



ETUDE

**ESSAIS AU FEU A GRANDE
ECHELLE DE LOCAUX AVEC BOIS
STRUCTURAL APPARENT**

AVERTISSEMENT

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

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

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

Droits d'auteur - copyright ©

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

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

PRÉAMBULE

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

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

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

Le présent document s'inscrit dans cette démarche.

La présente étude expérimentale avait pour but de réaliser des essais de développement de feu dans un local représentant un local d'une construction en bois.

L'objectif de cette étude était d'obtenir des données expérimentales suffisamment complètes pour, d'une part, valider (et éventuellement améliorer) les outils de calculs actuellement utilisés pour les études en ingénierie de la sécurité incendie (ISI) et, d'autre part, de vérifier les conditions permettant d'avoir le non-entretien de la combustion avec flammes vives des éléments en bois structuraux.

Les essais effectués se répartissent en :

- Dix essais au cône calorimètre sur des éprouvettes en épicea
- Huit essais à moyenne échelle dans une enceinte cubique de 1,40 m de côté, avec différentes configurations de parois en bois (CLT à base d'épicéa) et d'ouverture de ventilation
- Quatre essais à échelle réelle, d'une cellule de 5,1 m x 5,5 m x 2,6 m, avec différente configuration d'élément structural en bois (plafond, ou paroi ou poutres-poteau) pour des ouvertures de ventilation représentatives des bâtiments d'habitation ou de bureaux.

Le présent rapport d'Efectis concerne les quatre essais à grande échelle, dans un local d'environ 5,2 m de large, 5,5 m de profondeur et 2,6 m de hauteur.

Les 4 configurations expérimentales sont :

- Une paroi latérale en CLT avec colle MUF, avec une surface d'ouverture en façade de 5,58 m² et une charge incendie mobilière de 1775 kg de bûcher de bois
- Un plafond en CLT avec colle MUF, avec une surface d'ouverture, répartie sur 3 faces, de 13,90 m² et une charge incendie mobilière de 1464 kg de bûcher de bois
- 4 solives + 5 entretoises + 1 poteau (lamellé-collé), avec une surface d'ouverture, répartie sur 3 faces, de 13,90 m² et une charge incendie mobilière de 1441 kg de bûcher de bois
- Un plafond en CLT avec colle PU, avec une surface d'ouverture, répartie sur 3 faces, de 13,90 m² et une charge incendie mobilière de 1490 kg de bûcher de bois

Lors de chacun de ces essais, il a été constaté l'arrêt de combustion avec flammes vives du bois structural, après que la charge incendie mobilière ait quasiment finie de se consumé, soit environ 120 min après l'initiation du feu.

L'exploitation de ces résultats, et la mise au point de modèles numériques pour permettre de les simuler fait l'objet d'un rapport séparé.

Référence : 22-000161B-GAU
Affaire : 20-004273-EOV

ESSAIS AU FEU SUR MAQUETTES RECONSTITUANT UN LOCAL AVEC CERTAINES PAROIS EN BOIS APPARENT

RÉALISATION D'ESSAIS À GRANDE ÉCHELLE – RÉSULTATS ET ANALYSE



Client demandeur

CODIFAB

Référence et date de commande

Lettre commande du CODIFAB du 02/01/2022

Projet

Atelier Incendie ADIVbois

Date : 27 Mai 2022

Indice de révision : B

Nombre de pages : 114

Auteur(s) :

Gildas AUGUIN

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	15/04/2022	Version initiale
B	27/05/202	Prise en compte des remarques Atelier ADIVbois suite à la réunion du 19/5/22

Ce document annule et remplace toutes les versions précédentes

SOMMAIRE

Suivi des modifications	2
Sommaire.....	3
Synthèse des configurations et résultats.....	6
Sigles et abréviations.....	7
1. Introduction.....	8
2. Protocole et dispositifs expérimentaux	9
2.1.Cellule d'essais.....	9
2.2.Configurations géométriques et constructives testées.....	10
2.2.1.Configuration Essai 0 : sans bois	10
2.2.2.Configuration Essai 1 : paroi CLT.....	11
2.2.1.Configuration Essais 2 et 4 : plafond CLT	12
2.2.1.Configuration Essai 3 : poutres et poteau LC.....	14
2.3.Foyer primaire	16
2.4.Mesures réalisées	17
2.4.1.Mesures à l'intérieur du local.....	17
2.4.2.Mesures au niveau des ouvertures	19
2.4.3.Perte de masse du foyer primaire	19
2.4.4.Mesure du débit calorifique au niveau de la cheminée de la hotte	21
2.4.5.Mesures dans le bois de structure.....	21
2.4.6.Prises de vue (caméras vidéo).....	24
2.4.7.Conditions météorologiques	24
3. Essai 0 – configuration sans bois	25
3.1.Conditions d'essais.....	25
3.2.Déroulé de l'essai (observations)	26
3.3.Résultats des mesures.....	28
3.3.1.Températures ambiantes.....	28
3.3.2.Flux thermiques	29
3.3.3.Mesures aux ouvertures	29
3.3.4.Perte de masse.....	30
3.3.5.Débit calorifique	31
4. Essai 1 – configuration paroi CLT MUF.....	32
4.1.Conditions d'essais.....	32
4.2.Déroulé de l'essai (observations)	33
4.3.Résultats des mesures	36
4.3.1.Températures ambiantes.....	36
4.3.2.Flux thermiques	36
4.3.3.Mesures aux ouvertures	37
4.3.4.Perte de masse.....	37
4.3.5.Débit calorifique	38
4.3.6.Température dans les panneaux CLT	38
4.3.7.Relevés d'épaisseur de carbonisation.....	39
5. Essai 2 – configuration plafond CLT MUF	41
5.1.Conditions d'essais.....	41

5.2.Déroulé de l'essai (observations)	42
5.3.Résultats des mesures	46
5.3.1.Températures ambiantes	46
5.3.2.Flux thermiques	47
5.3.1.Mesures aux ouvertures	47
5.3.2.Perte de masse.....	48
5.3.3.Débit calorifique	49
5.3.4.Température dans les panneaux CLT	49
5.3.5.Relevés d'épaisseur de carbonisation.....	50
6. Essai 3 – configuration poteaux-poutres lamellé-collé	52
6.1.Conditions d'essais.....	52
6.2.Déroulé de l'essai (observations)	53
6.3.Résultats des mesures	60
6.3.1.Températures ambiantes.....	60
6.3.2.Flux thermiques	61
6.3.3.Mesures aux ouvertures	61
6.3.4.Perte de masse.....	62
6.3.5.Débit calorifique	63
6.3.6.Température dans les poutres et poteau LC	63
6.3.7.Relevés de carbonisation	65
7. Essai 4 – configuration plafond CLT PU	67
7.1.Conditions d'essais.....	67
7.2.Déroulé de l'essai (observations)	68
7.3.Résultats des mesures	72
7.3.1.Températures ambiantes.....	72
7.3.2.Flux thermiques	73
7.3.3.Mesures aux ouvertures	73
7.3.4.Perte de masse.....	75
7.3.5.Débit calorifique	75
7.3.6.Température dans les panneaux CLT	76
7.3.7.Relevés de carbonisation	76
8. Analyse et discussion	78
8.1.Régime d'incendie	78
8.2.Débites calorifiques	80
8.3.Contribution du bois.....	81
8.4.Auto-extinction du bois	83
9. Conclusion	84
10. Documents de référence	85
ANNEXE A Plans	87
A.1 Cellule d'essai sans bois.....	87
A.2 Configuration avec une paroi en CLT	90
A.3 Configuration avec un plafond CLT	93
A.4 Configuration avec poteau/poutres LC	96
A.5 Hotte99	
ANNEXE B Illustrations du montage des configurations.....	100

ANNEXE C	Plan d'instrumentation dans la cellule d'essais	102
ANNEXE D	Détermination des débits calorifiques	104
D.1	Détermination par perte de masse (plateforme de pesée dans la cellule d'essais)	104
D.2	Détermination par consommation d'oxygène (cheminée de la hotte calorimétrique)	104
D.3	Détermination par flux de chaleur convectif et radiatif aux ouvertures	105
D.4	Vérification avec l'essai 0 (calibration)	105
ANNEXE E	Phénomènes localisés d'incandescence	107
E.1	Essai 1 – configuration paroi CLT MUF	107
E.2	Essai 2 – configuration plafond CLT MUF	108
E.3	Essai 3 – configuration poteaux-poutres lamellé-collé	109
E.4	Essai 4 – configuration plafond CLT PU	111
ANNEXE F	Glossaire et définition	113

