre la cinétique chimique de décomposition, les aspects thermiques.

Avec l'objectif d'évaluer la capacité du modèle numérique à reproduire les vitesses de perte de masse et les taux de dégagement de chaleur observés en cône calorimètre et ce pour chaque éclaircissement énergétique prescrit, de nombreuses simulations numériques ont été explorées. En effet, à ce stade de la simulation, de nombreux paramètres sont introduits et leurs influences sur les résultats de simulation doivent être analysées. Une analyse paramétrique a notamment été conduite pour répondre à cette problématique. Les paramètres nécessaires à la simulation numérique, ainsi que les options de simulation sont présentés dans l'étude [8].

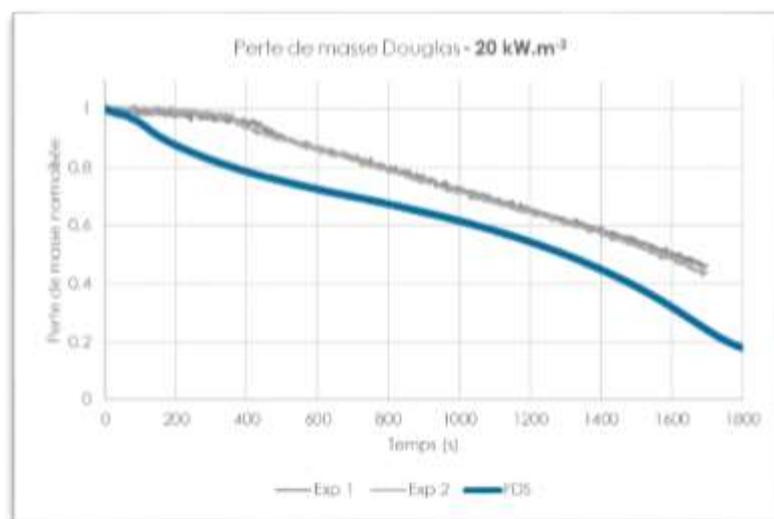


Figure 14 : Résultats 20 kW.m² : perte de masse pour le Douglas

L'étude montre une décomposition trop rapide pour le douglas et le peuplier. Il peut s'expliquer par une problématique FDS à faibles flux. L'inflammation trop rapide et il y a des lacunes du modèle en phase gaz.

Pour le taux de dégagement de chaleur (HRR) les niveaux atteints correspondent à l'expérience (une fois la phase d'inflammation passée).

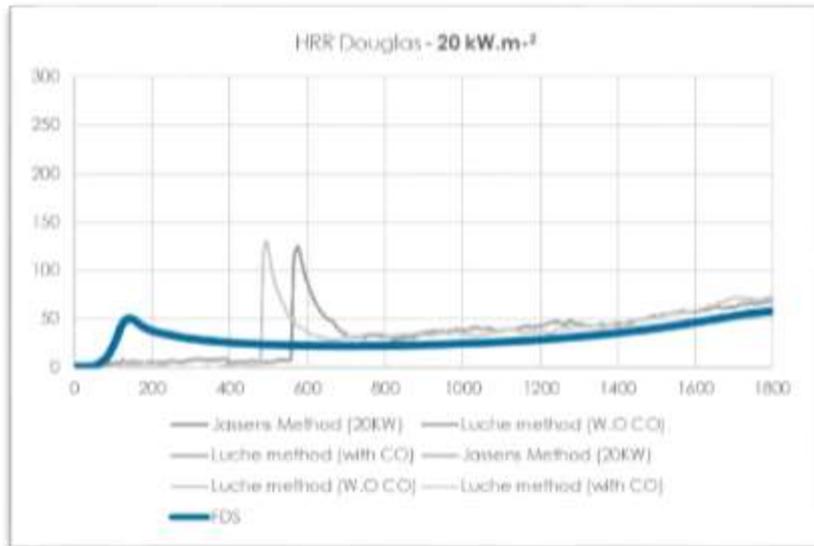


Figure 15 : Résultats 20 kW.m² : Taux de dégagement de chaleur pour le Douglas

Dans les résultats ATG à 35 kW.m², la perte de masse est relativement mieux décrite, l'inflammation est précoce (mix is burn) et on obtient une très bonne description du HRR malgré le déphasage.

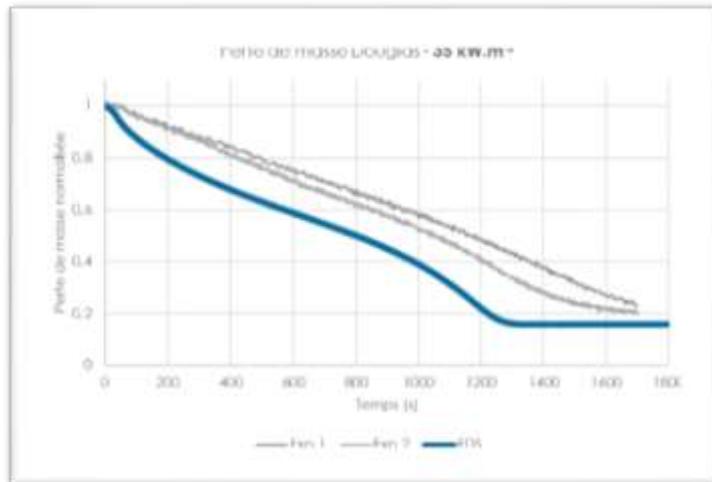


Figure 16 : Résultats 35 kW.m² : perte de masse pour le Douglas

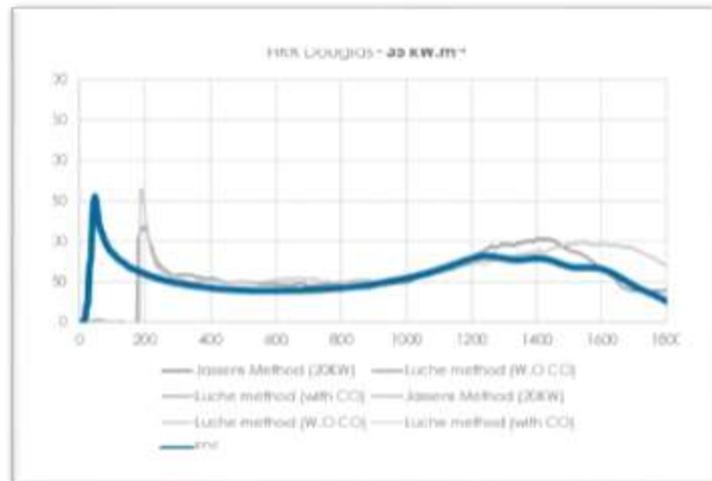


Figure 17 : Résultats 35 kW.m² : Taux de dégagement de chaleur pour le Douglas

Les résultats à 50 kW.m^{-2} ont donné une masse conservée, un pic d'inflammation mal capté mais avec un ordre de grandeur post-inflammation acceptable.

Les résultats permettent de conclure que :

- le comportement est mieux décrit pour le Douglas que pour CP (HRR notamment)
- il y a toujours des lacunes du modèle en phase gaz
- il y a peu de leviers

On retrouve la même problématique FDS à faible flux et une lacune évidente du modèle à faible flux

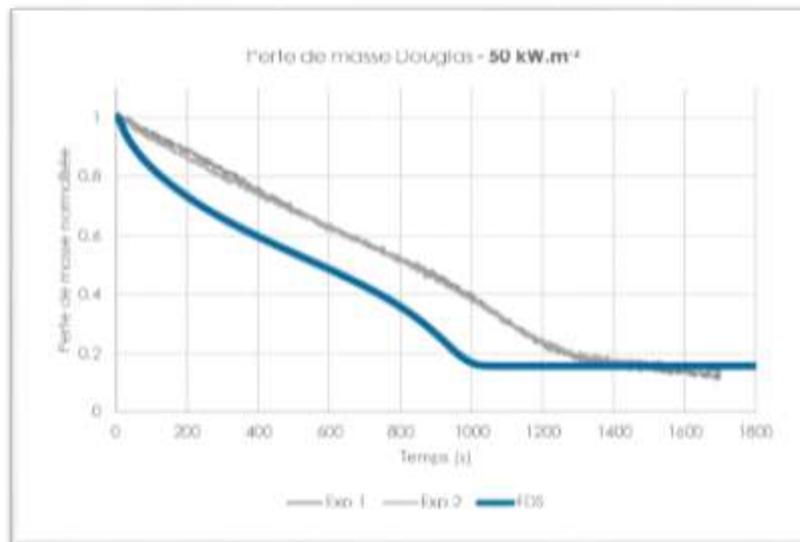


Figure 18 : Résultats 50 kW.m^{-2} : perte de masse pour le Douglas

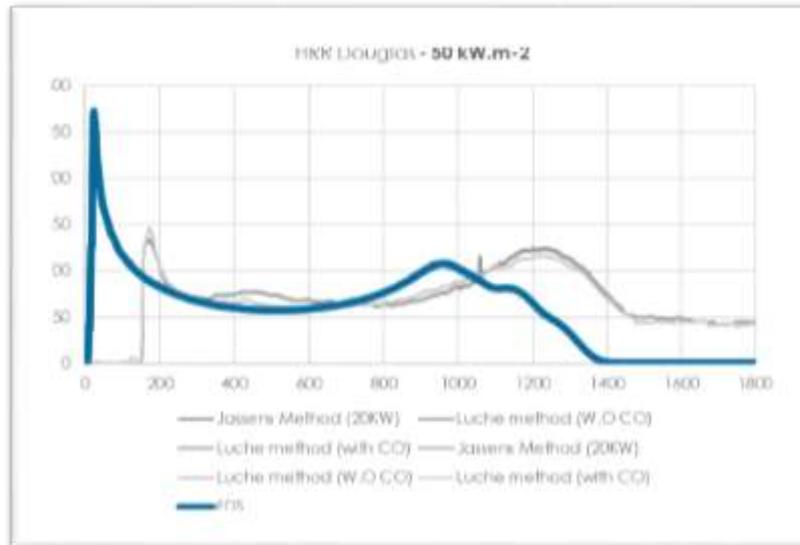


Figure 19 : Résultats 50 kW.m^{-2} : Taux de dégagement de chaleur pour le Douglas

4.6.3 Modèle à échelle intermédiaire : Panneau Radiant

Ces résultats sont analysés au plan qualitatif sur la base d'observations comparatives entre l'expérience et des vues de modélisation. Deux critères de comparaison sont retenus :

- Le taux de dégagement de chaleur volumique (représentatif des contours de la flamme).
- Les champs de température au droit de la surface d'échantillon.

Deux modèles d'éclairage énergétique (simple et complexe) ont été adoptés pour évaluer l'impact d'une simplification de la contrainte thermique.

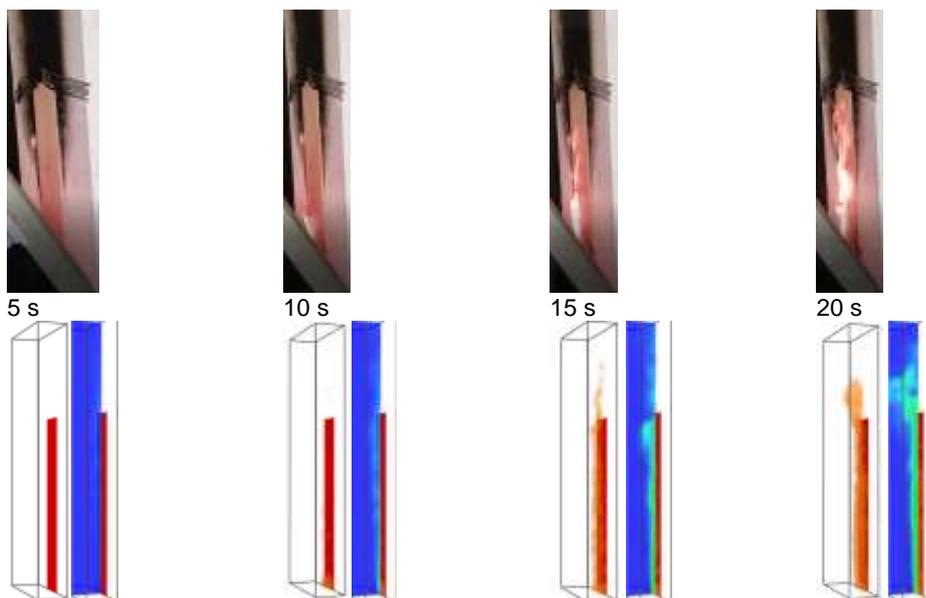
4.6.3.1. Résultats du modèle simple sur le Douglas

Le modèle dont la figure ci-après présente les résultats est la configuration simplifiée du panneau radiant, par application d'un flux de chaleur décroissant en hauteur sur la surface de l'échantillon du douglas.

Dans le cadre de ce modèle, il est intéressant de relever un comportement de flamme proche entre l'essai expérimental et la simulation numérique. En effet, et comme en témoigne la visualisation du taux de dégagement de chaleur par unité de volume (représentative du contour de la flamme), nous pouvons ici noter que lors des 10 premières secondes, l'inflammation se produit progressivement en bas de l'échantillon.

Par la suite, l'établissement de la flamme en surface est beaucoup plus rapide dans le modèle que lors de l'essai. En effet, il nous est possible de noter que cette dernière atteint le haut de l'échantillon numériquement entre 10 et 15 secondes. Lors de l'expérimentation, l'atteinte du haut de la plaque de bois ne survient qu'entre 20 et 25 secondes.

Malgré une progression de flamme très rapide en hauteur, le début d'essai est donc plus fidèlement reproduit ici que dans le cas du contreplaqué. Cette progression peut notamment s'expliquer par les éléments soulevés lors des simulations en cône calorimètre qui mettent en avant une décomposition plus rapide numériquement qu'expérimentalement, mais aussi des lacunes quant à la description de la cinétique chimique en phase gazeuse.