SYNTHÈSE DES CONFIGURATIONS ET RÉSULTATS

Essai	1	2	3	4
Illustration				
Configuration de la cellule d'essai				
Dimensions intérieures	5,17mx5,55m x2,64m	5,15mx5,55m x2,68m	5,15mx5,55m x2,64m	5,15mx5,55m x2,68m
Nature des parois	<u>Parois verticales (sauf Bois):</u> 175mm de béton cellulaire extérieur et 3 BA13 intérieur <u>Paroi horizontale (sauf Bois) :</u> plafond : 45mm de laine céramique et 250mm de béton cellulaire sol : 200mm de béton armé et 1 BA13			
Surface ouverture	Sud 5,58m ² ±0,32m ²	Sud 5,58m ² ±0,32m ² Est/Ouest : 8,32m ² ±0,4m ²	Sud 5,58m ² ±0,32m ² Est/Ouest : 8,32m ² ±0,4m ²	Sud 5,58m ² ±0,32m ² Est/Ouest : 8,32m ² ±0,4m ²
Facteur ouverture ¹	12,48m ^{-1/2}	5,05m ^{-1/2}	5 m ^{-1/2}	5,05m ^{-1/2}
Foyer primaire	1775kg de bois 968MJ/m ²	1464kg de bois 809MJ/m ²	1441kg de bois 795MJ/m ²	1490kg de bois 822MJ/m ²
Configuration de la structure « Bois »				
Face	Paroi CLT MUF	Plafond CLT MUF	Poteau/poutres LC	Plafond CLT PU
Carac.	Panneaux CLT Épicéa Ép. 220mm 1 pli 40mm 4 plis 45mm	Panneaux CLT Épicéa Ép. 220mm 4 plis 45mm 1 pli 40mm	5 poutres (4 solives+5 entretôises) Sect. 215x320mm ² ht Long 470 à 5560mm 1 poteau Haut. 2320mm Sect. de 405x320mm ²	Panneaux CLT Épicéa Ép. 200mm 5 plis 40mm
Surf. Bois	14,65m ²	28,58m ²	26,07m ²	28,58m ²
% bois ²	17,18%	33,26%	30,64	33,26%
Illustration				
Principaux résultats				
Pic HRR Total	9000 kW	11000 kW	8000 kW	13000 kW
Pic HRR Foyer primaire	6000 kW	6000 kW	5000 kW	7000 kW
Pic HRR Structure bois	4000 kW	7000 kW	5000 kW	9000 kW
Auto-extinction	Oui	Oui	Oui	Oui

¹ Définition issue des Eurocodes [1] (cf. § 8.1)

² Ratio entre surface développée de bois de structure apparent et la surface totale des parois horizontales et verticales de la cellule sauf le plancher (sol) (cf. § 8.1)

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADIVBois	Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois
BBGH	Bâtiment en bois de grande hauteur
BLC	Bois lamellé-collé
BMR	Bois massif reconstitué
BUP	Bâtiment à Usage Professionnel
CLT	Cross laminated Timber (<i>fr : bois lamellé croisé</i>)
CODIFAB	Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DGSCGC	Direction générale de la sécurité civile et de la gestion de crise (Ministère de l'Intérieur)
DHUP	Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (Ministère de la Transition écologique et solidaire et Ministère de la Cohésion des territoires)
ERP	Établissement recevant du public
ERT	Établissement recevant des travailleurs
HRR	Heat release rate, unité en Watts (<i>fr: débit calorifique</i>)
IGH	Immeuble de grande hauteur
ISI	Ingénierie de sécurité incendie (<i>en : Fire Safety Engineering, FSE</i>)
LC	Lamellé-collé
LCPP	Laboratoire central de la Préfecture de Police
LVL	Laminated Veneer Lumber (<i>fr : lamibois</i>)
MAP	mortier adhésif pour plaque de plâtre
MUF	Mélamine-urée-formol
PT	Plate thermometer (dispositif de mesure du flux thermique radiatif incident)

1. INTRODUCTION

L'un des enjeux des constructions en bois consiste à déterminer la surface de bois apparent qui ne conduit pas à l'auto-entretien de sa combustion avec flammes vives après l'extinction du foyer principal [3]-[8]. La capacité à pouvoir prédire ce phénomène au moyen d'outils numériques est possible dans une certaine mesure. Lors d'études précédentes réalisées pour ADIVbois [9]-[12], les techniques préconisées et proposées pour le calcul de développement du feu ou pour le calcul de structure, ont été évaluées sur la base de données disponibles dans la littérature. Celles-ci n'étaient pas nécessairement dédiées à cette problématique ou pour le même objectif. Il s'agissait avant tout de construire une méthodologie et d'en vérifier la fonctionnalité et la faisabilité. Les prédictions conduisaient à souvent obtenir des situations d'auto-entretien du bois de structure, et à préconiser une surface faible de bois de structure non protégée.

Aussi, ADIVbois a souhaité que soit menée une campagne expérimentale sur des maquettes bois à différentes échelles, afin de disposer de données expérimentales suffisamment complètes pour d'une part vérifier, améliorer et valider les outils de calcul utilisés pour les études d'ingénierie de sécurité incendie, et d'autre part afin d'identifier les conditions permettant d'obtenir le non-entretien de la combustion avec flammes vives des éléments structuraux en bois. Ces études et essais sont à réaliser par les laboratoires CSTB et Efectis.

Ainsi, quatre essais de configuration constructive en bois ont été réalisés par Efectis sur le 2nd semestre 2021 avec une maquette à échelle réelle³ d'environ 30m² au sol et 3m de haut (simple rez-de-chaussée).

Un essai avec une paroi en CLT avec colle MUF a été réalisé (Essai 1) pour une cellule d'essais présentant des caractéristiques d'ouvertures modérées (ouvertures uniquement en façade Sud) et un foyer de départ de feu avec une très forte charge calorifique (900 MJ/m² environ) correspondant à une occupation de type Habitation pour une valeur raisonnablement pessimiste de la densité de charge⁴.

Deux essais avec un plafond en CLT ont été considérés : l'un avec des panneaux CLT et colle MUF (Essai 2) lui conférant des propriétés de non délamination à chaud, l'autre avec des panneaux CLT et colle PU (Essai 4) de conception standard. La cellule d'essais présentait des caractéristiques d'ouvertures plus importantes (ouvertures en façades Sud, Est et Ouest) et un foyer de départ de feu de forte charge calorifique (700MJ/m² environ) correspondant à une valeur raisonnablement pessimiste de la densité de charge³ d'une occupation de type Bureaux.

Cette même configuration d'ouvertures de cellule d'essais et de foyer a été employée pour un essai de poutres et poteau en lamellé-collé (Essai 3) sous une dalle en béton cellulaire.

Un essai initial sans bois de structure (Essai 0) a été préalablement réalisé avec des ouvertures en façade Sud et un foyer de départ de feu avec une charge calorifique modérée (350 MJ/m²).

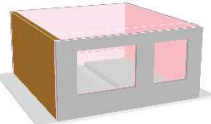
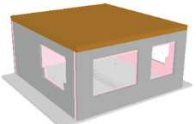
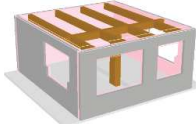
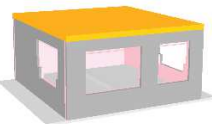




Essai	1	2	3	4
Date	27/10/2021	30/09/2021	21/09/2021	13/10/2021
Config.	Paroi CLT MUF	Plafond CLT MUF	Poteau/poutres BLC	Plafond CLT PU
Schéma				
Photo				

Tableau 1-1 : Configurations « bois » testées à grande échelle par Efectis pour ADIVbois en 2021

Ce document présente le protocole expérimental et les conditions d'essais, les résultats de chacun des essais ainsi que des éléments d'analyse au regard de l'objectif principal qui concerne la détermination de la surface de bois structural acceptable ne conduisant pas à un auto-entretien.

³ Des essais cônes et à échelle intermédiaire (cellule d'essais de 1,4m x 1,4m x 1,4m) ont été réalisés par le CSTB [13].

⁴ Correspond au quantile 90% de la charges calorifique variables pendant la durée d'utilisation

2. PROTOCOLE ET DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

2.1. CELLULE D'ESSAIS

Les essais ont été réalisés sur la plateforme incendie d'essais et de formation du laboratoire Efectis située à Saint Yan (71) fin Juillet, courant Septembre et Octobre 2021.

À cet effet une cellule d'essai de dimensions extérieures de 5960 mm de large (sens Est-Ouest) par 6360 mm de profondeur (sens Nord-Sud) et 2890 mm de haut a été construite sur une dalle en béton de 15m x 15m. Les parois de la cellule sont constituées de panneaux préfabriqués de béton cellulaire armé de 2200mm de long, 625mm de haut et 175mm d'épaisseur tenus par une structure métallique extérieure. Le plafond de la cellule est constitué d'un assemblage de 11 dalles en béton cellulaire armé de 6000mm de long, 625mm de large et 225mm d'épaisseur solidarisées par un cadre de levage en structure métallique.



Figure 2-1 : Prises de vue au Sud de la cellule d'essais (configuration sans bois)



Figure 2-2 : Prises de vue au Nord-Est et Nord-Ouest de la cellule d'essais (configuration sans bois)

Deux ouvertures permanentes sont présentes en façade Sud, l'une de 2200mm de large et 1590mm de haut côté Ouest (Sud1), et l'autre côté Est, de 1450mm de large et 1590mm de haut (Sud2). Une retombée de 110mm en plaques de plâtre cartonnées protégées par de la laine en fibre de verre haute température est créé en partie haute pour reproduire un linteau à 2244 mm de haut. L'allège des baies au Sud est constituée de blocs de béton cellulaire de 250mm d'épaisseur.

Pour les essais 2 à 4 des ouvertures identiques ont été créées en façade Est et Ouest d'une largeur de 2310 mm et de 1609 mm de haut, avec toujours une retombée de 110mm en plaques de plâtre cartonnées protégées par de la laine en fibre de verre haute température.

Une protection de la bordure des ouvertures et des poteaux métalliques extérieurs avec des nappes de laine en fibre vitreuse haute température (Insulfrax® 1300 HT) conduit à une réduction des dimensions de 40 à 60mm dans les deux directions.

Hormis les surfaces bois spécifiques qui sont décrites plus tard dans ce document, l'intérieur de la cellule d'essai est habillé de deux couches de plaques de plâtre cartonnées de 13mm d'épaisseur chacune présentant un classement en réaction au feu A2-s1,d0 (Placoflam® BA13). Les panneaux de la première couche ont été directement vissés et collés par plots MAP tous les 30cm sur le béton cellulaire. La seconde peau, côté intérieur, a été vissée et collée avec quelques plots MAP de manière à créer une faible lame d'air entre les deux couches.

Le plafond a été recouvert avec une nappe d'une épaisseur de 50 mm de laine en fibre vitreuse haute température avec une colle spécifique. Cette même laine a été employée pour protéger les faces internes des linteaux. Le sol en béton a été recouvert d'un caillebotis métallique de 25mm de haut sur lequel une épaisseur d'une plaque de plâtre de 13mm a été posée.

On notera que la façade extérieure Sud a été recouverte d'une épaisseur de 13mm de plaques de plâtre cartonnées afin de protéger la structure métallique extérieure.



Figure 2-3 : Vue de l'habillage intérieur de la cellule d'essai avec a) des plaques de plâtre cartonnée feu sur les parois et b) des nappes de fibre de verre haute température au plafond

Au droit de la façade Sud de la cellule d'essai est localisée une hotte calorimétrique en structure métallique. D'une largeur de 7700mm et d'une profondeur de 5324mm pour une hauteur de 4000mm, elle permet la collecte des gaz et fumées sortant des baies de la façade. Pour ce faire elle est surmontée d'une cheminée de 1200 mm de côté et de 3000 mm de haut avec des points de piquage. La hotte permet un cantonnement des fumées sur une épaisseur fixe de 2300 mm environ. Toutefois des rideaux souples en matériaux M1 sont disposés sur sa périphérie pour augmenter de 1000 mm sa capacité de cantonnement des fumées.

Les plans avec les dimensions détaillées de la cellule d'essais sont fournis en ANNEXE A.

2.2. CONFIGURATIONS GÉOMÉTRIQUES ET CONSTRUCTIVES TESTÉES

2.2.1. Configuration Essai 0 : sans bois

Pour cet essai, la configuration initiale de la cellule est conservée avec les deux baies au Sud. Les dimensions intérieures sont alors de 5150mm x 5550mm pour une hauteur sous plafond de 2640mm.

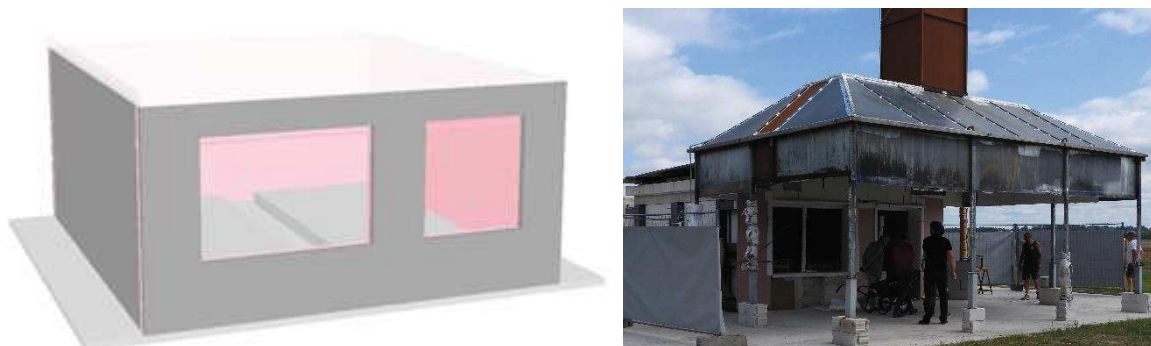


Figure 2-4 : Schéma de la configuration « sans bois » (Essai 0)

Les plans avec les dimensions détaillées de la cellule d'essais pour cette configuration sans bois sont fournis en Annexe A.1.

2.2.2. Configuration Essai 1 : paroi CLT

Pour l'essai 1, la paroi Est de la cellule d'essais initiale est remplacée par trois panneaux CLT épicéa 5 plis de 220mm d'épaisseur, incluant 1 pli intérieur de 40mm et 4 plis de 45mm (Plicroisé® Belliard construction). Les panneaux font 2000mm de large et 2670 mm de haut. Les dimensions intérieures de la cellule sont de 5170mm x 5550mm pour une hauteur sous plafond de 2640mm.

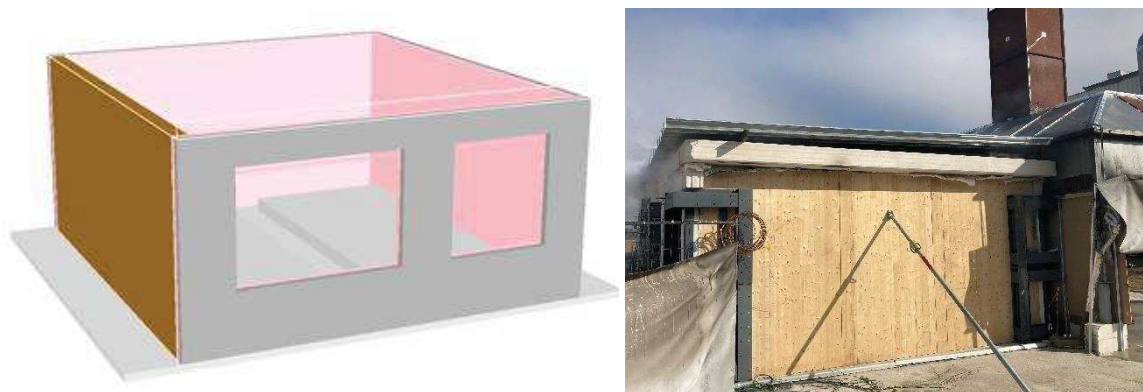


Figure 2-5 : Schéma et prise de vue de la configuration Paroi CLT MUF (Essai 1)

Les panneaux présentent un collage sur les faces supérieures et inférieures des planches croisées avec de la colle mélamine-urée-formol (MUF) conférant au CLT des propriétés de non délamination à chaud des plis. On notera que les éléments bois constituant les planches présentent un chanfrein se retrouvant sur le côté vertical des panneaux.



Figure 2-6 : Prises de vue de l'épaisseur des plis de la paroi CLT MUF (Essai 1)

Les panneaux sont connectés entre eux par la fixation d'une planche en bois dans une feuillure longitudinale entre le panneau du milieu et les deux panneaux latéraux sur l'épaisseur du pli extérieur avec des vis de 80mm de long. Côté intérieur un mastic silicone résistant au feu vient colmater le jeu de quelques millimètres entre la jonction des panneaux.



Figure 2-7 : Prises de vue de a) la feuillure du panneau central et b) de l'étanchéité de la paroi côté intérieur (Essai 1)

Le montage de la paroi sur la cellule est réalisé sans assemblage ou connexion avec les parois adjacentes et le plafond. Les panneaux CLT extérieurs sont fixés aux angles en structure métallique à l'aide vis de 80mm

de profondeur. Une nappe de 50mm de laine en fibre vitreuse haute température est bourrée entre les parois béton et la paroi CLT, et une autre est comprimée par gravité entre le plafond en béton et la paroi CLT. Une bande de 5cm de laine en fibre vitreuse haute température est ajoutée en partie haute intérieure de la paroi pour limiter tout risque de passage d'air pendant l'essai favorisant la combustion du bois en ce lieu.