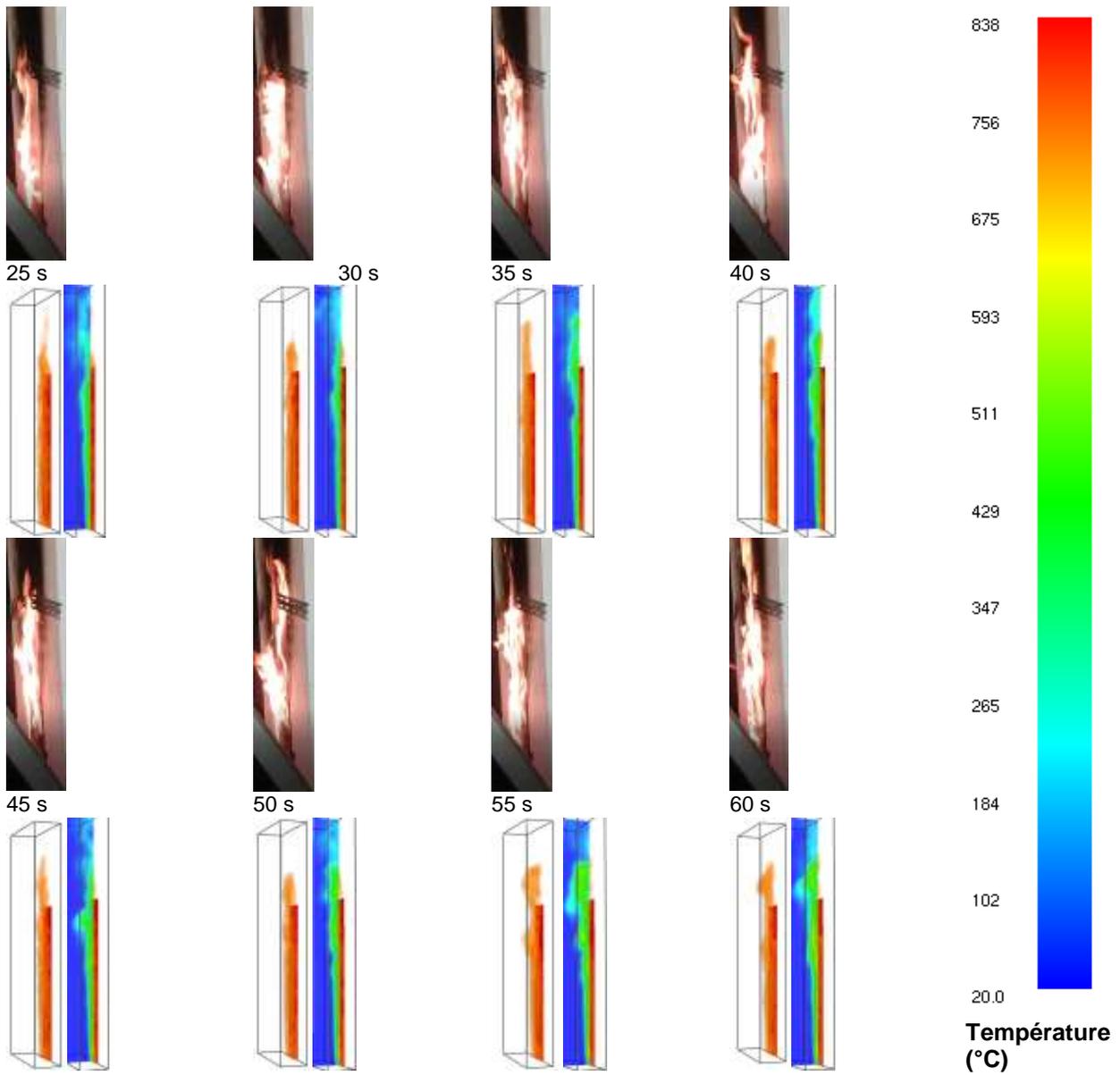


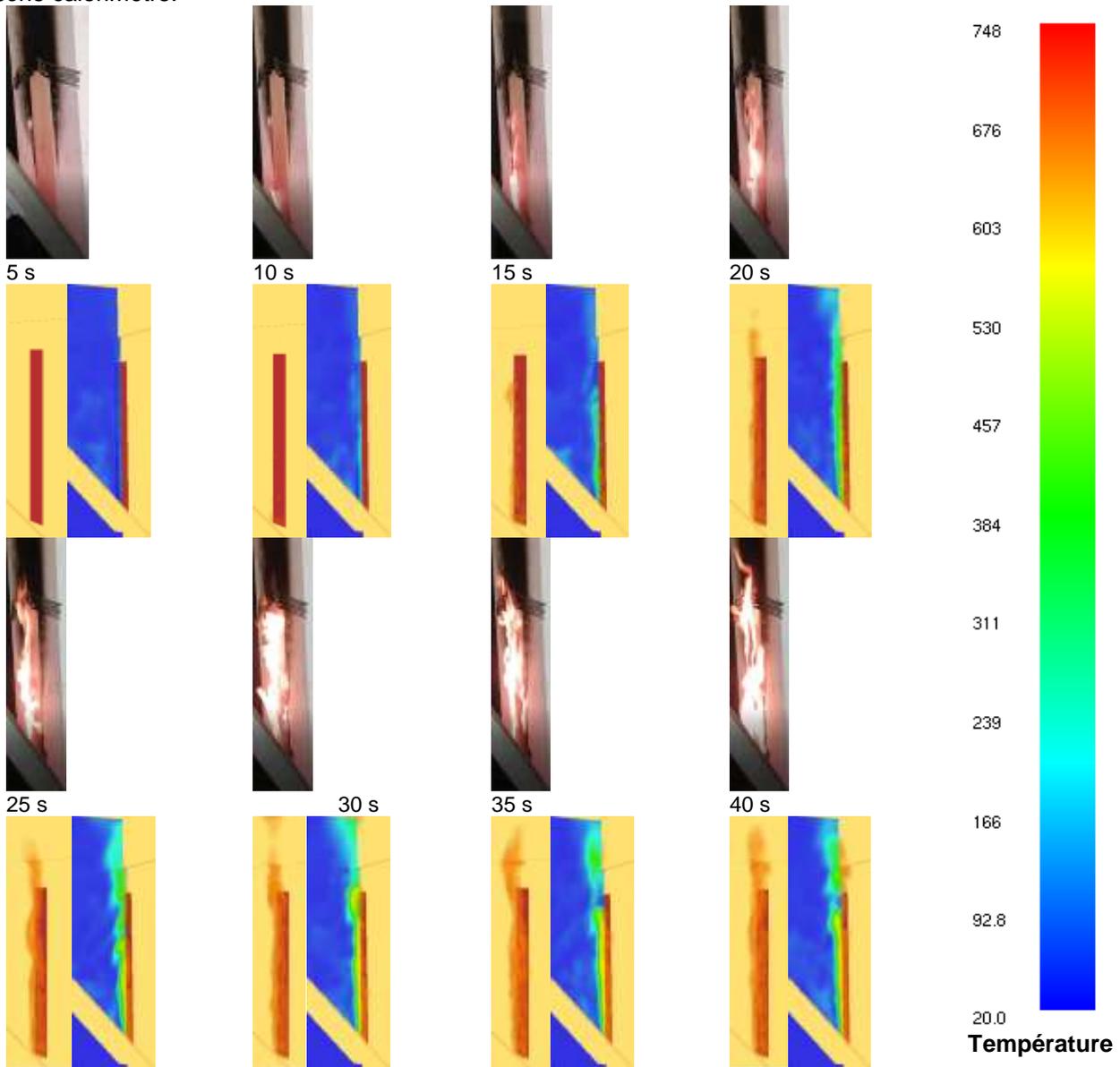
Figure 20 : Visualisation des taux de dégagement de chaleur volumique et des champs de températures en surface du douglas et pour sa modélisation simplifiée

4.6.3.2. Résultats du modèle complexe sur le Douglas

Dans les résultats du modèle complexe sur le Douglas, les écoulements en parois sont plus fidèlement représentés par le modèle dans le cas d'une simulation complète du panneau. Ce dernier impactant probablement les conditions aérauliques en surface.

Par ailleurs, peut être décrit ici un comportement d'établissement de la flamme en surface beaucoup plus proche de l'essai réel que lors des simulations précédentes. En effet, l'inflammation est bien reproduite en 10 secondes, et, s'en suivant, la propagation verticale s'effectue de manière plus progressive que dans les essais précédents.

Numériquement, le régime établi de combustion (persistance de la flamme en hauteur de l'échantillon) est atteint au bout de 20 secondes. Expérimentalement, ce régime est cependant atteint plus tardivement (environ 40 secondes). Cette observation vient confirmer la décomposition rapide observée lors de la modélisation du cône calorimètre.



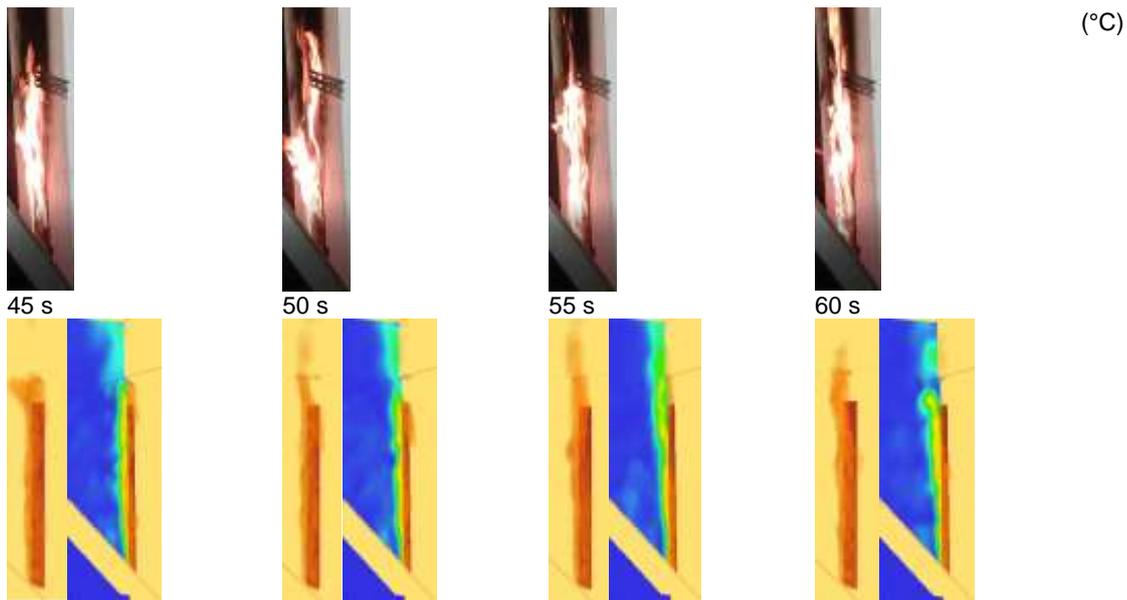


Figure 21 : Visualisation des taux de dégagement de chaleur volumique et des champs de températures en surface du douglas et pour sa modélisation complexe

4.6.3.1. Synthèse

Comme pour le Douglas les résultats de simulations ont été comparés aux essais de contreplaqué Peuplier sur panneau radiant. La description de la phase solide du contreplaqué peuplier confirme la faiblesse observée à l'échelle de l'ATG (évaporation de l'eau trop rapide numériquement). Sa décomposition thermique au cône calorimètre est accentuée par une mauvaise description de la cinétique chimique en phase gazeuse. Les valeurs de taux de dégagement de chaleur sont cohérentes mais les inflammations et la propagation de la flamme sont beaucoup trop rapides. L'enthalpie de combustion en phase gazeuse n'est potentiellement pas à mettre en cause mais le modèle gazeux prescrit n'est pas fidèle aux espèces émanant du contreplaqué.

L'utilisation de ce modèle gazeux est beaucoup plus cohérente avec le Douglas et il est fort probable que les adjuvants associés au contreplaqué jouent un rôle majeur sur la phénoménologie en phase gazeuse, ceci associé au fait que les valeurs de propriétés thermiques trouvées dans la littérature correspondent à des propriétés de bois bruts. Le manque de données évolutives à la température sur le contreplaqué peuplier peut aussi expliquer le manque de précision du modèle. Par ailleurs et pour finir, le modèle cinétique développé par l'Institut Pprime repose sur un carottage réalisé dans le contreplaqué peuplier. Par nature, ce matériau est composé de plis successifs collés ne pouvant être représentés sous FDS sans connaissance précise de la nature physico-chimique des différentes couches de constituants. En effet, le logiciel ne prend en compte que le modèle cinétique développé sur la base du carottage et considère une phase condensée homogène dont la décomposition est uniquement décrite par ledit modèle.

Au regard de ces éléments et malgré une décomposition accélérée lors de l'établissement de la flamme, FDS semble plus à même de décrire le comportement du Douglas face à l'inflammation que lors des essais précédents. Les deux types de sollicitations thermiques ont permis de conclure de manière qualitative quant à la capacité de FDS à reproduire la propagation et la structure de la flamme en surface, sachant que l'approche complexe a montré une meilleure capacité à reproduire la structure turbulente des flammes.

Il paraît donc plus pertinent de tenter une implémentation du Douglas dans le cadre d'essais à échelle réelle, et plus particulièrement dans le cadre de la modélisation du banc LEPIR.

4.6.4 Modèles à grande échelle : LEPIR2

L'étude [8] a repris le modèle développé avec FCBA dans le cadre de l'étude préliminaire (cf. section §3) avec une implémentation du modèle Douglas.

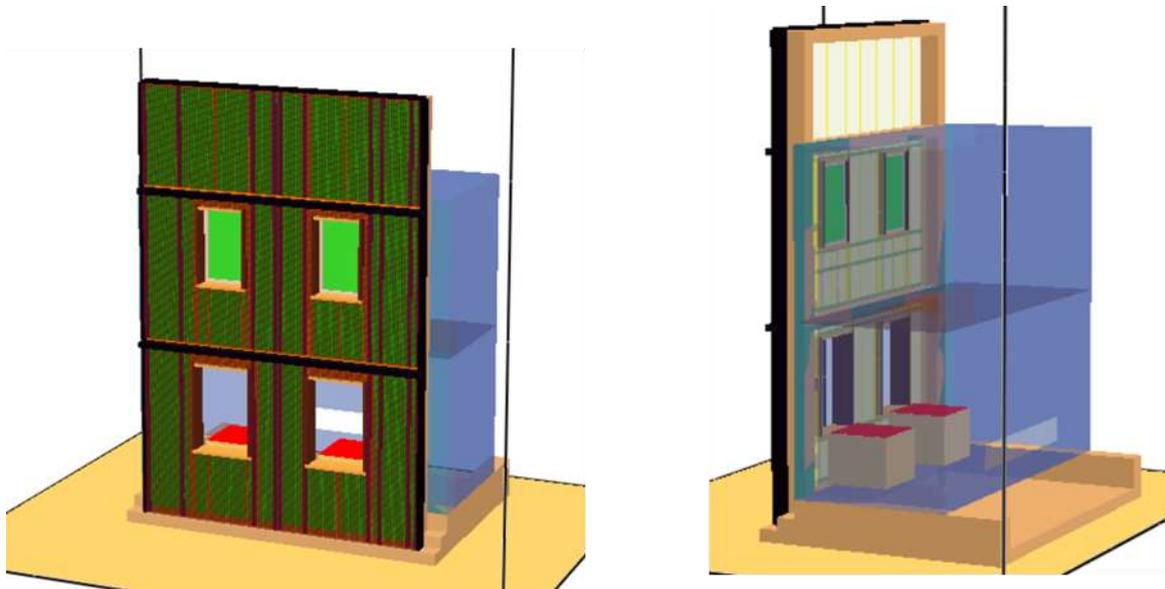


Figure 22 : Modélisation PPRIME du feu de façade sur FDS

Les dimensions et les caractéristiques des éléments porteurs ainsi que des différentes couches sont données dans le rapport [8].

Les matériaux utilisés dans la simulation numérique à l'exception des montants et des linteaux constituant les embrasures de fenêtre et des vitres du niveau R+1 participent tous au transfert de chaleur. De fait leurs propriétés thermiques ont fait l'objet d'une définition précise. Le tableau suivant présente leurs principales propriétés, issues de la littérature.

Des problèmes ont été rencontrés par PPRIME et DUORISK à l'issue du projet notamment du fait de moyens de calcul en mode dégradé. De ce fait un seul calcul partiel a été livré début juin 2021, ceci s'explique également :

- **Par un temps de calcul très long : un minimum de une semaine sur des serveurs de calcul universitaires dédiés (maillage du dispositif LEPIR très important +7,5M cellules) ;**
- **Maintenance des serveurs de calcul (redémarrages intempestifs depuis plusieurs mois).**

Les premiers calculs montrent encore une propagation trop rapide et une inflammation prématurée du dernier niveau, sachant les difficultés à réaliser une analyse paramétrique correcte du fait du temps de calcul.

Sur la configuration à grande échelle, l'étude conclut sur les points suivants :

- **le modèle n'est pas assez optimisé pour le temps de calcul,**
- **les matériaux bois/incombustibles ne sont pas suffisamment bien retranscrits en façade,**
- **le modèle de chambre à feu est trop approximatif et nécessite un affinage car son impact est très important sur le résultat : cette correction est apportée en phase de valorisation.**

Matériaux	Densité (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur Spécifique (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Référence
Béton	1600	0,3	0,88	(Huy Dong et al., n.d.)
Acier	7850	46	0,5	
Plâtre	680	0,12	0,95	
Laine de roche	70	à T = 0 °C - 0,063 à T = 204 °C - 0,08 à T = 316 °C - 0,091 à T = 427 °C - 0,105 à T = 538 °C - 0,122 à T = 649 °C - 0,143 à T = 760 °C - 0,166 à T = 871 °C - 0,193 à T = 982 °C - 0,223 à T = 1093 °C - 0,257	à T = 0 °C - 0,835 à T = 125 °C - 0,870 à T = 225 °C - 0,903 à T = 325 °C - 0,936 à T = 425 °C - 0,969 à T = 525 °C - 1,002 à T = 625 °C - 1,035 à T = 725 °C - 1,069 à T = 825 °C - 1,102 à T = 925 °C - 1,135 à T = 1025 °C - 1,168 à T = 1125 °C - 1,201 à T = 1225 °C - 1,234	
Laine de verre	25	0,035	0,840	
Polypropylène	100	0,1	1,0	
PVC	1440	0,19	1,05	
Douglas	439	à T = 20 °C - 0,12 à T = 200 °C - 0,15 à T = 349 °C - 0,07 à T = 500 °C - 0,09 à T = 800 °C - 0,35 à T = 1200 °C - 1,5	à T = 20 °C - 1,50 à T = 99.4 °C - 1,73 à T = 99.5 °C - 1,73 à T = 101.95 °C - 2,73 à T = 104.4 °C - 1,74 à T = 200 °C - 2,14 à T = 350 °C - 0,72 à T = 800 °C - 0,72	
Verre	2225	1,4	0,835	

Tableau 2 : Description des propriétés principales des matériaux constitutifs de la façade modélisée

4.7 Conclusions de l'étude de ressourcement

L'étude menée dans le rapport [8] permet d'appliquer les différentes étapes de la méthodologie nécessaire à déployer pour caractériser la décomposition thermique d'un matériau solide au cours d'un scénario d'incendie. Elle s'appuie sur la méthode dite scaling-up qui consiste à définir la réactivité chimique et thermique d'un matériau depuis l'échelle de la matière jusqu'à une échelle d'emploi du produit. La réactivité du produit est ainsi évaluée à différentes échelles, impliquant la réalisation d'essais expérimentaux servant de base au développement de simulations numériques d'incendie réalisées à l'aide du logiciel FDS.

Ces simulations numériques ont pour objectif de caractériser une problématique réelle d'incendie pour une part, mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection face au risque et d'autre part, dimensionner les équipements concourants à la sécurité en cas de concrétisation du scénario choisi. De fait, les modèles utilisés pour alimenter le code de simulation d'incendie se doivent d'être les plus fiables possibles. Cette fiabilité ne peut être atteinte que par une démarche rigoureuse de construction desdits modèles et par une validation qui doit permettre de s'assurer que les données obtenues via les modèles sont conformes à l'expression d'un scénario d'incendie qui représente une réalité possible.

Le présent projet a permis d'appliquer cette méthodologie de construction et de validation d'un modèle de décomposition thermique de matériaux en bois dans un scénario d'incendie.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée pour définir la réactivité chimique et thermique des deux matériaux et leurs conditions de décomposition. Elle a permis de définir les gammes de variations des paramètres importants régissant la décomposition des matériaux sous l'effet de la chaleur.

A partir de cette base bibliographique, des essais ont été réalisés à l'échelle dite de la matière (soit quelques milligrammes de produit solide en ATG) pour déterminer la réactivité à la température des deux matériaux.

Ces analyses ont permis de mettre en avant les différentes phases de décomposition des matériaux en fonction de la température, du point de vue de leur perte de masse, et de déduire pour chacun d'eux un mécanisme de décomposition thermique apparent, cohérent avec leurs phases de décomposition.

Ces mécanismes réactionnels construits sur la base des observations expérimentales ont ensuite fait l'objet d'une optimisation de leurs paramètres cinétiques, au sens de la loi d'Arrhenius, pour pouvoir être utilisés en tant que données d'entrée dans le cadre des simulations numériques à petite échelle.

Ces simulations ont été réalisées pour les deux matériaux de l'étude afin de reproduire numériquement les conditions d'essais en ATG auxquelles ils avaient été soumis.

Les résultats obtenus à ce stade ont mis en avant la capacité des modèles numériques créés à reproduire numériquement les évolutions expérimentales de perte de masse et de vitesse de perte de masse, même si quelques écarts peuvent être observés sur la conservation de masse et sur l'intensité de la décomposition thermique.

Une problématique de simulation a pu être soulevée par cette étude quant à la représentation de l'évaporation de l'eau au cours de la décomposition thermique d'un matériau bois sous FDS.

Dans une optique de changement croissant d'échelle, les modèles de cinétique chimique en phase condensée ont été implémentés dans une simulation prenant en compte les caractéristiques thermiques des matériaux. Le cône calorimètre permet une analyse globale de la combustibilité et sa simulation représente aujourd'hui une étape de validation au plan des paramètres physiques.

Sur la base de ces simulations et de leurs comparaisons aux essais réels, nous avons pu mettre en avant une adéquation uniquement partielle des modèles créés, au regard des résultats obtenus tant au plan de la perte de masse que sur celui du taux de dégagement de chaleur.

Ainsi, des doutes ont été émis quant à la description de la phase gazeuse du contreplaqué, quant aux paramètres thermiques implémentés et quant aux capacités de FDS à reproduire un matériau composé de plis successifs. Les résultats relatifs au douglas étant en revanche plus encourageant et il est possible de relever que les écarts observés sont liés à des problématiques de description de la phase gazeuse au travers de l'inflammation, mais aussi à la problématique d'évaporation de l'eau observée à l'échelle de l'ATG.

Au regard de ces résultats, les deux matériaux ont été testés à l'échelle intermédiaire du panneau radiant en vue de valider la capacité du code à reproduire la propagation verticale de la flamme, représentative des objectifs finaux de l'étude.

Les observations réalisées à l'échelle du cône calorimètre ont été amplifiées à cette échelle et devant les écarts observés pour le contreplaqué, le choix de modélisation à grande échelle s'est porté uniquement sur le Douglas. En effet, le contreplaqué simulé a ici montré une décomposition beaucoup plus rapide que lors des essais expérimentaux.

Le douglas est quant à lui mieux décrit au plan de son inflammation, de sa structure de flamme et de la propagation de cette dernière. Cette étude a représenté une opportunité au plan de l'ingénierie puisque deux conditions de simulation ont été testées en vue de simplifier les modèles pour en réduire les temps d'exploitation. A cependant été démontré, dans le cadre de cette première approche, qu'une modélisation complète du panneau était beaucoup plus appropriée à la reproduction des écoulements aérauliques.

Le test LEPIR a été modélisé pour reproduire le comportement d'une solution constructive constituée d'un bardage en douglas. Une reproduction fidèle du test a été réalisée et deux propositions de modélisation du foyer sont ici proposées.

En guise de perspectives à cette étude, ont pu être identifiés les points suivants :

- **Amélioration de la description de l'évaporation de l'eau sous FDS via une compensation au travers de paramètres thermiques ou via une modification du code.**
- **Amélioration de la description des modèles en phase gazeuse via des analyses expérimentales grâce à un analyseur Infra Rouge à Transformée de Fourier permettant la définition des espèces chimiques de décomposition et leur réactivité en phase gazeuse et via un affinement des propriétés d'inflammation sous FDS.**
- **Réalisation d'études quantitatives à l'échelle du panneau radiant en vue d'obtenir d'autres paramètres de validation.**
- **Caractérisation précise du banc LEPIR et notamment d'évolution de son foyer au cours du temps.**

5. ETUDE DE MATURATION

5.1 Remise en perspective des travaux

En approche liminaire au développement des résultats de l'étude maturation, il est apparu pertinent de rappeler le paysage réglementaire en matière de feu façade en France, et d'identifier dans ces textes les différents points d'ouverture réglementaire à l'ingénierie de la réaction au feu qui constitue la trame globale de toute l'étude Modélisation Feu Façade. Une remise en contexte des travaux réalisés est également nécessaire pour montrer la place prise parmi les approches existantes déjà utilisées à ce jour en ingénierie, ainsi que les méthodologies permettant d'utiliser ces approches avec un degré de confiance suffisamment élevé en matière d'ingénierie de sécurité incendie appliqué à des projets de bâtiments.

5.1.1 Exigences réglementaires feu façade en France

Le tableau suivant synthétise les corpus réglementaires associés aux principaux types d'ouvrages, ainsi que la référence aux principaux textes portant sur les exigences de moyens et/ou de résultat en matière de propagation du feu par les façades.

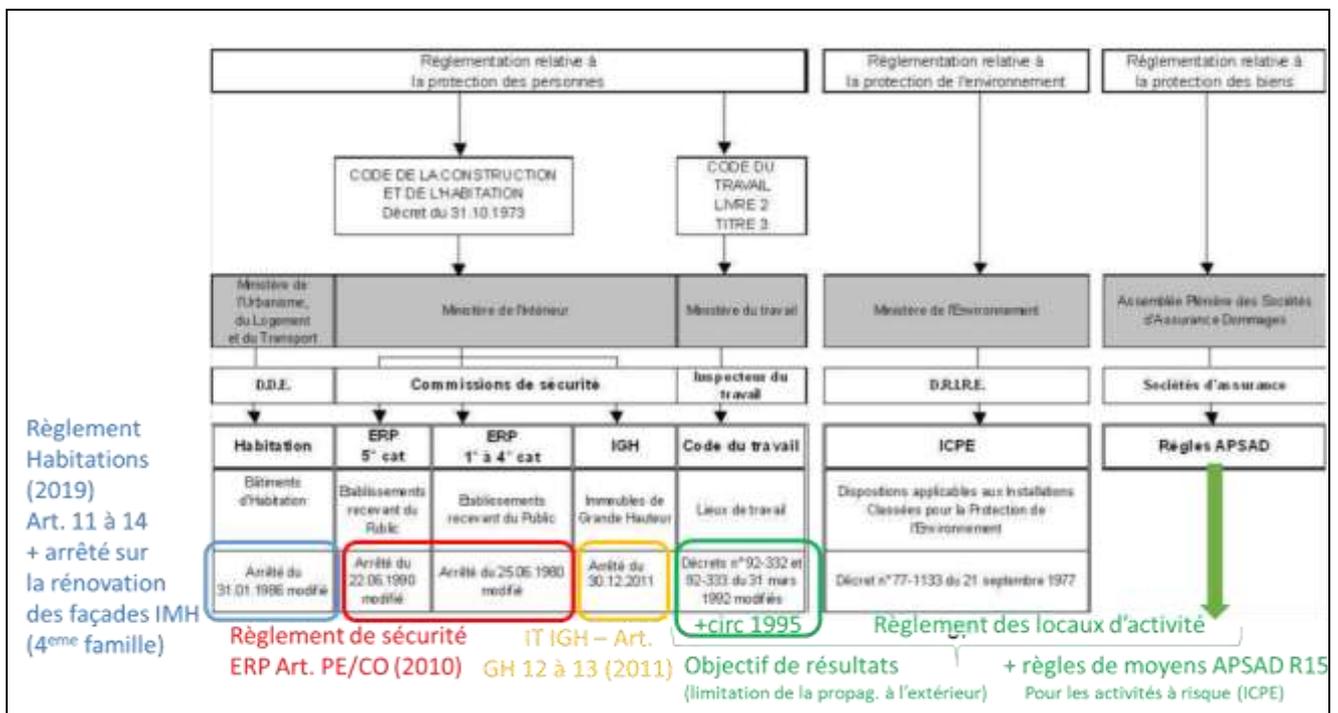


Tableau 3 : Textes réglementaires/règles de référence en matière de propagation du feu par les façades en France

Plusieurs textes satellites présentés dans le tableau suivant viennent décrire des solutions techniques réputées satisfaisante du point de vue des objectifs réglementaires.

Plus particulièrement, l'Instruction Technique N° 249 joue un rôle central dès lors qu'une exigence feu façade existe, à savoir dans le cas des Établissements Recevant du Public (ERP) du premier groupe sauf exceptions de l'article CO21, des immeubles d'habitation de 3^{ème}, 4^{ème} famille, et des immeubles de moyenne et de grande hauteur (IMH, IGH).

En résumé, l'IT249 précise les conditions d'application des exigences relevant du règlement de sécurité contre les risques d'incendie relatives aux façades (calculs des distances dites de **C+D** et de Masse Combustible Mobilisable **MCM**, comportement au feu des éléments de façade), détaille des solutions constructives ne nécessitant pas de vérifications expérimentales, et autorise le recours à des solutions alternatives, sous conditions d'évaluation par une **APL propriétaire ou générique** (pour une application sur tout type de chantier) ou par un **avis de chantier ou de façade** (pour une application sur un chantier spécifique). Ces documents sont nécessairement émis par un laboratoire ou groupement de laboratoires agréés en réaction et en résistance au feu par le ministère de l'intérieur.

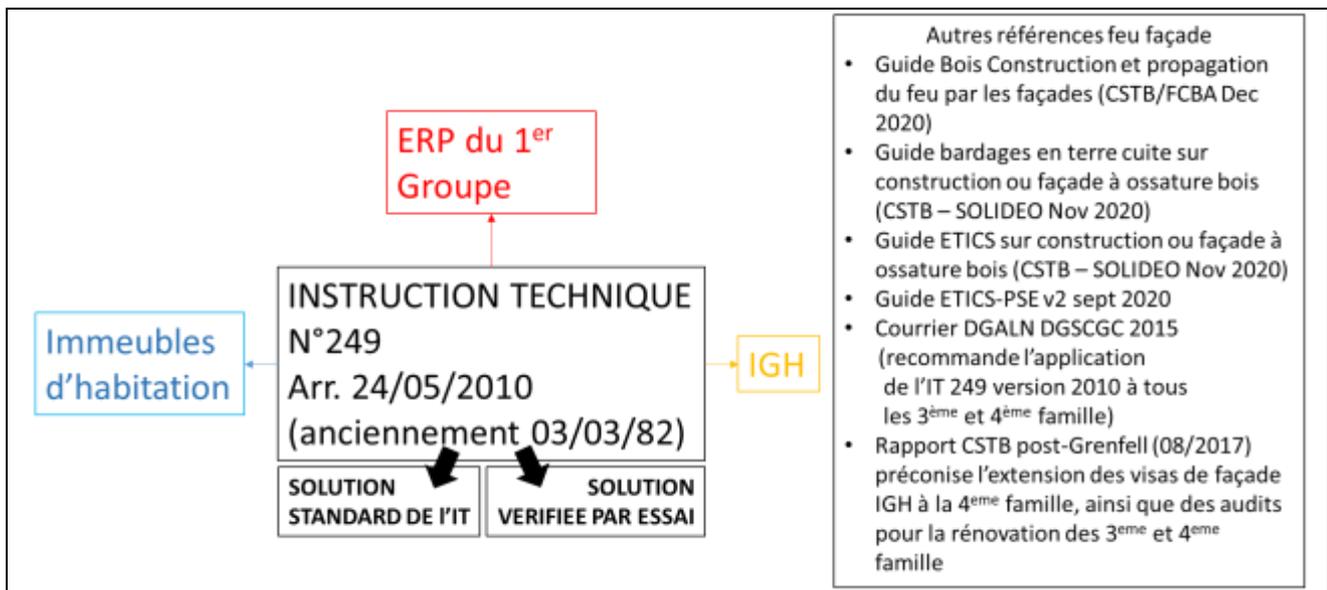


Tableau 4 : Textes satellites en matière de propagation du feu par les façades en France

L'APL en particulier peut s'appuyer sur la réalisation d'un essai expérimental à échelle réelle dit essai LEPIR2 présenté dans la section suivante.