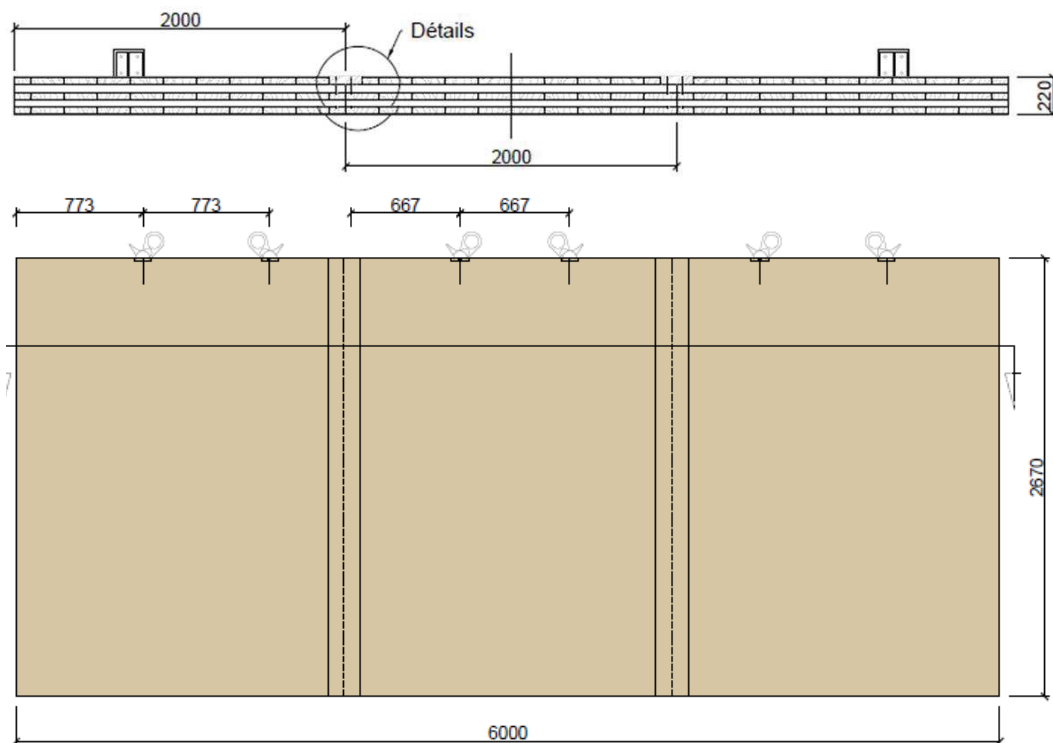


Figure 2-8 : Détail de la paroi pour l'essai 1 (Paroi CLT)

Les plans avec les dimensions détaillées de la cellule d'essais pour cette configuration Essai 1 sont fournis en Annexe A.2.

2.2.1. Configuration Essais 2 et 4 : plafond CLT

Pour les essais 2 et 4, le plafond de la cellule d'essais initiale est remplacé par trois panneaux CLT épicea 5 plis de 2000mm de large et 5600 mm de long posés dans le sens Est-Ouest de la cellule d'essais. Les dimensions intérieures de la cellule sont alors de 5150mm x 5550mm pour une hauteur sous plafond de 2680mm.

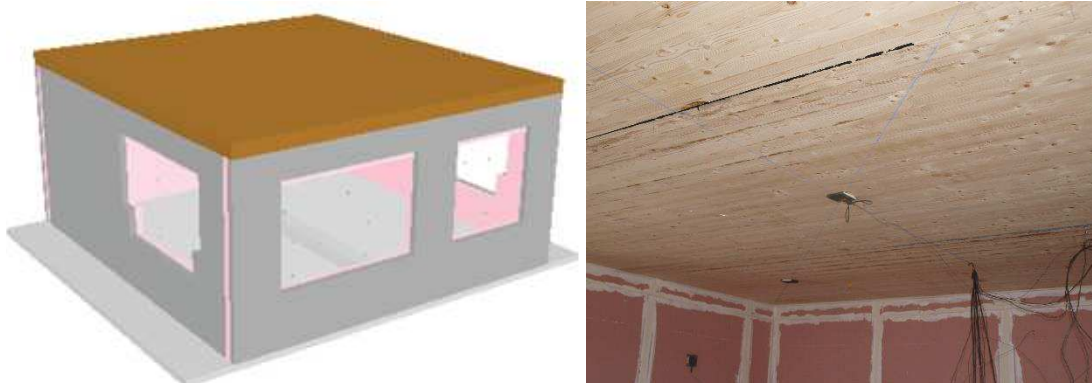


Figure 2-9 : Schéma et prise de vue de la configuration Plafond CLT MUF (Essai 2)

Pour l'essai 2, il s'agit de panneaux CLT épicea de 220 mm d'épaisseur, incluant 4 plis de 45 mm et 1 pli extérieur de 40 mm (Plicroisé® Belliard construction). Les panneaux présentent un collage sur les faces

supérieures et inférieures des planches croisées avec de la colle mélamine-urée-formol (MUF) conférant au CLT des propriétés de non délamination à chaud des plis. S'agissant du même fournisseur que pour la paroi CLT (Essai 1), les éléments bois constituant les planches présentent un chanfrein se retrouvant sur les longs pans des panneaux et visibles sur la façade Nord de la cellule d'essais.

Pour l'essai 4, il s'agit de panneaux CLT épicéa de 200 mm d'épaisseur, constitués 5 plis de 40 mm (StoraEnso®). Les panneaux présentent un collage sur les faces supérieures, inférieures ainsi que les chants des planches croisées avec de la colle polyuréthane (PU) correspondant à une conception standard.

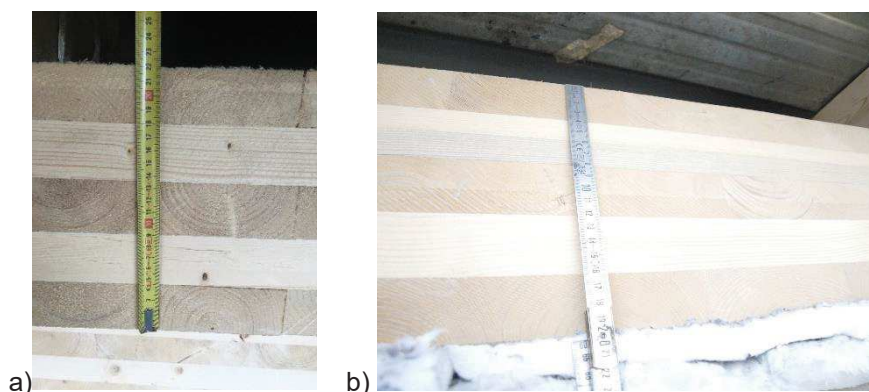


Figure 2-10 : Prises de vue du repérage de l'épaisseur des plis des panneaux CLT
 a) avec colle MUF (Essai 2) ; b) avec colle PU (Essai 4)

Les panneaux sont connectés entre eux par la fixation d'une planche en bois dans une feuillure longitudinale entre le panneau du milieu et les deux panneaux latéraux sur l'épaisseur du pli extérieur pour les panneaux CLT MUF (Essai 2) et un demi-pli pour les panneaux CLT PU (Essai 4). Côté intérieur un mastic silicone résistant au feu vient colmater le jeu de quelques millimètres entre la jonction des panneaux.

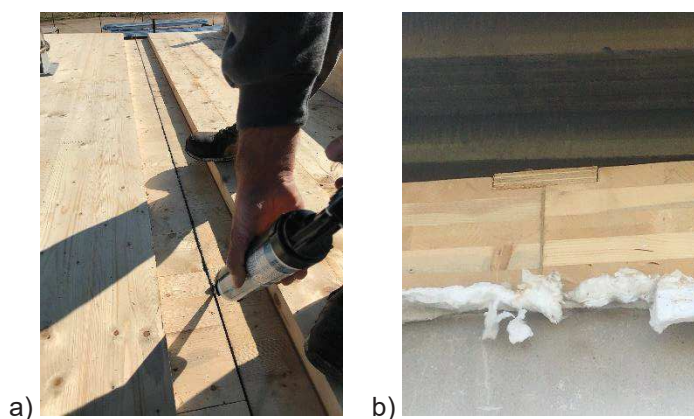


Figure 2-11 : Prises de vue des feuillures des panneaux CLT
 a) vue de dessus avec colle MUF (Essai 2), b) vue de côté avec colle PU (Essai 4)

Le montage des plafonds CLT sur la cellule est réalisé sans assemblage/connexion avec les parois. Les plafonds CLT sont juste posés sur le béton cellulaire. Une nappe de 50mm de laine en fibre vitreuse haute température est comprimée par gravité entre le plafond CLT et les linteaux en béton cellulaire pour limiter tout risque de passage d'air pendant l'essai favorisant la combustion en ce lieu.

On rappelle que pour les essais 2 et 4 des ouvertures sont présentes sur les façades Est et Ouest de 2310 mm de large et de 1609 mm de haut, intégrant une retombée de 110mm en plaques de plâtre cartonnées. La présence des poteaux métalliques et la mise en place de la protection avec de la laine en fibre de verre haute température réduisent d'environ 60dm² la section de passage.

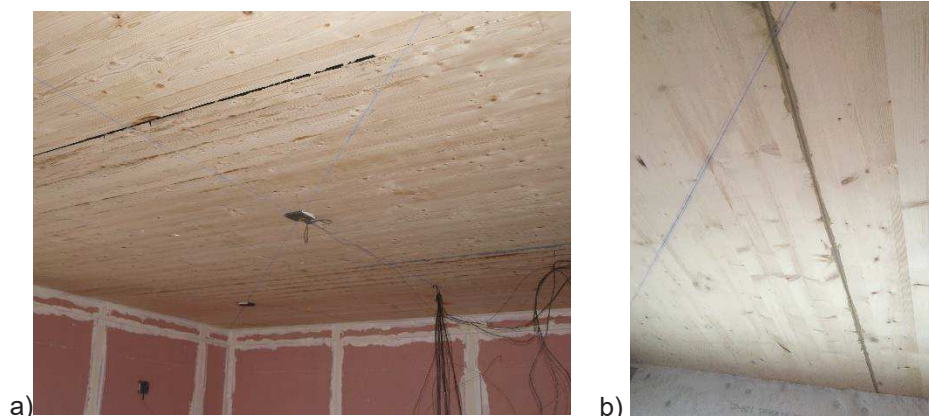


Figure 2-12 : Prises de vue de la reprise d'étanchéité des panneaux CLT en face intérieure
 a) CLT avec colle MUF (Essai 2) ; b) CLT avec colle PU (Essai 4)



Figure 2-13 : Prises de vue de la baie Ouest avant et après protection (Essai 2)

Les plans avec les dimensions détaillées de la cellule d'essais pour ces configurations Essais 2 et 4 sont fournis en Annexe A.3.