5.1.2 Essai de façade selon le protocole LEPIR2

La vérification des critères de performance d'une façade peut être réalisée au moyen d'un banc d'essai de façade **LEPIR2** (Laboratoire Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux) conformément à l'arrêté de septembre 1970 [1] et au protocole validé par le ministère de l'Intérieur [2]. Celui-ci permet d'évaluer les performances et le comportement au feu de plusieurs types de façades tels que les façades non interrompues. Les façades peuvent être protégées ou non d'un système d'isolation thermique par l'extérieur (ITE).

La figure suivante montre le dispositif actuellement exploité par CSTB et FCBA sur le site FCBA de CESTAS.

Le foyer est constitué de 600 kg de bois répartis entre deux bûchers placés dans un compartiment ouvert sur l'extérieur. Des mesures de températures sont réalisées à l'intérieur du compartiment au niveau du linteau et à l'extérieur le long de la façade dans l'axe des ouvertures. Ce bûcher mobilisé dans la volumétrie définie par le protocole est dimensionné pour fournir *a minima* sur les 20 ou 30 premières minutes, une température dans la chambre à feu comparable à la température du programme thermique ISO 834 utilisé dans les fours de résistance au feu.

La figure ci-après montre une façade avant et pendant l'essai. On peut voir la position des arbres de mesure de température devant chaque ouverture ainsi que la position des deux bûchers à l'intérieur du compartiment.

Les dimensions de la façade testées sont de 5.0 m de large et environ 7.5 m de haut. Le comportement de la façade est alors évalué au minimum durant 30 minutes. La puissance du feu est à son maximum en 5 minutes seulement ce qui correspond à des flammes dépassant ponctuellement l'amorce du niveau R+2.

Conformément au protocole, si après ces 30 minutes le feu n'a pas atteint l'allège du niveau N+2 et que l'étanchéité au nez de dalle du niveau N+1 est assurée, alors le système de façade étudié est considéré conforme aux exigences réglementaires.

Les résultats obtenus à l'issue de l'essai permettent de valider ou non le bon comportement de la solution constructive testée et son aptitude à limiter la propagation du feu.

La validation de la configuration retenue s'appuie le plus souvent sur la réalisation de quelques essais de réaction au feu des matériaux constitutifs ou de simulations numériques, voire à des essais d'orientation à échelle intermédiaire, puis à un ou plusieurs essais LEPIR2 pour valider les solutions retenues.



Figure A3.3 : 06 min



Figure A3.6 : 30 min

Figure 23 Plateforme d'essai LEPIR2 (CSTB/FCBA)

La réalisation d'un essai LEPiR 2 dans un laboratoire agréé nécessite la création d'une façade complète de deux niveaux pour un coût élevé d'environ 50 k€ par configuration de façade. Le recours à la modélisation numérique du comportement au feu des façades trouve alors son sens afin d'optimiser les coûts d'essais pour les industriels et réaliser des simulations d'orientation sur différentes configurations de façades.

Du point de vue Européen ou international, il n'y a pas à ce jour de consensus quant à un protocole d'essai commun visant à évaluer la sécurité incendie relative aux façades d'ouvrages. Toutefois des travaux d'harmonisation sont en cours au niveau européen [12] et international [13].

5.1.3 Ingénierie de la réaction au feu

L'Ingénierie de réaction au feu est restée très en retrait par rapport à l'ingénierie de résistance au feu et l'ingénierie de désenfumage suivant les arrêtés du 22 mars 2004, ces deux dernières ayant connu un très fort développement ces 15 dernières années.

Cet état de fait répond à une certaine logique : le coût d'un essai à petite échelle en réaction au feu est généralement bien inférieur au coût d'une évaluation par modélisation avancée

Il reste également à ce jour difficile de restituer toute la complexité de la réaction au feu d'un matériau, a fortiori lorsque celui-ci est composé de plusieurs couches de matières différentes, et lorsqu'il présente des détails d'état de surface difficiles à modéliser finement et présentant pourtant des effets non négligeables sur sa réaction au feu.

Il faut cependant préciser que la modélisation de la réaction au feu peut présenter un intérêt certain toutefois dans des contextes plus indirects, par exemple :

- **Outil d'aide à la décision et d'optimisation de plan d'expérience sur les essais à plus grande échelle et donc plus coûteux (essais feux à façon, campagnes SBI, campagne LEPiR2...)** ;
- **Outil intermédiaire de transfert entre des essais de réaction au feu et une étude d'ingénierie de sécurité incendie à grande échelle ;**
- **Outil intermédiaire de transfert entre des essais de réaction au feu et une étude de reconstitution de sinistre incendie à grande échelle.**

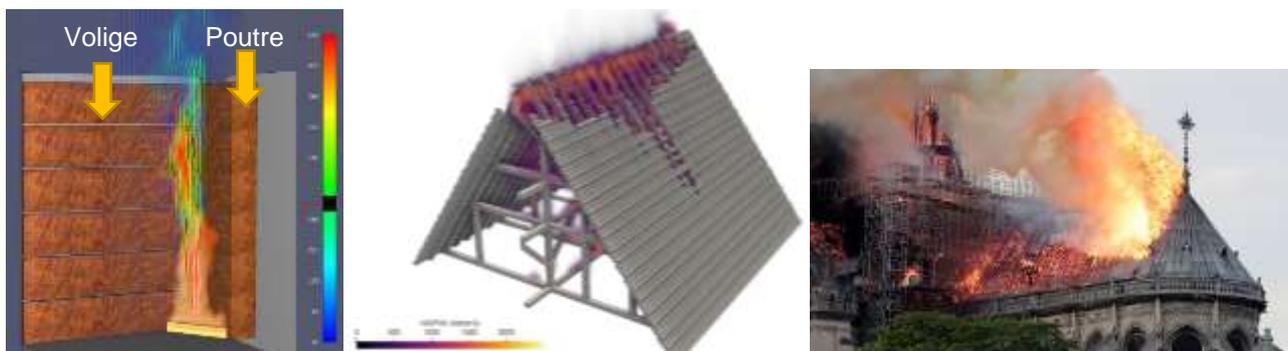


Figure 24 Exemple de lien entre la modélisation de la réaction au feu au dispositif SBI et l'application sur un sinistre grande échelle (extrait d'un mémoire technique CERIB/LISI/SETEC/FCBA en réponse au cahier des charges relatifs à la reconstitution numérique et expérimentale partielle de l'incendie de Notre-Dame)

5.1.3.1. Ouvertures réglementaires

On peut identifier plusieurs ouvertures réglementaires en matière d'Ingénierie de la réaction au feu. Les ouvertures réglementaires à l'ingénierie de la réaction au feu à ce jour majoritairement indirectes :

- **Art 105 de l'arrêté de 86** sur l'habitation avec une ouverture très contraignante très peu utilisée ;
- **Partie III du guide des isolants combustibles en ERP via l'article AM8** : quelques études sont réalisées ;
- **Article 15 arrêté 22 mars 2004** (cas de recours à l'ingénierie du comportement au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages) : avis sur base d'étude ISI possible ;
- **Article 5.3 de l'IT 249** : Appréciation de laboratoire(s), et avis de façade suivant Annexe 3 de l'arrêté d'aout 2019 en habitation : étude ISI réaction/résistance possibles ;
- **Loi LCAP toujours en vigueur jusqu'au 7/7/23** (« permis de faire » : possibilité de dérogation à titre exceptionnel pour une durée de 7 ans des règles en vigueur (sécurité incendie et accessibilité pour l'instant) pour la réalisation d'équipements publics et de logements sociaux)
- **Loi ESSOC** : la deuxième ordonnance est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2021 par le décret n° 2021-872. Généralisation du « permis de déroger/d'expérimenter », via un recours aux solutions d'effet équivalent (SEE) qui devront être justifiées par des attestations de respect des objectifs (ARO), produites par des organismes reconnus compétents (ORC) à fournir aux organismes tiers agréés.
L. 112-9/R. 112-4 - délivrance de l'attestation de respect des objectifs par les organismes notifiés en résistance et les organismes reconnus compétents en désenfumage (pas en réaction au feu à ce stade, cela en attente de publication d'un arrêté interministériel qui prévoit de définir les futures modalités d'accréditation des organismes dans le domaine concerné par la solution d'effet équivalent ce qui devrait impliquer d'autres domaines potentiels...)
- **Référentiels en cours d'élaboration** (notes ADIVbois/JO2024) qui peuvent être exploités comme référentiels de droit souple (Art. R123-13 en ERP) voire même se voir imposés comme base de doctrines locales.

5.1.3.2. Applications potentielles en ISI

Les applications potentielles de l'ingénierie de réaction au feu au sein de démarches d'ingénierie de sécurité incendie (ISI) sont possibles dès qu'un niveau d'information à petite échelle est nécessaire pour des applications à plus grande échelle, notamment dans les approches ISI suivantes :

- Ingénierie du comportement au feu des façades ;
- Ingénierie de sécurité incendie des bâtiments structure bois ;
- Reconstitution de sinistres.

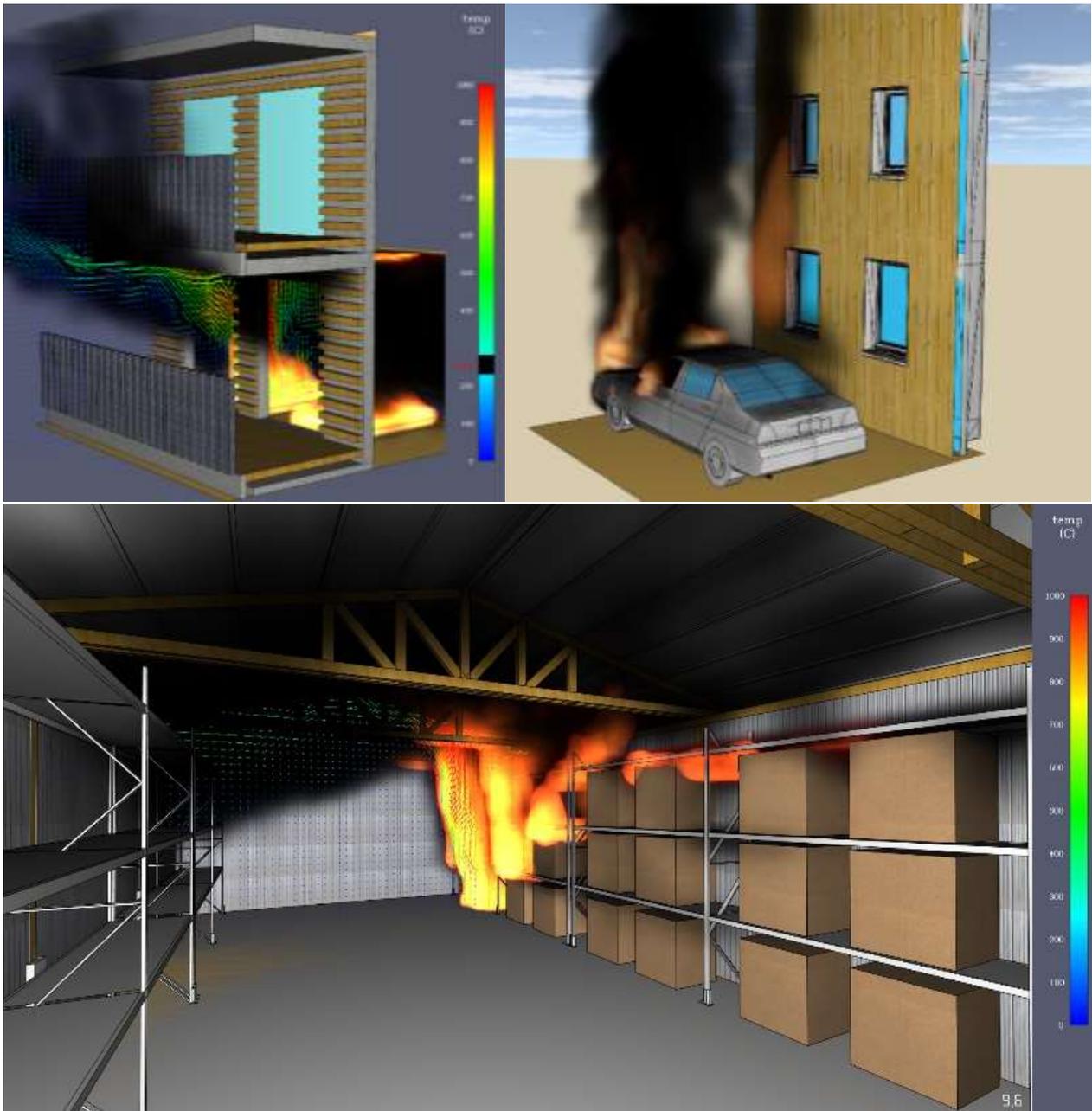


Figure 25 Contextes d'application potentielle de l'ingénierie de réaction dans le cadre d'approches ISI

5.1.4 Approches de modélisation existantes

Comme précisé en remarque liminaire de cette section, il est important de replacer les travaux de cette étude parmi les différentes approches existantes en matière de modélisation du terme source en situation d'incendie. On dénombre ci-après quatre types d'approche ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs. Il est précisé que ces modèles se rapportent spécifiquement au code de calcul FDS (cf. §5.2.1.1 p40) utilisé dans l'ensemble de cette étude de maturation, toutefois ces approches sont déclinables pour d'autres codes de calculs incendie moins courants.

5.1.4.1. Approche prescrite

C'est le cas le plus simple. L'utilisateur *définit à l'avance* le développement des foyers d'incendie et leur décroissance en fonction de la quantité de combustible et/ou de la quantité de comburant disponible.

Avantages : Il s'agit de l'approche la plus rapide à mettre en place et à calculer basé sur le modèle de fraction de mélange (sous le logiciel FDS : mixture fraction model [14]) avec la possibilité d'intégrer directement un foyer basé sur un résultat d'essai ;

Inconvénients : la propagation n'est pas prise en compte, il n'y a pas d'adaptation automatique en cas de sous-ventilation, et l'approche est approximative (modèle de fraction de mélange).