2.2.1. Configuration Essai 3 : poutres et poteau LC

Pour l'essai 3, des poutres et un poteau en bois lamellé-collé en épicéa sont installés dans la cellule d'essai. Les dimensions intérieures de la cellule sont alors de 5150mm x 5550mm pour une hauteur sous plafond de 2640mm.

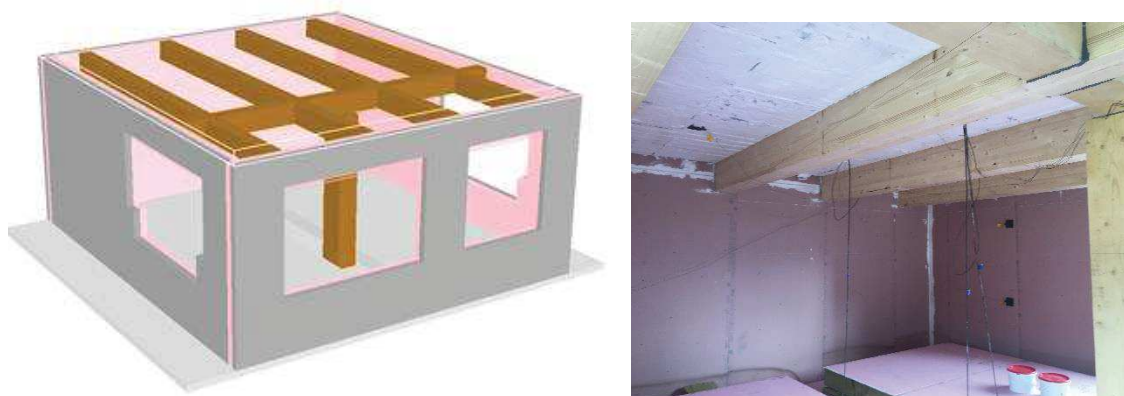


Figure 2-14 : Schéma et prise de vue de la configuration Poteau/Poutres LC (Essai 3)

Les plans avec les dimensions détaillées de la cellule d'essais pour cette configuration Essai 3 sont fournis en Annexe A.4.

Les éléments de structure bois suivants sont mis en place dans la cellule d'essais :

- Quatre (4) solives de section 215mmx320mm ht et 5560mm de long entre les façades Sud et Nord avec un entraxe 1350 mm
- Trois (3) entretoises entre les solives de section 215mmx320mm ht, d'une longueur de 1150 mm,
- Deux (2) entretoises de section 215mmx320mm ht, entre les solives et les façades Est et Ouest d'une longueur de 470 mm
- Un (1) poteau de 2320mm de haut avec une section de 405mm x320mm (N/S x E/O)

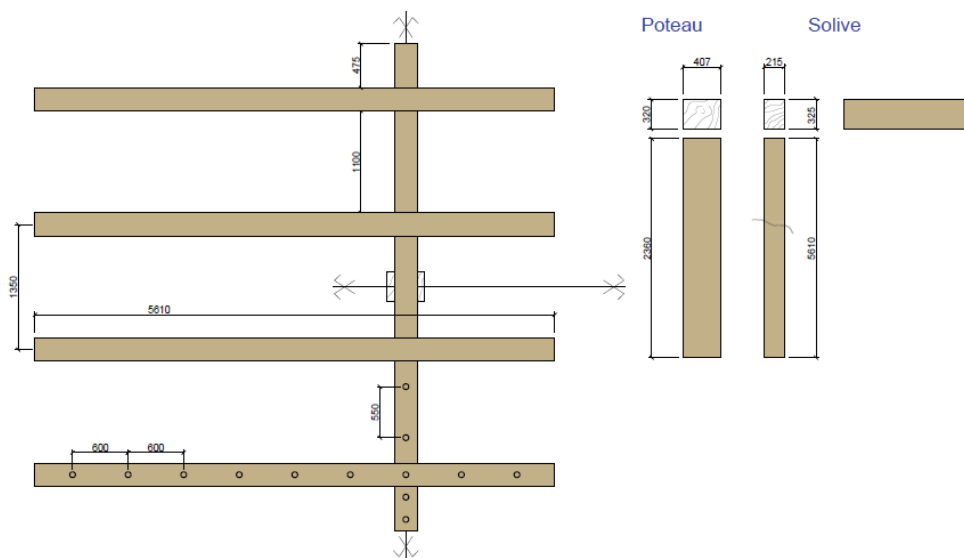


Figure 2-15 : Détail des solives, entretoises et poteau de l'essai 3 (Poteau/poutres LC)

Les solives et entretoises (dénommées poutres ci-après) sont fixées au plafond via des vis 8x400 mm de long avec un entraxe de 600 mm qui traversent depuis l'extérieur, le plafond en dalles de béton cellulaire et les poutres en leur centre sur une profondeur d'environ 175 mm. Les poutres ainsi suspendues au plafond ne sont pas maintenues en façade, ni entre elles, ni avec le poteau. Celui-ci est coincé sous l'entretoise centrale grâce à des coins de force en pied.

Pour se prémunir des risques de points de combustion aux interfaces, plusieurs mesures sont prises. Ainsi pour l'interface bois/plafond, le mode de fixation par vis tirefonds permet de comprimer la laine en fibre de verre haute température présente sous les dalles en béton cellulaire. Pour les interfaces bois/parois, les bouts de poutres sont encoffrés dans les deux épaisseurs de plaques de plâtre complétés par une bande protectrice périphérique en laine de fibre de verre haute température. Pour les zones d'interface bois/bois sans assemblage, les jeux et espaces de quelques millimètres sont colmatés avec du mastic silicone feu.

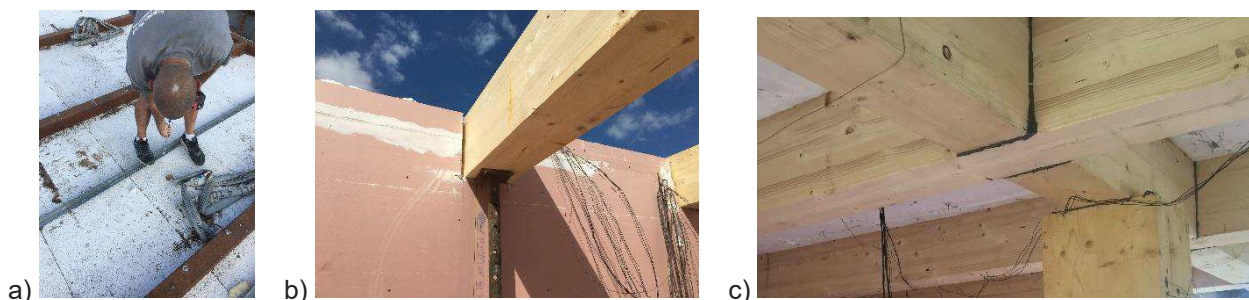


Figure 2-16 : Prises de vue de la fixation des poutres et du traitement des interfaces (Essai 3)
 a) fixation des poutres depuis l'extérieur ; b) encoffrement des poutres en paroi ; c) colmatage par mastic silicone des interfaces bois/bois

Les mêmes ouvertures que pour les essais 2 et 4 sont créées sur les façades Est et Ouest, en plus de celles en façade Sud déjà présentes.

2.3. FOYER PRIMAIRE

Des foyers naturels à base de bûchers de bois sont utilisés pour reproduire les densités de charge calorifiques basées sur l'Eurocode 1 partie 1-2 au quantile à 90% [1]. Pour ce faire, 16 bûchers constitués de couches de tasseaux en bois d'épicéa de différentes sections et régulièrement espacés sont utilisés.

Pour l'essai 1 qui reproduit une activité de logement, une densité de charge de 940MJ/m² doit être atteinte. Pour les essais 2 à 4, qui reproduisent des activités de bureaux une densité de charge de 740MJ/m² est à attendre.

Pour une chaleur de combustion du bois de 17,5MJ/kg ± 2.5 MJ/kg [19] ces charges calorifiques représentent des densités de 53,7kg de bois/m² et 42,3kg de bois/m² pour les activités de logement et de bureaux respectivement. Toutefois, pour tenir compte d'une part de la teneur en eau du bois des bûchers [1], et également du rendement de combustion de feu naturel de 90% (cf. Annexe D.4), une chaleur de combustion apparente de bois sec de 16,2MJ/kg est retenue.