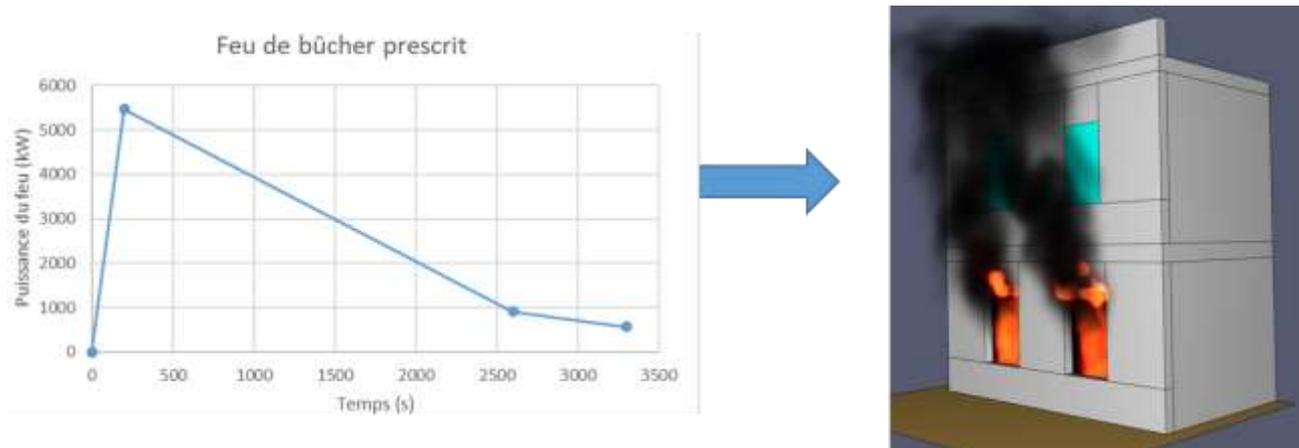


Figure 26 Exemple d'approche prescrite

5.1.4.2. Approches mixtes par flux critique

Dans ce cas des sous-ensembles de systèmes sont définis par des foyers prescrits, dont l'allumage est piloté par une condition de flux thermique critique.

Avantages : Permet une prise en compte simple de la propagation permettant une grande rapidité du calcul via le modèle de fraction de mélange. L'adaptation au niveau de flux facilite l'approche des feux d'éléments bois massifs (structures) et l'auto extinction du bois apparent dans les locaux qui sont des sujets d'étude actuels.

Désavantages : Peut être assez contraignant à configurer pour des systèmes complexes, il n'y a pas de possibilité de prendre en compte des petits détails constructifs, l'approche est également assez approximative (modèle de fraction de mélange).

La figure ci-après illustre le modèle de base utilisé ainsi qu'une application restituée dans le cadre de travaux de l'**atelier incendie** de l'association **AdivBois**^{xiv}. Il s'agit d'une étude paramétrique des conditions d'auto-extinction du bois structural dans un local, l'étude ayant notamment abouti à l'application pour un élément bois apparent d'un modèle de surfaces débitantes qui s'adaptent au niveau de flux ambiant selon une corrélation empirique.

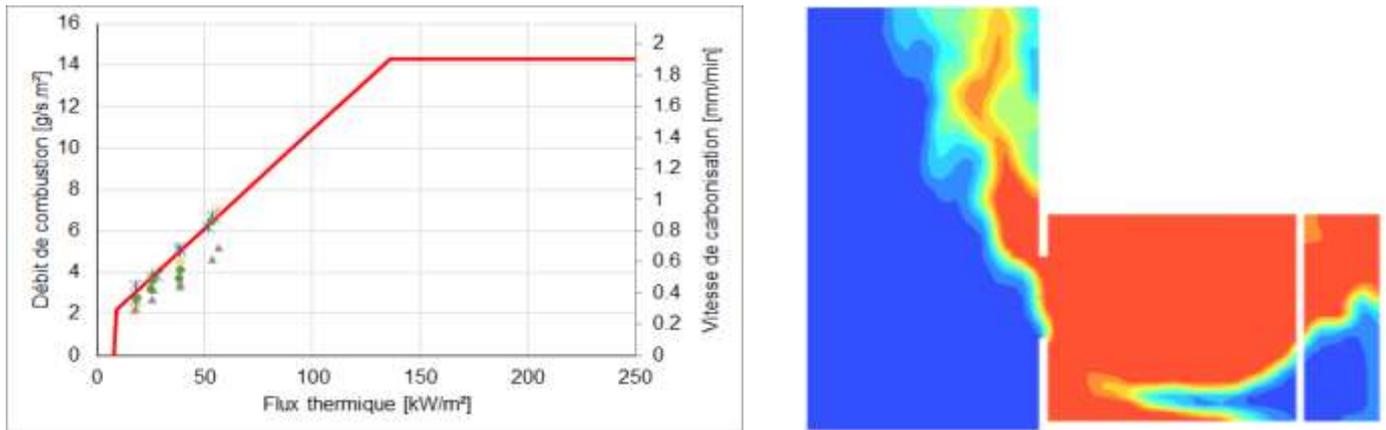


Figure 27 modèle de débit de combustion en fonction du flux radiatif incident, application au cas de l'étude de l'auto extinction du bois apparent dans un local

5.1.4.3. Approches mixtes par température d'ignition

Dans cette approche, des sous-ensembles de systèmes sont définis par des foyers prescrits, dont l'allumage est piloté par l'atteinte d'une condition de « température d'ignition » appliquée à un solide.

Avantage : Permet la prise en compte de la propagation et la rapidité du calcul (modèle de fraction de mélange), et l'implémentation est facile sous FDS ;

Désavantage : Il n'y a pas d'adaptation au niveau de flux (une cellule enflammée brûlera complètement même si le flux incident diminue), il n'y a pas d'adaptation en cas de sous-ventilation, l'approche est également assez approximative (modèle de fraction de mélange).

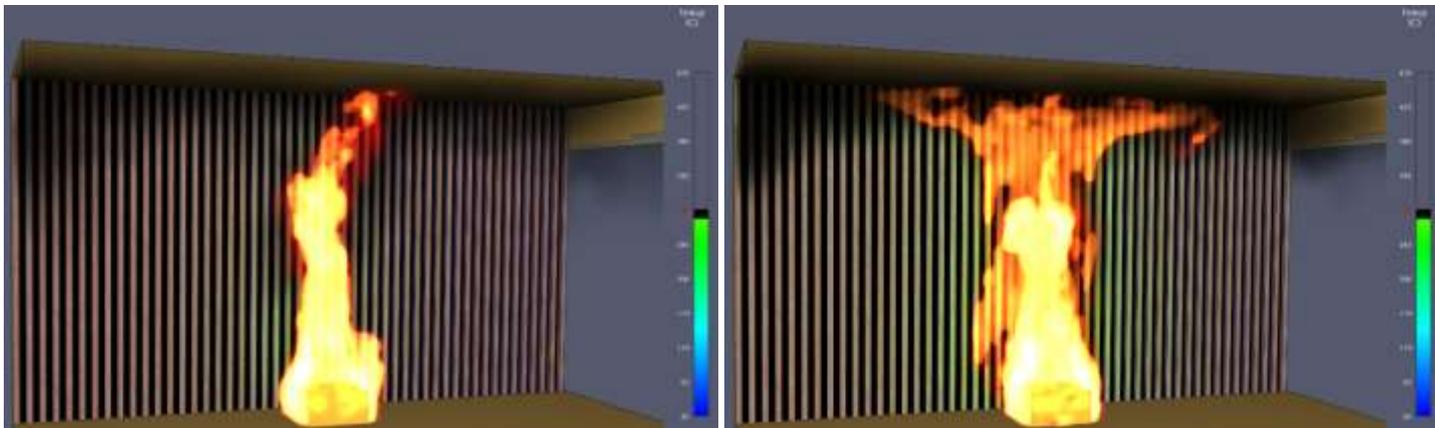


Figure 28 Exemple d'un feu de parement bois à claire-voie à partir d'un foyer prescrit de 750 kW.

5.1.4.4. Approche par calcul de pyrolyse

Il s'agit ici d'une approche avancée non prescrite, basée sur un transport d'espèces réactives plus variées, et affranchie de nombreux paramètres empiriques (dont la température d'ignition).

Avantage : Il s'agit d'un modèle de décomposition thermique à plusieurs étapes plus réaliste, avec une meilleure prise en compte de la propagation, mieux adapté à la prise en compte de petits détails constructifs, et mieux adapté aux conditions de flux et de ventilation variables.

Désavantage : cette approche peut être très coûteuse en temps de calcul, avec la nécessité de très bien définir les matériaux et donc plus difficile à adapter aux matériaux complexes, non homogènes. En figeant la plupart des paramètres empiriques, le calage d'une simulation sur un essai de référence pour envisager une approche paramétrique sera plus complexe.

5.1.5 *Approches par pyrolyse : freins à lever*

Les approches par pyrolyse sont aujourd'hui peu utilisées en ingénierie de sécurité incendie, principalement en lien avec les freins suivants :

- La définition des paramètres cinétiques de la loi d'Arrhenius nécessite des moyens expérimentaux qui ne sont pas à la portée de la plupart des bureaux d'étude.
- Chaque espèce (réactif ou produit de combustion inerte) exige la résolution d'une équation de transport d'espèce supplémentaire, ce qui induit des temps de calculs plus importants.

Toutefois sur des situations complexes ou l'on s'attend à une variété de combustibles ainsi qu'à des dynamiques d'extinction et de ré-inflammation non prévisibles – ce qui est le cas des façades - cette approche montre tout son intérêt.

Il conviendra donc lors de la phase de maturation de vérifier si les freins évoqués constituent un obstacle à la faisabilité de l'étude.

5.2 Phase de maturation

Cette section détaille les actions de valorisation qui ont pu être menées sur la base des modèles fournis en phase de ressourcement. Après une présentation des outils mis en place, les différents dispositifs modélisés dans le cadre de cette phase sont présentés.

5.2.1 Mise en place et prise en main des outils

5.2.1.1. Code de calcul FDS – interface Pyrosim

Le code de calcul FDS (Fire Dynamics Simulator^{xv}) développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) a été utilisé dans ce contexte. Ce code est brièvement décrit en annexe page 54. Il s'agit d'un code gratuit et open-source versé dans le domaine public. Ce code intègre une interface de visualisation 3D simple mais performante SMOKEVIEW.

L'interface Pyrosim® développée par la société Thunderhead Engineering est un logiciel sous licence commerciale permettant de faciliter grandement l'emploi du code de calcul FDS :

- Import de géométries 3D et dessin CAD intuitif ;
- Facilite la mise en place de bibliothèques de matériaux et de scénarios incendie ;
- Facilite la mise en place, la manipulation et la transformation en série de structures répétitives (capteurs, obstructions,...) ;
- Offre une interface de visualisation de résultats améliorée par rapport à l'interface SMOKEVIEW.

5.2.1.1. Mise en place de moyens de calcul

Bien que très performant par rapport à d'autres codes de mécanique des fluides courants, le code de calcul FDS, utilisé sur des configurations réalistes avec des maillages suffisamment précis, aboutit à des simulations dépassant de loin les capacités d'un ordinateur personnel courant.

Les besoins du code FDS sont principalement liés au nombre de processeurs logiques disponibles (du fait des deux outils de parallélisation utilisables à savoir MPI et OPEN MP), à la taille de la mémoire vive et en moindre mesure à la vitesse du processeur.

Un ordinateur portable réputé performant présente aujourd'hui de 4 à 8 threads (8 processeurs logiques permettant 8 calculs indépendants simultanés dont il faut soustraire ceux nécessaires à l'exécution des autres tâches habituelles), pour une mémoire vive de 8Go à minima (à laquelle il faut soustraire la mémoire vive nécessaire à l'exécution des autres tâches habituelles). On se rend compte que ce type de machine ne permet que des calculs de petite taille.

En l'absence de moyens de calcul opérationnel, a été mis à disposition fin 2020 une machine virtuelle hébergée sur un serveur FCBA (Xeon® E5-2630 v2 : 32 Go RAM, 8 threads) qui permettait de réaliser des premiers tests sans mobiliser une machine individuelle. Ceci permettait d'ouvrir à des calculs de taille plus importante mais le faible nombre de processeur ne permettant pas de diviser massivement le domaine de simulation pour la parallélisation, les calculs se sont révélés trop lents à l'usage.

En réponse à cette situation une station de travail puissante a été commandée et mise en place mi-mai 2021. Il s'agit d'une configuration biprocesseur Xeon 4210R 2.40GHz déca-core offrant au total 40 threads et 64 Go de mémoire vive. Cette machine susceptible de supporter un ou deux calculs de taille importante, en complément des moyens précédents, a permis d'accélérer la maturation et d'envisager d'éventuelles prestations modélisation au service des activités privées et collectives.

5.2.1.1. Mise en place de moyens humains

Dans la perspective d'un développement de l'activité modélisation et dans le but de pouvoir finaliser la phase de maturation, l'expert feu FCBA bénéficiant déjà d'une expérience antérieure de 10 ans sur l'utilisation du code FDS sur des ouvrages de grande taille a pu former l'ingénieur FCBA en charge du suivi du projet à l'utilisation du code FDS et de l'interface Pyrosim.

5.2.2 Mise en place et optimisation d'une configuration SBI

Comme mentionné précédemment, il est primordial en matière de modélisation incendie de s'appuyer sur des configurations expérimentales approchantes dès que cela est possible.

Cette section concerne la mise en place d'un modèle numérique du dispositif SBI suivant la norme d'essai européenne [15]. Ce dispositif consiste à soumettre une éprouvette verticale formant un dièdre droit à une sollicitation thermique provoquée par un objet isolé en feu. Il permet de produire un classement européen en réaction au feu du système (le matériau exposé et son support) compris entre A2 et D

5.2.2.1. Mise en place du modèle

La figure suivante présente le modèle mis en place en vue éclatée permettant d'en distinguer les principaux éléments. Il s'agit d'une salle fermée munie de deux fenêtres d'observation, d'une porte d'accès à gauche, et à droite d'une baie d'insertion du corps d'épreuve. Ce dernier est disposé sur un chariot lequel est poussé à travers la baie qui est fermée hermétiquement en partie haute. Une seule amenée d'air est aménagée en partie basse de la baie d'insertion.

Le corps d'épreuve est ainsi placé sous une hotte d'extraction des gaz de combustion instrumentée. Au début de l'essai un brûleur pilote à propane non représenté est démarré pour vérification du débit de gaz, puis une bascule est faite sur le brûleur triangulaire situé en partie basse du dièdre formé par le corps d'épreuve.

L'instrumentation de l'évacuation permet une mesure de la concentration de gaz (O₂, CO₂), de la température, et de l'opacité des fumées. Le principe de la calorimétrie permet, via une mesure de l'oxygène consommé, d'en déduire la puissance dégagée (taux de dégagement de chaleur instantané). L'ensemble de cette instrumentation a été intégré dans le modèle.

Le dégagement de chaleur instantané et intégré, ainsi que l'opacité des fumées instantanée et intégrée permettent d'en déduire un classement de A2 à D et un classement complémentaire s (smoke :fumée). La chute d'éléments enflammés sur le chariot pour le classement d (drop : gouttes/objets enflammés) n'est pas prise en compte dans la modélisation.

En condition d'essai un débit d'extraction de 0.575 m³/s, une amenée d'air à pression atmosphérique et une température de laboratoire de 20°C sont intégrés en données d'entrée.