Pour l'essai 0, seuls 8 bûchers sont disposés dans la cellule d'essais. Une densité de charge calorifique de 350 MJ/m² est donc attendue.

Les caractéristiques des différents bûchers pour chacun des essais sont indiquées dans le tableau ci-dessous






Essai	Constitution des bûchers	Caractéristiques	Illustration
0	2 tasseaux de 100x100x800mm (pieds) 5 couches de 4 tasseaux de 100x100x800mm	633kg de bois 350MJ/m ²	
1	2 tasseaux de 100x100x800mm (pieds) 1 couche jointe de 2x3 tasseaux de 23x150x1000mm 1 couche de 4 tasseaux de 50x130x1000mm 4 couches de 4 tasseaux de 100x100x800mm	1775kg de bois 968MJ/m ²	
2	2 tasseaux de 100x100x800mm (pieds) 3 couches de 4 tasseaux de 45x130x1000mm 1 couche jointe de 2x4 tasseaux de 50x100x1000mm 1 couche de 4 tasseaux de 100x100x1000mm 1 couche de 4 tasseaux de 100x100x800mm	1464kg de bois 809MJ/m ²	
3	2 tasseaux de 100x100x800mm (pieds) 3 couches de 4 tasseaux de 45x150x1000mm 2 couches de 4 tasseaux de 100x100x1000mm 1 couche de 4 tasseaux de 100x100x800mm	1441kg de bois 795MJ/m ²	
4	2 tasseaux de 100x100x800mm (pieds) 3 couches de 4 tasseaux de 45x170x1000mm 1 couche jointe de 4x4 tasseaux de 23x150x1000mm 2 couches de 4 tasseaux de 100x100x800mm	1490kg de bois 822MJ/m ²	

Tableau 2-1 : Caractéristiques des bûchers constituant les foyers primaires pour chaque essai

2.4. MESURES RÉALISÉES

L'instrumentation comprend des mesures de température, de flux thermique, de vitesse, de débit volumique de fumées, de concentration gazeuses, de perte de masse, ainsi que des enregistrements vidéo. Les types de mesures et instrumentation associée sont présentés ci-après avec leur implantation dans la cellule d'essais. Celle-ci peut varier d'un essai à l'autre et sera précisée si besoin lors de la présentation des résultats.

2.4.1. Mesures à l'intérieur du local

Pour la mesure de la température ambiante, cinq (5) lignes verticales de quatre (4) thermocouples placés à +50, +100, +200 et +250 cm au-dessus du niveau du plancher sont installées dans la cellule d'essais. Trois lignes sont localisées dans l'axe médian Nord/Sud de la cellule, au centre et à ± 150 cm du centre. Les deux dernières lignes sont placées devant les foyers dans l'axe des deux ouvertures Sud. La mesure de température se fait au moyen de thermocouples type K en Chromel/Alumen chemisés en gaine inconel de 1,5mm de diamètre, ayant une plage d'utilisation de -180 °C à 1 200°C.



Figure 2-17 : Illustrations de la mise en place des perches de thermocouples
 a) Essai 0 ; b) Essai 1 ; c) Essai 3

Les mesures de flux thermiques se font en cinq points sous le plafond (au centre et au milieu de chaque demi-diagonale) et en paroi Est et/ou Ouest selon l'essai à deux hauteurs et positions différentes à l'aide de pyromètres à plaque ou plate thermometers (PT). Le PT se compose d'une plaque en acier inoxydable de 100 mm x 100 mm et 0,7mm d'épaisseur, avec un matériau isolant rigide en fibre de verre haute résistance de 10 mm d'épaisseur à l'arrière. Un thermocouple est fixé au centre de la plaque. La formule de Ingason [14] permet de déterminer le flux radiatif incident à partir de la température mesurée.



Figure 2-18 : Implantation des plate thermometers - a) sur la paroi CLT (Essai 1) ; b) sous le plafond CLT (Essai 2) ; c) sous le plafond béton protégé (Essai 3) ; d) sur les parois plâtre (Essai 4)

On trace ci-après une vue globale de l'implantation des thermocouples et plate thermometers dans la cellule d'essais. Les vues détaillées avec côte sont fournies en ANNEXE C.

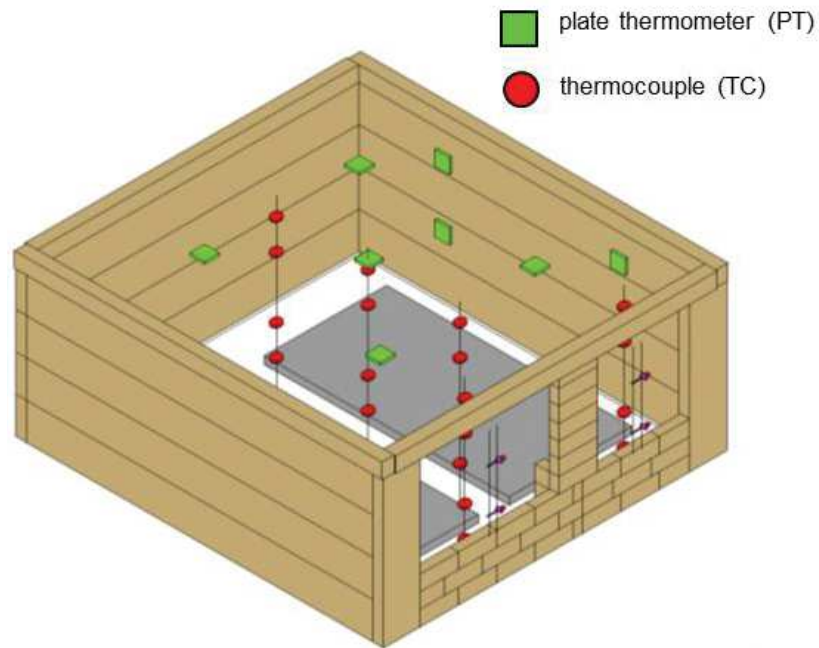


Figure 2-19 : Vue générale de la localisation des points de mesure à l'intérieur de la cellule d'essais

2.4.2. Mesures au niveau des ouvertures

Pour mesurer le débit de chaleur sortant de la cellule d'essais, des mesures de vitesses et de températures sont faites à chaque ouverture en deux points : un point haut à 500 mm du linteau supposé se situer dans les gaz chauds sortants de la cellule d'essais, un point bas à 300 mm de l'allège supposé se situer dans les gaz frais entrants dans la cellule d'essais. Ces points sont localisés dans l'axe central de chaque ouverture.

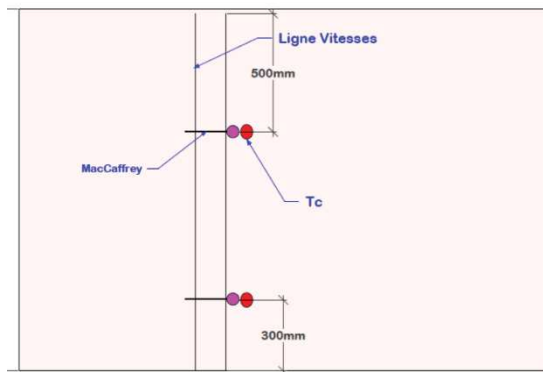


Figure 2-20 : Localisation des points de mesure aux ouvertures et illustration pour l'ouverture Sud

La mesure de température se fait au moyen de thermocouples type K en Chromel/Alumen chemisés en gaine inconel de 1,5mm de diamètre. Ils sont protégés partiellement des effets radiatifs des flammes des bûchers en les plaçant derrière la protection en laine de verre haute température du système vertical de fixation des sondes de vitesse.

Pour la mesure de la vitesse, au regard du besoin de connaître le sens de l'écoulement, des sondes de Mc Caffrey [15], dérivées du principe du tube de Pitot reliées à un manomètre différentiel de gamme $\pm 150\text{Pa}$ sont employées. La mesure de la température par thermocouple permet de déterminer la masse volumique de l'air.

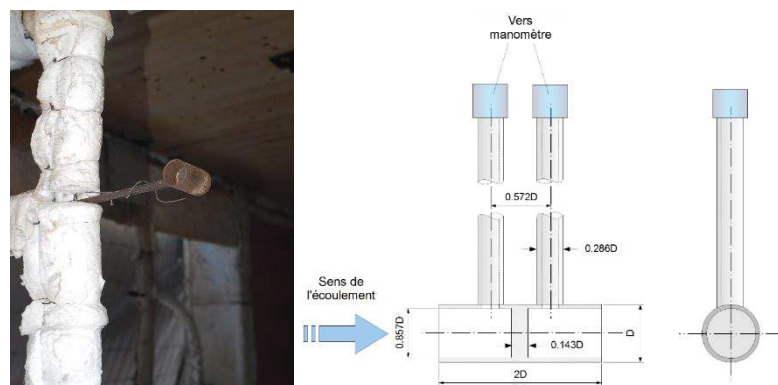


Figure 2-21 : Illustration et caractéristiques d'une sonde bidirectionnelle de Mc Caffrey [15]

2.4.3. Perte de masse du foyer primaire

Pour la détermination du débit de pyrolyse du foyer primaire, une mesure de la perte de masse par combustion des bûchers est effectuée au moyen de deux plateformes de pesée de 2000mm de large et 4000mm de long. Chaque plateforme peut recevoir huit (8) bûchers. Elles sont à une distance d'environ 325mm des parois Est et Ouest, et de 775mm des parois Nord et Sud.