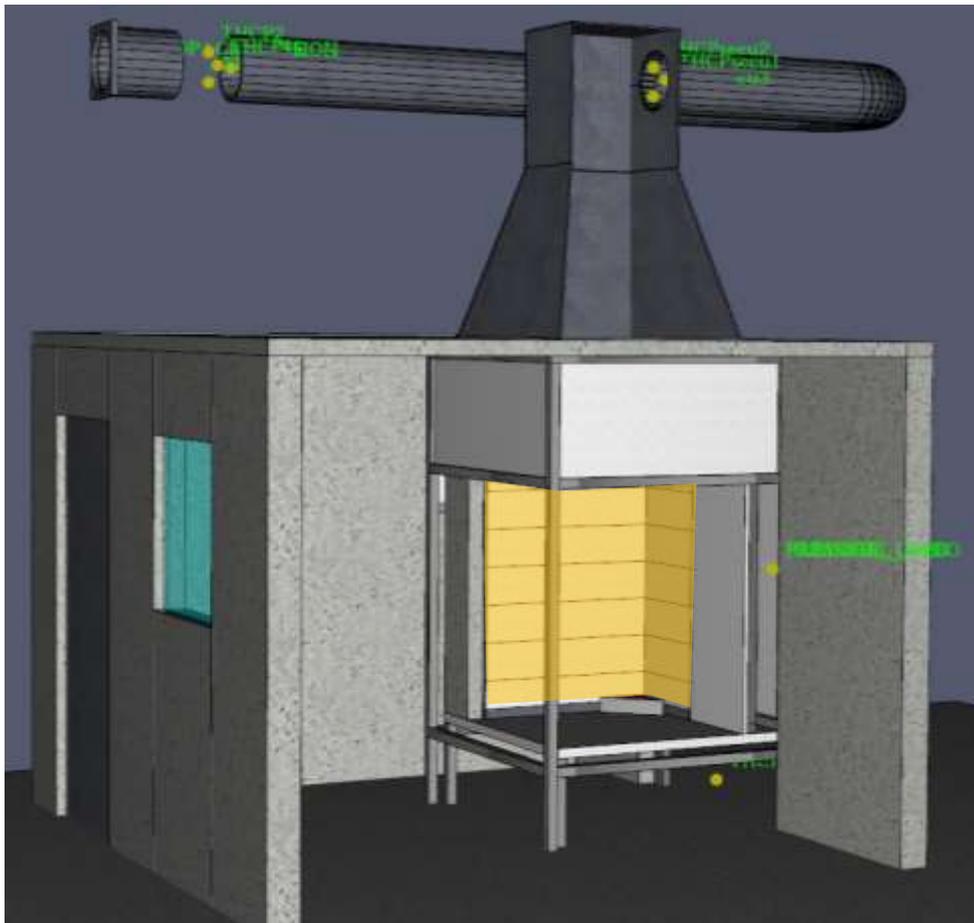


Figure 29 Configuration de l'essai SBI, corps d'épreuve en jaune

Le maillage utilisé est présenté sur la figure suivante. La zone de développement du feu et la zone d'extraction qui sont soumises aux plus fortes vitesses et gradients d'écoulements sont en maillage fin (2 cm), une première couche de maillage périphérique est en maillage intermédiaire (4 cm) tandis que la deuxième couche de maillage périphérique est en maillage grossier (8 cm).

Ces valeurs sont à comparer avec la puissance potentielle minimum et maximum du foyer, à savoir respectivement 31 kW dans le cas du brûleur seul et 350 kW en instantané ce qui correspond à un critère d'arrêt prématuré de l'essai. La gamme de précision de maillage minimum recommandée par le guide utilisateur du code FDS [14] est reportée dans les deux cas dans le tableau suivant :

Puissance du foyer	31 kW	350 kW
Maillage fin (cm)	1.50	3.97
Maillage grossier (cm)	6.02	15.86
Maillage de la zone (cm)	4	

Tableau 5 : Vérification de la précision du maillage par rapport aux recommandations du NIST

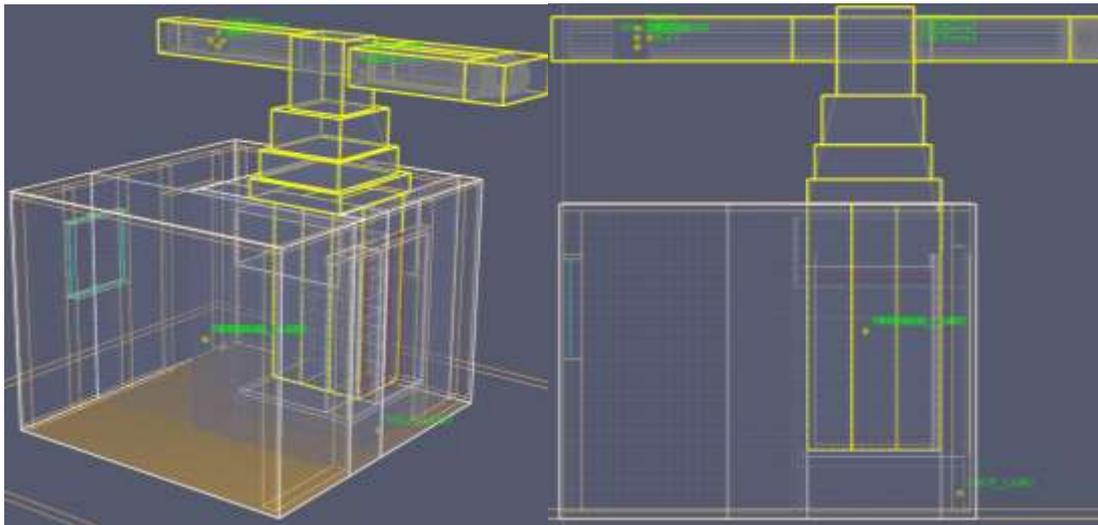


Figure 30 Configuration de l'essai SBI, maillage utilisé

On remarque que pour un petit foyer (31 kW) on trouve avec 4 cm une qualité de maillage qualifiée d'intermédiaire et pour le foyer maximum (350 kW) la qualité de maillage est qualifiée de fine, donc les valeurs choisies sont compris dans les standards d'acceptation sans être sur-qualitatifs.

La taille globale de maillage obtenu est de 629 000 mailles ce qui rend le calcul envisageable sur une station de calcul modeste.

5.2.2.2. Calibration du SBI

Pour calibrer le SBI il est opportun de s'appuyer sur l'étape de calibration dit de « blanc-fumée » qui permet d'obtenir des mesures avec le brûleur seul avec un corps d'épreuve incombustible constitué de plaques de silicate de calcium. La modélisation de l'essai à vide a permis de restituer des vitesses d'extraction conforme à la consigne. Dans le temps imparti l'ajustement de l'ensemble des paramètres de mesure aux résultats expérimentaux n'a pas encore été finalisé, à savoir le réglage de la puissance du foyer et donc de la consommation d'oxygène consécutive trop élevées, ainsi que sur les pertes thermiques dans le système d'extraction qui ont pu être sous-estimées d'après les différences de température entre le modèle et l'expérimentation.

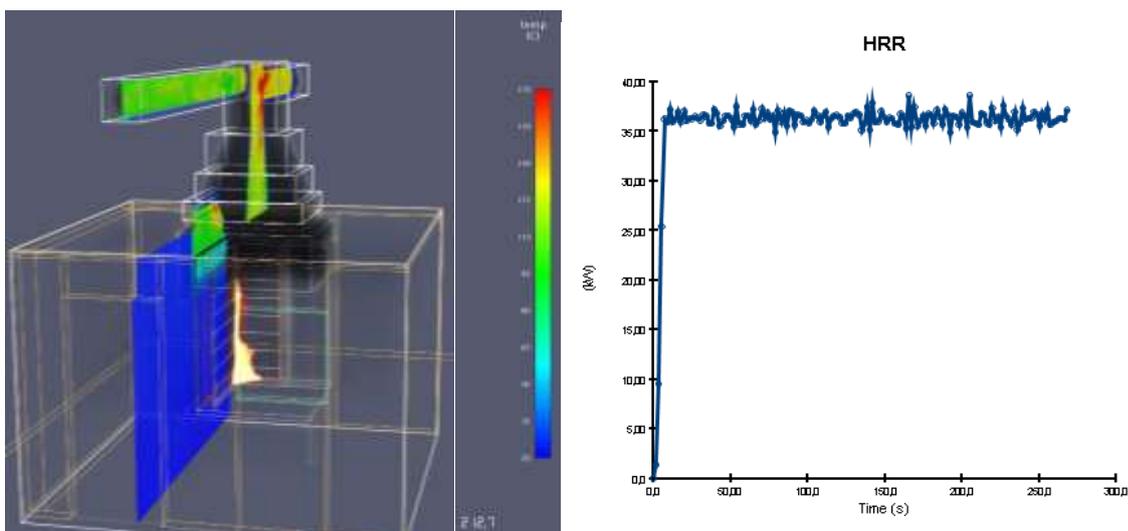


Figure 31 Modélisation d'un essai à vide sur plaque de silicate, puissance du foyer

5.2.2.3. Test sur un parement combustible

Afin de tester les capacités du modèle SBI sur un parement combustible avec le nouveau modèle de pyrolyse, un parement de douglas en 18 mm a été testé. La figure ci-après représente le départ du calcul avec la propagation le long du parement. Le foyer de départ légèrement plus puissant que la consigne peut expliquer une propagation plus importante qu'attendu, mais on observe ici une conséquence du modèle qui à petite échelle semble confirmer la surévaluation de la propagation déjà évoquée dans le cadre de la conclusion de la phase de mise en place du modèle.

Dans ce cas présent la puissance développée après 1 minute 30 s s'approche d'une condition d'arrêt de l'essai ce qui n'est pas représentatif du comportement type du douglas de cette épaisseur. Cette configuration permet toutefois de faire un constat intéressant concernant la dynamique de propagation. Il apparaît que la montée en température de surface du parement suit de très près la dynamique du panache de flammes ce qui se traduit par un échauffement quasi instantané de la surface à une température supérieure à 200°C au contact de la flamme. Il semble de l'avis des experts FCBA que l'inertie thermique du parement bois soit possiblement sous-évaluée.

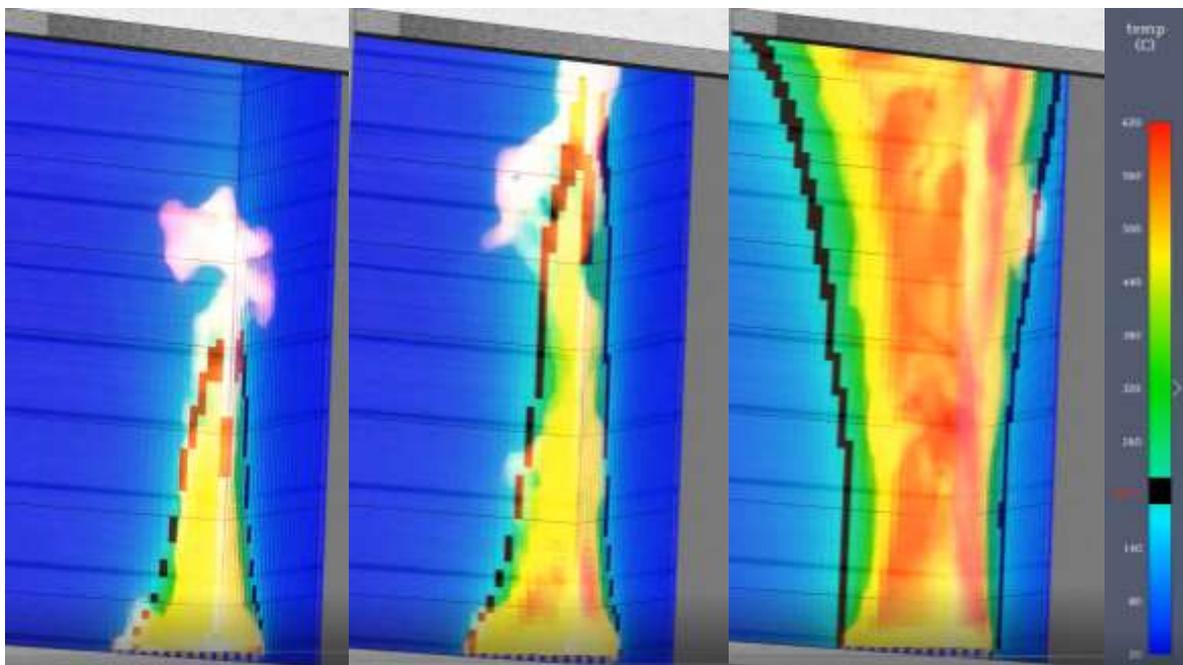


Figure 32 Modélisation SBI sur un parement de Douglas 18 mm à 12 s, 21 s et 90 s

On peut donc envisager à ce stade que cette sous-évaluation soit en partie liée à un problème de transfert thermique de la flamme vers la paroi, transfert qui peut être modulé à travers une étude de sensibilité.

Le présent calcul sans optimisation a permis d'obtenir 2 minutes de temps réel pour un temps de calcul de 32 heures. Ce même calcul serait plus rapide en absence de l'emballement thermique observé, sachant que chaque cellule impliquant une réaction de combustion induit une augmentation en temps de calcul.

5.2.2.4. Pistes d'optimisation

Ce modèle de dispositif SBI est une première approche visant à restituer fidèlement l'ensemble du moyen d'essai. Une piste d'amélioration à venir consistera à finaliser la fiabilisation du résultat à vide, et du résultat d'un parement aux performances connues.

Sur cette base il sera possible de corrélérer les valeurs mesurées directement à la base de la hotte et en périphérie du corps d'épreuve.

Cette corrélation permettra par la suite de réduire au maximum le domaine de calcul et son instrumentation pour obtenir un modèle plus performant qui permettra également d'ajouter une couche de maillage mieux définie visant à capturer des détails constructifs plus fins (joints de bardage, parements à claire-voie avec écarts spécifiques,...).

5.2.2.5. Synthèse : faisabilité et pistes d'amélioration

Le modèle SBI associé au nouveau modèle de pyrolyse développé pour le Douglas montre que des simulations sont réalisables avec une station de calcul dédiée sous des délais acceptables, et permettraient, moyennant une optimisation du modèle, d'envisager des études paramétriques sur des systèmes réalistes.

Il est évident que le modèle devra à l'avenir être amélioré et adapté à de plus amples variétés d'essences mais l'avantage de ce modèle à présent opérationnel est de pouvoir s'adosser aux bases de mesures expérimentales au SBI et aux rapports d'essais réalisés au sein du laboratoire feu de l'IT FCBA.

Il est également envisagé d'équiper les essais pertinents avec des dispositifs complémentaires de mesure qui permettront de mieux appréhender les transferts de chaleur. On pense notamment à insérer des capteurs de températures à la surface des corps d'épreuve pour pouvoir corrélérer l'instant d'inflammation et la température de surface, ou bien à réaliser une thermographie infrarouge de surface avec des dispositifs adaptés.

5.2.3 Optimisation de la configuration LEPIR2

Pour rappel il était prévu lors de la phase de ressourcement d'appliquer le nouveau modèle de pyrolyse à l'étude d'un feu de façade bois de typologie LEPIR2.

Un calcul exploratoire a pu être réalisé en toute fin de projet, malheureusement la très grande taille du calcul (plus de 7 millions de mailles) et les moyens limités du laboratoire PPRIME et de l'entreprise DUORISK sur la fin du projet n'ont pas permis de faire aboutir le calcul ni a fortiori de réaliser une étude de sensibilité adéquate.

Aussi la mise en place de moyens de calculs supplémentaires mi-mai 2021 au sein de l'IT FCBA a permis de reprendre ce calcul pour réaliser son optimisation et évaluer la faisabilité d'une exploitation en local dans le cadre d'activités privées ou collectives.

On rappelle que la configuration de référence retenue à ce stade est un système de façade filante à ossature bois, avec écran thermique laine de roche et bardage en Douglas 26 mm avec obturation de lame d'air. Cette façade présente également la particularité de présenter deux parties distinctes, l'une avec un bardage vertical avec débord de déflecteur de 250 mm à gauche, l'autre en bardage horizontal avec débord de 150 mm à droite.

5.2.3.1. Calibration de la chambre à feu

Avant d'optimiser le maillage il est absolument nécessaire de maîtriser finement le terme source, à savoir le feu de bûcher. Dans l'étude initiale cette puissance avait été étudiée de façon paramétrique et avait permis l'identification d'un des foyer satisfaisant une température dans la chambre à feu du même ordre que la mesure en moyenne sur la durée d'essai.