Chaque plateforme de pesée est composée d'un chevêtre métallique, d'une couche de plaques plâtre feu de 13 mm d'épaisseur, d'une épaisseur de 200mm de laine de roche et d'une nouvelle couche de plaques plâtre feu. Les pieds des chevêtres reposent sur 4 pesons, de portée 300kg par peson pour la plateforme de pesée à l'Est, et de portée de 500kg par peson pour la plateforme de pesée à l'Ouest. La précision des pesons est de 150 g. Chaque plateforme est reliée à un terminal de pesage et une sortie analogique vers la centrale d'acquisition permettant une pesée en continu de 8 bûchers simultanément.

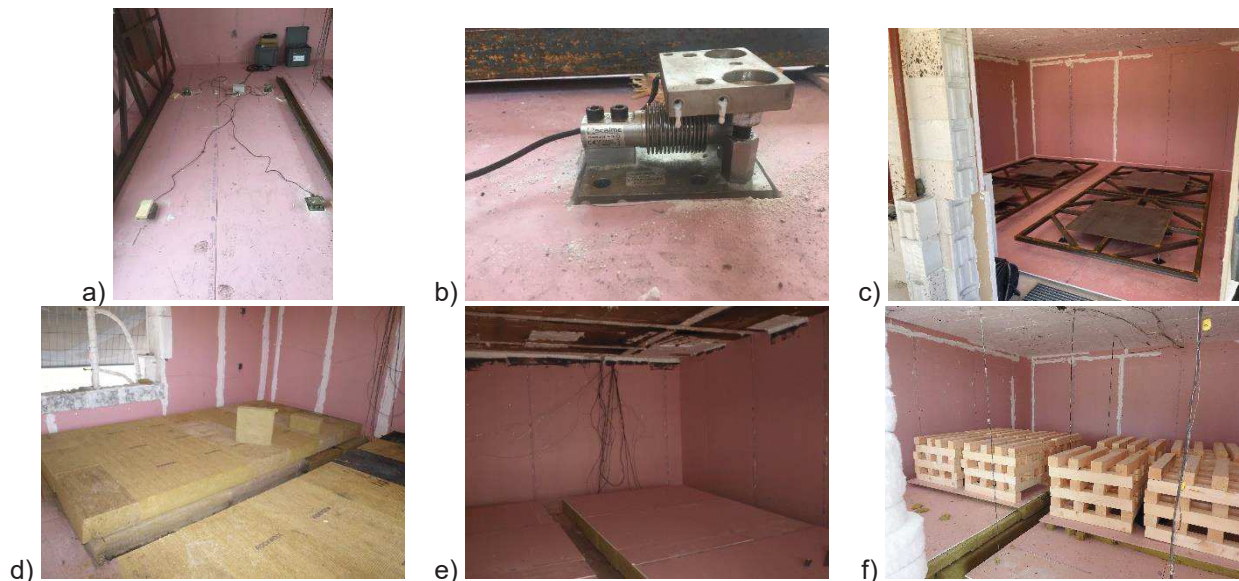


Figure 2-22 : Étapes de mise en place d'une plateforme de pesée a) répartition et connexion des pesons ; b) fixation des pesons au sol ; c) pose du chevêtre métallique ; d) pose de l'isolant en laine de roche ; e) pose de la dernière couche de plaque de plâtre feu BA13 ; f) pose des bûchers de bois

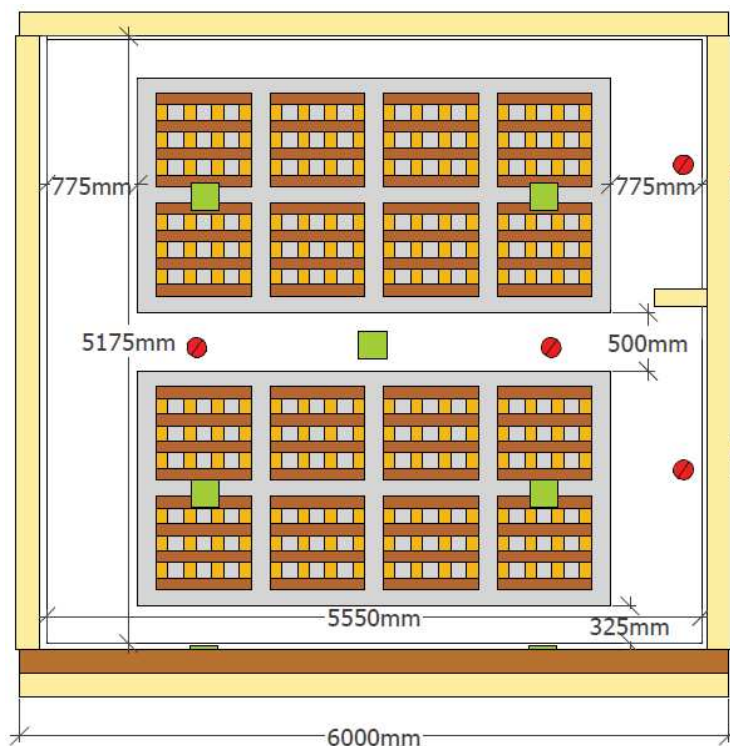


Figure 2-23 : Implantation des plateformes de pesée dans la cellule d'essai

La protection des pesons situés en dessous des plateaux, est assurée par la couche successive de plaques de plâtre feu et de panneaux de laine de roche sur le chevêtre métallique. De blocs de laine de roche entourent également chaque plateforme de pesée pour éviter la pénétration de gaz trop chauds par les côtés. Un thermocouple est situé sous chaque plateau de balance pour vérifier la température atteinte.

2.4.4. Mesure du débit calorifique au niveau de la cheminée de la hotte

La partie du débit calorifique (ou puissance du feu) libérée par l'incendie du foyer primaire et du bois structural, et sortant par les ouvertures Sud de la cellule d'essais est mesurée par calorimétrie via une hotte de grandes dimensions située au Sud de la cellule d'essais qui permet de capter les fumées et gaz chauds. Ces fumées sont évacuées de la hotte via une cheminée de 3000 mm de haut et de section carrée de 1200mm de côté. Un piquage à mi-hauteur de la cheminée et au centre de sa section de passage à l'aide d'un tube 8/10 en inox permet de prélever avec une pompe à 12L/min les effluents gazeux. Une sonde bidirectionnelle McCaffrey [15] et un thermocouple permettent de déterminer la vitesse et température de passage dans la section.



Figure 2-24 : Hotte calorifique au Sud de la cellule d'essais et visualisation des points de mesures dans la cheminée

Le débit calorifique est calculé suivant la méthode de consommation d'oxygène proposée par Thornton [17] avec une correction de la valeur par les concentrations en dioxyde et monoxyde de carbone [18][16].

Les concentrations des gaz de combustion O_2 , CO_2 et CO sont déterminées avec un analyseur de gaz, muni d'une boucle de prélèvement rapide, et équipé de cellules par absorption dans l'infrarouge pour la mesure des concentrations en CO et CO_2 , et de sondes galvaniques pour la mesure des concentrations en O_2 . Les plages de mesure des cellules de l'analyseur sont les suivantes :

- O_2 : 0 à 25 %.
- CO_2 : 0 à 10 %.
- CO : 0 à 5 000 ppm.

Le débit volumique des fumées est calculé à partir de la vitesse débitante au passage de la cheminée et de la température des fumées qui permet de définir la masse volumique. La pression différentielle est mesurée par un micro manomètre 0-1000 Pa, sur sa plage de mesure 0 - 100 %. La mesure de la température dans la cheminée se fait au moyen d'un thermocouple de type K chemisé en inconel.

2.4.5. Mesures dans le bois de structure

Des mesures sont faites dans le bois de structure au moyen de thermocouples type K chemisés en inconel. Les thermocouples de 1,5 mm de diamètre sont introduits dans un perçage de 3 mm de diamètre depuis une face qui n'est pas exposée au feu.