Cette approche nous semble perfectible à plusieurs niveaux.

- D'une part la température de flamme restituée sous FDS peut être très différente de la température de flamme, quand bien même la puissance globale du feu serait en accord avec la puissance réelle. Ceci tient à l'échelle du phénomène, la température de flamme étant la résultante d'un phénomène local à toute petite échelle généralement non capturable par le modèle (on parle de « phénomène de sous-maille »). La valeur simulée est donc la résultante d'un « lissage » de la température de flamme à l'échelle de la maille. On trouve d'ailleurs le même phénomène à moindre impact concernant la température d'ignition d'un solide laquelle peut être très localement atteinte mais pas à l'échelle d'une maille de plusieurs centimètres.
- D'autre part la mesure expérimentale est elle-même à relativiser. Il se trouve que dans un four de résistance au feu un des organismes agréés utilise des dispositifs alternatifs aux thermocouples classiques pour pouvoir calculer directement ou indirectement une température réputée plus fiable dans un environnement soumis en permanence au contact de flammes, ce qui traduit un certain débat sur la question. Il est donc préférable à cette lumière de s'appuyer sur des mesures plus indirectes.

Une publication du laboratoire EFECTIS France [16] présente un intérêt particulier dans ce contexte pour rapporter des résultats d'essais LEPIR2 sur des façades totalement inertes (sans combustible en dehors du bûcher) ainsi que des résultats de modélisation en accord avec ces essais. Il nous a paru opportun de s'appuyer sur leurs résultats en commençant par fiabiliser le terme source.

La figure suivante détaille une configuration LEPIR2 « à blanc » sans façade combustible, ayant fait l'objet de calculs rapides de dimensionnement puis d'un calcul à l'échelle de la façade

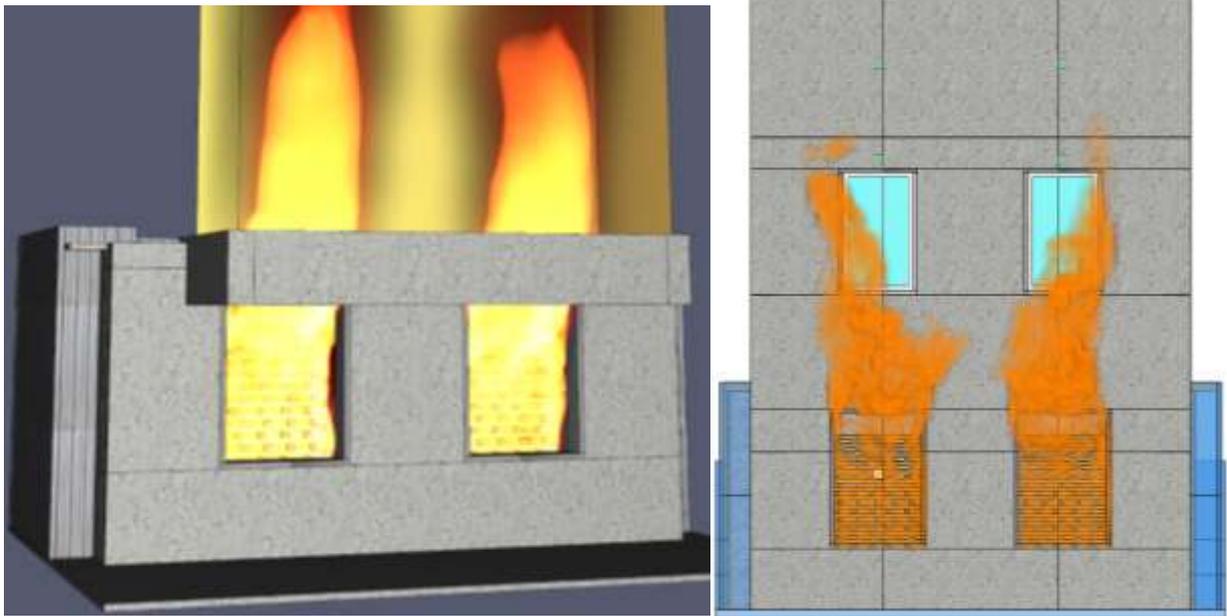


Figure 33 Modélisations paramétriques rapides de chambre à feu (à gauche) et vérification sur façade inerte (à droite) au maximum de puissance du feu de bûcher prescrit à $t=5$ min.

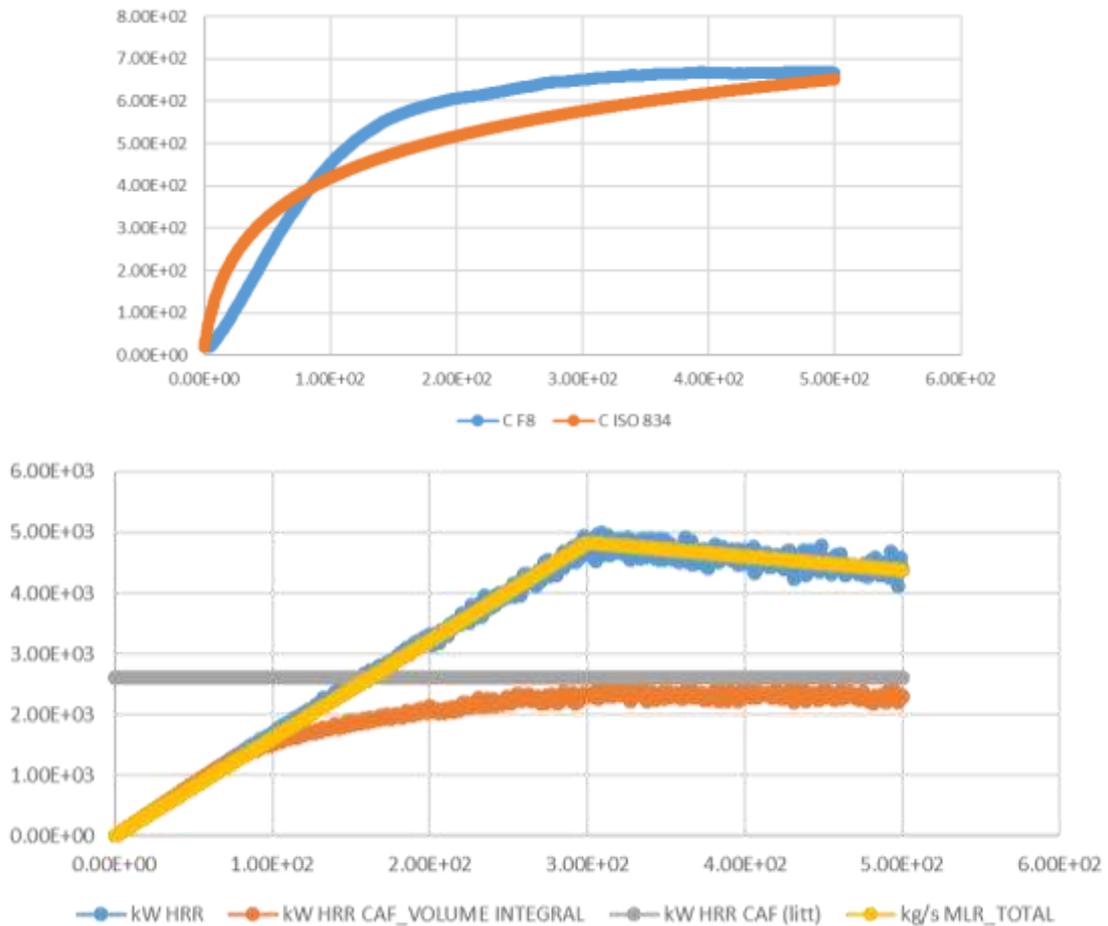


Figure 34 Température obtenue au centre de la chambre à feu comparée au programme thermique ISO 834 (en haut), répartition de la puissance du foyer entre la chambre à feu et la façade, en gris :niveau atteint dans la chambre à feu selon littérature [16] (en bas)

Les premières tentatives ont montré un niveau de puissance dans la chambre à feu très inférieur au niveau attendu, ce qui révèle une des difficultés spécifiques au code FDS.

De fait le foyer testé étant un foyer prescrit (surfaces débitantes prédéfinies autour d'un volume clos correspondant à la volumétrie du bûcher), il n'est pas tenu compte de la quantité d'oxygène disponible. En réalité lorsqu'un feu tend à s'étouffer, le rayonnement thermique ambiant diminue ce qui diminue l'effet de feedback sur le dégagement de gaz de pyrolyse par décomposition thermique. Dans le cas d'une simulation FDS avec foyer prescrit, le code continue de débiter des gaz de pyrolyse suivant la consigne initiale, même s'il ne reste plus d'oxygène mobilisable dans la chambre. Ceci se traduit par ailleurs par une réinflammation des gaz émis en excès à l'extérieur lorsqu'il se retrouve en contact avec l'oxygène, induisant une contribution non réaliste à la propagation du feu.

Il faut donc éviter d'opérer en situation de sous-ventilation laquelle n'est pas prise en compte de façon réaliste par le code FDS ce qui peut être assuré en ajustant la puissance prescrite par essai/erreur.

Pour limiter la sous-ventilation et augmenter la part de puissance dégagée dans la chambre, les foyers massifs en bloc qui pénalisaient la chambre de deux volumes au sein desquels une combustion est observée en réalité, ont été remplacés par un bucher plus ventilé plus proche du bûcher réel, tout en restant un foyer prescrit (pas de propagation calculée au sein du bûcher).

La Figure 34 ci-avant montre que ces ajustements ont permis d'aboutir à un foyer satisfaisant. La température dans la chambre à feu est proche de la consigne ISO 834 tel qu'imposé par le protocole LEPIR2.

L'absence d'une sous-ventilation non réaliste peut être vérifiée en comparant la courbe de dégagement de chaleur et la courbe de perte de masse par pyrolyse (voir figure du bas ci-avant, comparer les courbes bleue et jaune) pour contrôler que les courbes ne montrent pas de déphasage important.

Il est apparu par rapport aux résultats de la publication [16] que la puissance dégagée dans le volume de la chambre à feu était à présent d'un niveau analogue au niveau attendu, bien qu'un peu plus faible, ce qui est conservatif par rapport au volume de flammes en façade qui sera un peu plus important qu'attendu en réalité.

5.2.3.2. Optimisation du maillage

Obtenir la bonne volumétrie et la bonne vitesse d'éjection des flammes en façade permet d'ajuster au plus près les limites du domaine de calcul (on s'attache à éviter les pertes thermiques et les gros gradients de vitesse au niveau des limites du domaine de calcul).

L'analyse des champs de vitesse aux alentours du domaine permettent également de réduire la précision du maillage aux endroits sans passage de flammes et sans gradient de vitesse important.

Le maillage optimisé obtenu est présenté sur la figure suivante.

Les améliorations apportées ont permis de réduire la configuration initiale PPRIME de 7,8 millions à 1,2 millions de mailles.

L'amélioration consécutive du temps de calcul a permis d'obtenir un délai d'une semaine pour obtenir 20 minutes de temps réel sur la station de calcul FCBA.

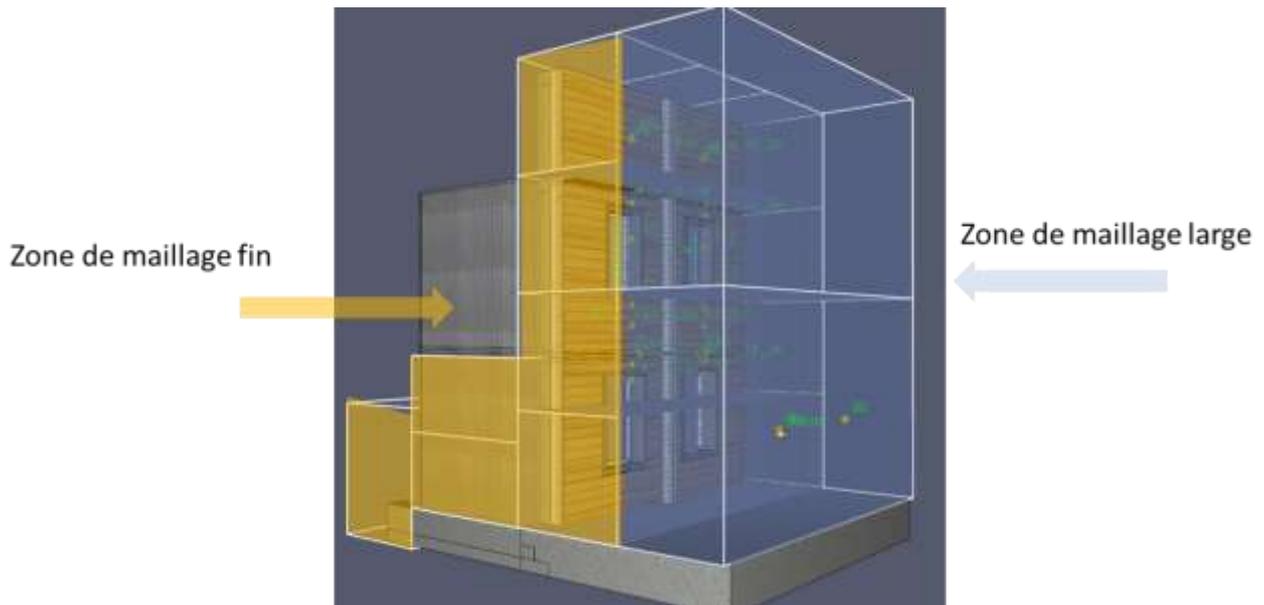


Figure 35 Zones de maillage optimisé du modèle LEPiR2

5.2.3.3. Evaluation du modèle sur façade combustible

Le modèle de bûcher qui a été progressivement amélioré a été testé sur la configuration de l'essai filière n°6 (façade Douglas 26 mm). Les résultats de modélisation de cet essai avec le modèle de bûcher le plus abouti ne sont pas encore disponibles.

Le calcul le plus abouti obtenu avec une version précédente du bûcher est illustré sur la figure suivante pour une durée de 18 minutes de temps réel.

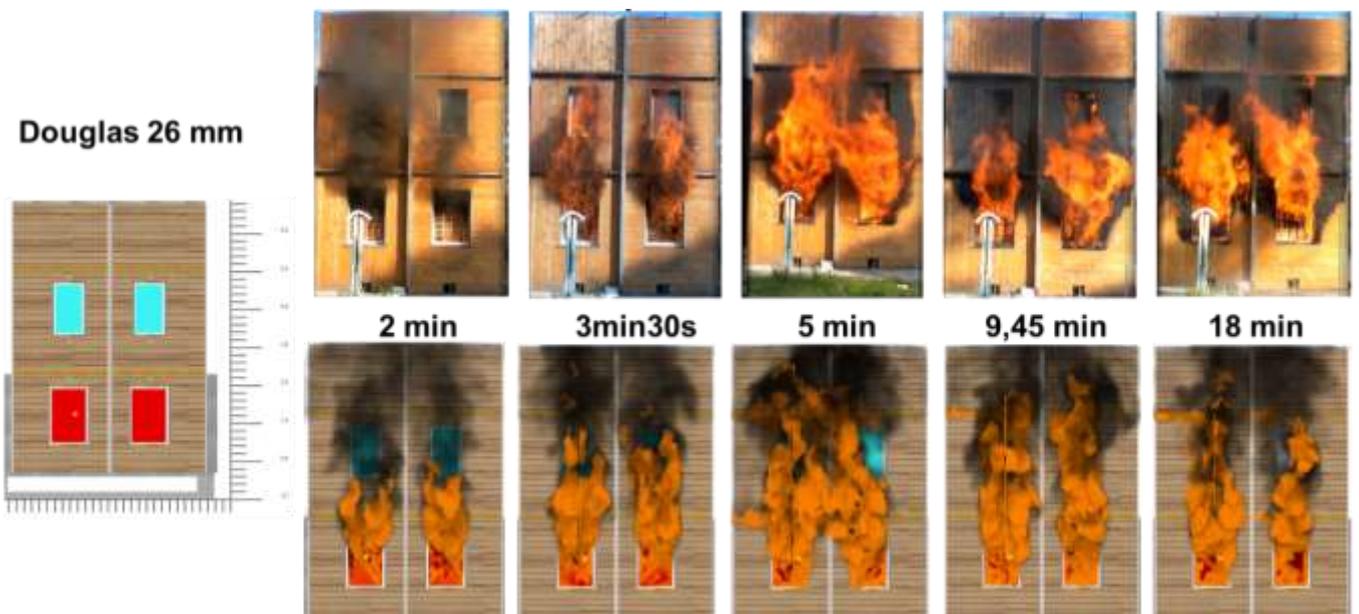


Figure 36 Premiers résultats LEPiR2 avec le nouveau modèle Douglas.

Les résultats obtenus sont assez encourageants par rapport aux résultats de l'étude préliminaire. Une inflammation de l'allège sur quelques minutes est observée au moment du pic de puissance à $t=5$ minutes, ce qui est encore trop prématuré par rapport à l'essai (inflammation fugace à 18 min), mais l'inflammation n'est que temporaire et sur le reste de la simulation seule la sous face du déflecteur supérieur est en feu tandis que l'allège reste intacte.

Il faut toutefois relativiser sur cette analyse macroscopique qualitative. Les calculs associés à un bûcher amélioré devront être analysés avec soin et comparés aux mesures en façade dès que les résultats seront disponibles.

5.2.3.4. Synthèse : faisabilité et pistes d'amélioration

A la fin de cette étude les résultats obtenus ne remettent pas en question la possibilité d'une exploitation plus concrète du modèle, et voient même une potentielle amélioration des résultats obtenus à l'échelle LEPIR2.

Par ailleurs les calculs SBI et LEPIR2 associés au nouveau modèle de pyrolyse montrent que des calculs pour des études privées ou collectives sont tout à fait envisageables sur une machine performante au sein de l'IT FCBA.

Toutefois il est encore possible d'améliorer le temps de calcul en essayant de focaliser l'attention sur une partie d'intérêt. Cette démarche est relativement ambitieuse car elle demande une restitution parfaite des sollicitations thermiques incidentes, qui seraient appliquées à une zone très bien détaillée du point de vue des détails constructifs à évaluer

Il reste que parmi les deux premiers modèles évalués le modèle Douglas semble le plus proche de la réalité mais il doit encore faire l'objet d'analyses de sensibilité plus poussées. Ces analyses viseraient à établir si les écarts observés à grande échelle sont uniquement dus au nouveau modèle de pyrolyse, ou si l'effet de la définition trop approximative du terme source associée à des transferts thermiques pas totalement maîtrisés contribue significativement à l'écart.

Des échanges sont aujourd'hui en cours avec l'Institut PPRIME pour établir une liste de données d'entrée pouvant faire l'objet d'une analyse de sensibilité sans s'écarter du champ validité du modèle de pyrolyse. Notamment l'émissivité du bois, le coefficient d'absorption de la phase gaz et la fraction radiative par défaut du code feraient l'objet de cette analyse à venir.

6. PERSPECTIVES

En plus des conclusions apportées aux phases de ressourcement et de maturation sur le projet Modélisation Feu Façade, cette section détaille les perspectives possibles d'exploitation ainsi que les développements qui semblent devoir faire l'objet d'études ultérieures pour conforter les perspectives.

6.1 Etude des possibilités d'exploitation

En Ingénierie de Sécurité Incendie (ISI), une importance équivalente doit être affectée tant à la qualité des modèles utilisés qu'à la méthodologie d'application de ces modèles. L'exploitation potentielle doit donc se faire à la lumière des différentes méthodologies utilisées en ISI.

6.1.1 *Rappel des différentes méthodologies en ingénierie de sécurité incendie*

3 types de méthodologies sont classiquement employés en ISI :

6.1.1.1. *Approche Paramétrique (P)*

On cherche à reproduire une situation au plus près, le plus souvent sur la base d'éléments expérimentaux de validation (essais SBI, essais LEPIR). Les inconnues sont bornées et intégrées en paramètres pour prise en compte en étude de sensibilité.

6.1.1.2. *Approche Conservatrice (C)*

On cherche à caractériser un système de façon sécuritaire par rapport à des objectifs de sécurité et des exigences fonctionnelles. Les inconnues sont donc fixées à une valeur jugée suffisamment conservatrice.

6.1.1.3. *Approche Relative (R)*

On cherche à obtenir une aide à la décision. Sur la base d'une simulation de référence jugée suffisamment fiable, des variantes sont simulées pour en étudier la pertinence.

6.1.2 *Applications potentielles du modèle PPRIME*

Le tableau suivant synthétise la pertinence des différentes approches en matière de modélisation du terme source, par rapport à différents types d'application.

Application→ Modèle de propagation ↓	Petite échelle / SBI (R)	Feu de local avec bois exposé (C)	Système poteau poutre exposé (C)	Portion de façade (R,C)	Façade complète (R,C,P)
Approche mixte/ température d'ignition	Éventuellement	oui selon ventilation	Oui	Éventuellement	Éventuellement
Approche mixte/ flux critique	non	oui	oui	non	non
Pyrolyse	oui	A déterminer selon taille et nature de la charge combustible	non	Probablement	Partie courante oui, Points singuliers à étudier

On pense que l'approche par pyrolyse est à même de compléter les approches existantes sur plusieurs applications. En terme de méthodologie, l'approche relative (R) est un débouché intéressant qui permettrait de faire varier plusieurs paramètres autour d'une configuration de référence bien maîtrisée, afin de fournir une aide à la décision sur des détails de conception. L'approche conservative (C) sera plus difficile à appliquer car le modèle de pyrolyse, comme on a pu le dire plus tôt, fige un grand nombre de paramètres d'entrées qui sans cela pourraient être réglés de façon conservative, l'argument étant également applicable au cas de l'approche paramétrique (P).

6.1.3 Perspectives de développement

Les perspectives de développement viseraient principalement les trois points suivants :

- Amélioration du modèle PPRIME pour une prise en compte moins pénalisante de la propagation ;
- Démarche de focalisation du modèle sur une zone très bien détaillée du point de vue des détails constructifs à évaluer, via l'intégration de sollicitations thermiques extraites au niveau de la zone de calcul détaillé ;
- Convention avec PPRIME pour enrichir la base de modèles avec des essences courantes (épicéa, mélèze, feuillu massif).

7. ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arrêté du 10 septembre 1970 relatif à la classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie, septembre 1970.
- [2] DGSCGC, Protocole relatif à l'essai LEPIR II complémentaire à l'arrêté du 10 Septembre 1970, juillet 2014.
- [3] Instruction technique n° 249, *Relative aux façades*, Arrêté du 24 mai 2010.
- [4] CSTB/FCBA, «Guide "Bois construction et propagation du feu par les façades" (Version 3.1),» décembre 2020.
- [5] *Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages.*
- [6] «Arrêté du 7 août 2019 modifiant l'arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation».
- [7] «Arrêté du 7 août 2019 relatif aux travaux de modification des immeubles de moyenne hauteur et précisant les solutions constructives acceptables pour les rénovations de façade».
- [8] D. / I. PPRIME, «Rapport de projet Feu de bâtiments en bois : étude multi-échelle de matériaux constitutifs de façades,» 30 avril 2021.
- [9] TORERO J.L., «Scaling-Up fire. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.09.007>,» *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(1), 99–124, 2013.
- [10] V. Babrauskas, «Ignition of Wood: A Review of the State of the Art,» *Journal of Fire Protection Engineering* 12(3):163-189, 2002.
- [11] Bibliographie Peuplier :, «Lovric et al., 2017; Słopiecka et al., 2012; Technoguide Du Peuplier : Le Peuplier Une Richesse Pour l'avenir, 2016; Wang et al., 2013».
- [12] RISE, EFECTIS, BRE, EMI, BAM, Liege Univ., «Assessment of fire performance of facades - Draft rev1,» 7 mai 2020.
- [13] «ISO 13785 - Essais de réaction au feu des façades — Partie 1: Essai à échelle intermédiaire / Partie 2: Essai à grande échelle,» 2002.
- [14] K. McGrattan, R. M. Dermott, S. Hostikka, J. Floyd et M. Vanella, Fire Dynamics Simulator (Version 6.7.6) - User Guide, NIST Special Publication 1019, 2021.
- [15] «NF EN 13823 - Essais de réaction au feu des produits de construction à l'exclusion des revêtements de sol exposés à une sollicitation thermique provoquée par un objet isolé en feu,» mai 2020.
- [16] Drean V. et al., «Numerical simulation of fire exposed facades using LEPIR II testing facility,» *Fire Technology*, 2018.
- [17] K. McGrattan, R. M. Dermott, S. Hostikka, J. Floyd et M. Vanella, Fire Dynamics Simulator (Version 6.7.6) - Technical Reference Guide VERIFICATION, NIST Special Publication 1018-2, 2021.
- [18] K. McGrattan, R. M. Dermott, S. Hostikka, J. Floyd et M. Vanella, Fire Dynamics Simulator (Version 6.7.6) - Technical Reference Guide VALIDATION, NIST Special Publication 1018-1, 2021.
- [19] «Arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement,» modifié par arrêté du 25 octobre 2013.
- [20] «Arrêté du 31 janvier 1986 relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation».
- [21] «Code de la construction et de l'habitation - Partie réglementaire - Livre Ier : Dispositions générales - Titre II : Sécurité et protection contre l'incendie».

8. ANNEXE 2 : CODE DE CALCUL FDS

Pour les démarches d'ingénierie de sécurité incendie se basant sur des modèles avancés, on distingue le code de calcul FDS (Fire Dynamic Simulator) développé par le NIST [14].

Fire Dynamics Simulator est un code de mécanique des fluides numériques et de « simulations aux grandes échelles » (Modèle de turbulence LES) pour des écoulements à faible nombre de Mach et orienté sur les phénomènes de transport de chaleur et de fumées dégagés en situation d'incendie).

Ce code intègre donc des modèles de turbulence, différents modèles de combustion, des modèles de rayonnement thermique ainsi que des lois d'états des gaz, qui permettent de restituer les phénomènes de développement de feu observés à échelle réelle.

Chacun des modèles implémentés fait l'objet d'un protocole de vérification [17], réalisé à chaque changement de version, par rapport à des solutions analytiques obtenues sur des configurations simples.

Le couplage de l'ensemble des modèles fait l'objet d'un protocole de validation [18], réalisé à chaque changement de version, basé sur un ensemble de cas réels ayant fait l'objet de mesures expérimentales.

Des dispositions spécifiques aux différents équipements concourant à la mise en sécurité incendie d'un ouvrage ont été implémentées (notamment détection de fumée ponctuelle ou optique, détecteurs de chaleur, dispositifs sprinkleurs, dispositifs de ventilation HVAC).

Le code FDS est utilisé par une très grande majorité d'ingénieurs et de chercheurs qui travaillent aujourd'hui dans le domaine de l'ingénierie de sécurité incendie.

9. ANNEXE 3 : GLOSSAIRE

- ⁱ **BGH** : Bois Grande Hauteur
- ⁱⁱ **LEPIR2** : Local Expérimental Pour Incendie Réel à 2 niveaux. Essais de comportement au feu de façades suivant l'arrêté du 10 septembre 1970 [2] accompagné d'un protocole de juillet 2014 [3].
- ⁱⁱⁱ **APL** : Appréciation de laboratoire, document émis par un laboratoire ou groupement de laboratoires agréés en réaction au feu et en résistance au feu par le ministère de l'intérieur suivant l'Arrêté du 5 février 1959.
- ^{iv} **COMPORTEMENT AU FEU** : « *Le comportement au feu en cas d'incendie est apprécié d'après deux critères : 1. La réaction au feu, c'est-à-dire l'aliment qui peut être apporté au feu et au développement de l'incendie ; 2. La résistance au feu, c'est-à-dire le temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu malgré l'action d'un incendie* » (Article R121-2 - Code de la construction et de l'habitation [10]).
- ^v **REACTION AU FEU** : « *Lorsque les conditions d'application finale d'un produit de construction sont telles que ce produit contribue à la déclaration et à la propagation du feu et de la fumée dans le local (ou la zone) d'origine ou au-delà, le produit est classé en fonction de ses caractéristiques de réaction au feu* » (Arrêté du 21 novembre 2002 [6]).
- ^{vi} **RESISTANCE AU FEU** : « *Les performances de résistance au feu évaluées au moyen d'actions thermiques prédéterminées sont exprimées en degrés ou classes. Ces degrés, ou classes, sont directement liés aux durées pendant lesquelles les produits, éléments de construction et d'ouvrages satisfont aux critères de performance retenus, en fonction du rôle qui leur est dévolu du point de vue de la sécurité* » (Arrêté du 22 mars 2004 [6]).
- ^{vii} **CODIFAB** : Le **CO**mité professionnel de **D**éveloppement des **I**ndustries **F**rançaises de l'**A**meublement et du **B**ois, fédère et rassemble 4200 PME et plus de 15 000 artisans, industriels français de l'ameublement et du bois. Le CODIFAB a pour mission de conduire et financer des actions collectives par le produit d'une taxe fiscale affectée.
- ^{viii} **ATG** : Analyse ThermoGravimétrique, technique d'analyse thermique consistant à mesurer la variation de masse d'un échantillon au cours du temps selon un profil de température donné.
- ^{ix} **ATG** : Analyse ThermoGravimétrique, technique d'analyse thermique consistant à mesurer la variation de masse d'un échantillon au cours du temps selon un profil de température donné.
- ^x **CONE CALORIMETRE** : instrument utilisé pour étudier le comportement au feu de petits échantillons, d'une surface de 100x100 mm². Permet de connaître le débit calorifique en fonction du temps sous éclairage par un flux radiatif.
- ^{xi} **ATG** : Analyse ThermoGravimétrique, technique d'analyse thermique consistant à mesurer la variation de masse d'un échantillon au cours du temps selon un profil de température donné.
- ^{xii} **DSC** : Calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry), technique d'analyse thermique consistant à mesurer les différences d'échange de chaleur entre un échantillon et une référence.
- ^{xiii} **BOMBE CALORIMETRIQUE** : Placée dans un calorimètre, elle permet de mesurer le dégagement de chaleur au cours d'une réaction chimique mettant en jeu des gaz et effectuée à volume constant (combustion complète d'un petit échantillon broyé sous une atmosphère de 100% d'oxygène).
- ^{xiv} **ADIVBOIS** : Association pour le Développement des Immeubles à Vivre en bois qui sur le volet technique rassemble plusieurs ateliers spécifiques dont un atelier incendie.
- ^{xv} **FDS** : **F**ire **D**ynamics **S**imulator est un code de calcul de « simulation aux grandes échelles » (Modèle de turbulence LES) pour des écoulements à faible nombre de Mach et orienté sur les phénomènes de transport de chaleur et de fumées dégagés en situation d'incendie)