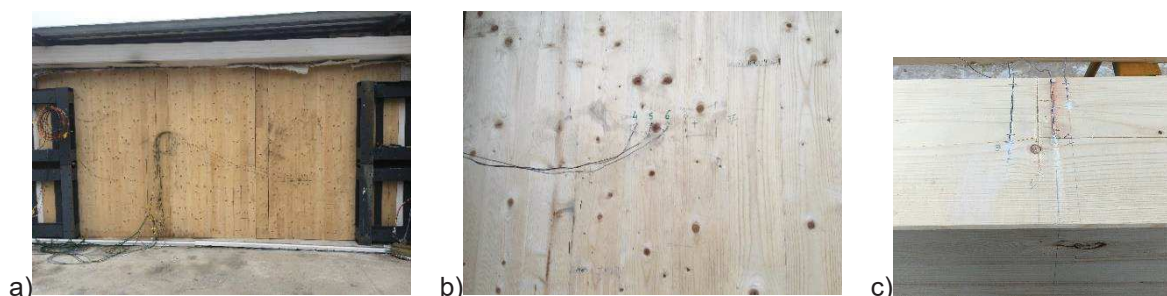


Figure 2-25 : Illustrations de la mise en place des thermocouples dans le bois de structure
 a) paroi CLT (Essai 1) b) plafond CLT (Essais 2 et 4) c) solives (Essai 3)

Pour la paroi et les plafonds CLT, cela se traduit par une mise en place des thermocouples depuis l'extérieur de la cellule d'essais. Pour les poutres en LC, cela se traduit par une mise en place des thermocouples depuis la face comprise entre la solive et la laine de verre haute température qui protège le plafond en dalles de béton cellulaire. Par contre pour les thermocouples du poteau, les perçages donnent dans la cellule du côté Sud du poteau. Dans tous les cas, les perçages sont rebouchés avec du mastic silicone spécial feu.

Pour l'essai 1 de paroi CLT, les points de mesure sont localisés à 2000 et 1000mm de haut à 1500mm de l'axe médian de la paroi. Les thermocouples sont placés à l'interface entre le premier et second pli (40 mm), à l'interface entre le second et troisième pli (85 mm) et à l'interface entre le troisième et quatrième pli (130 mm).

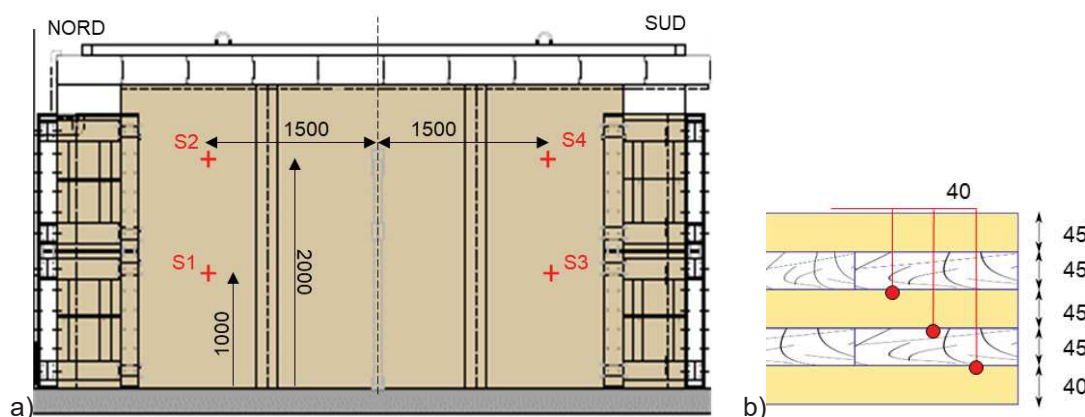


Figure 2-26 : Localisation des points de mesure de température a) sur la paroi Est et b) dans l'épaisseur des panneaux CLT (Essai 1)

Pour les essais 2 et 4 impliquant un plafond CLT, les points de mesure sont localisés à 1500 mm de parois Est ou Ouest et à 1600 mm des parois Nord ou Sud, et au milieu du plafond. Pour l'essai 2 qui emploie le même type de panneau que l'essai 1, les thermocouples sont placés à mi-profondeur du premier pli côté intérieur (22,5 mm), à l'interface entre le premier et second pli (40 mm) et à l'interface entre le second et troisième pli (85 mm). Pour l'essai 4 qui emploie un panneau CLT de 200mm d'épaisseur avec 5 plis de 40 mm, les thermocouples sont placés à l'interface entre le premier et second pli (20 mm), à l'interface entre le second et troisième pli (40 mm) et à l'interface entre le second et troisième pli (80 mm). Les profondeurs de thermocouples sont donc relativement comparables.

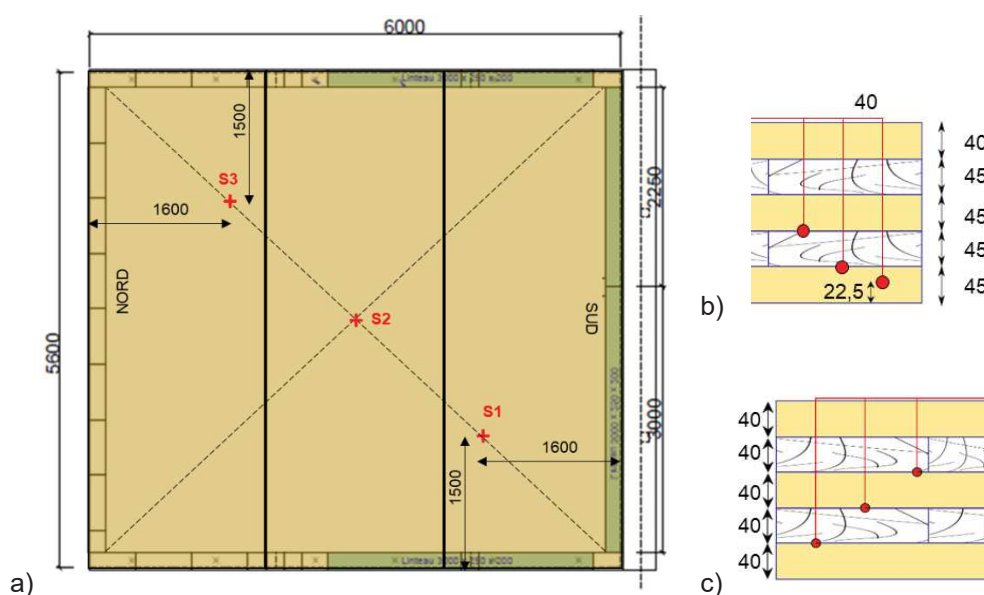


Figure 2-27 : Localisation des points de mesure de température a) sur le plafond (Essais 2 et 4) et dans l'épaisseur des panneaux CLT a) Essai 2 (colle MUF) et c) Essai 4 (colle PU)

Pour l'essai 3 impliquant les poutres et poteau bois en BLC, les points de mesure des solives sont localisés sur la solive la plus à l'Est à mi-distance entre les entretoises et la paroi Sud, la seconde solive la plus à l'Est au milieu de la cellule d'essais, et sur la solive la plus à l'Ouest à 1600 mm de la façade Nord. Les thermocouples sont placés à 15 mm, 30 mm et 150 mm de profondeur depuis la semelle inférieure des solives concernées.

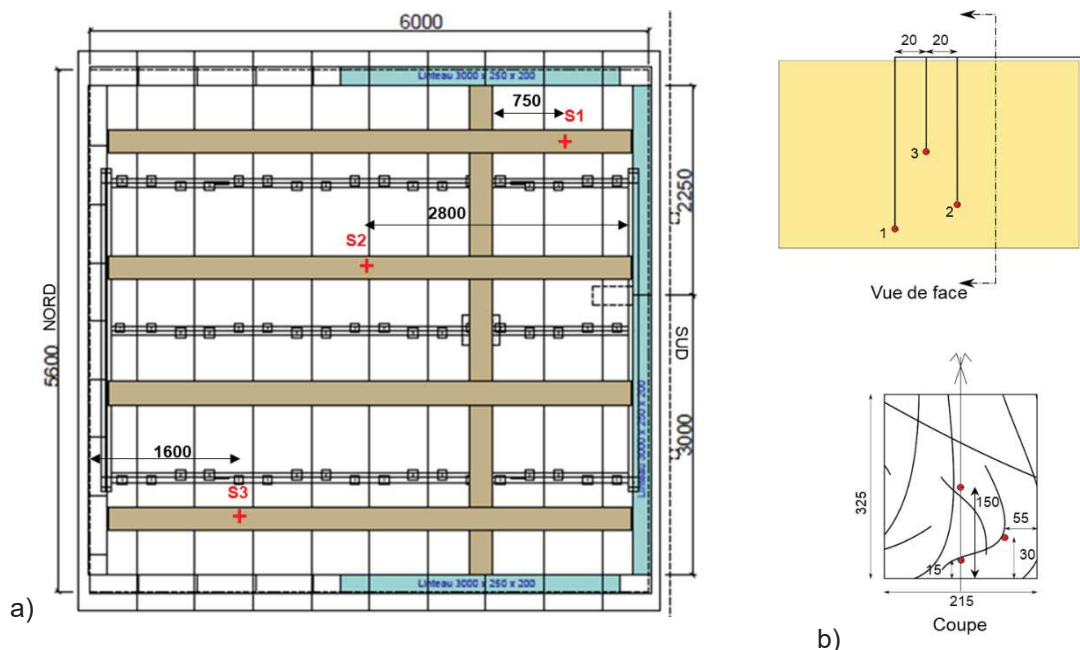


Figure 2-28 : Localisation des points de mesure de température des poutres pour l'essai 3 a) dans la cellule d'essais (vue de dessus) et b) dans la profondeur des solives

Les points de mesure du poteau sont localisés à une hauteur de 1000 mm et 2000 mm de haut. Les thermocouples sont placés à 15 mm, 30 mm et 200 mm de profondeur depuis la face Nord du poteau.

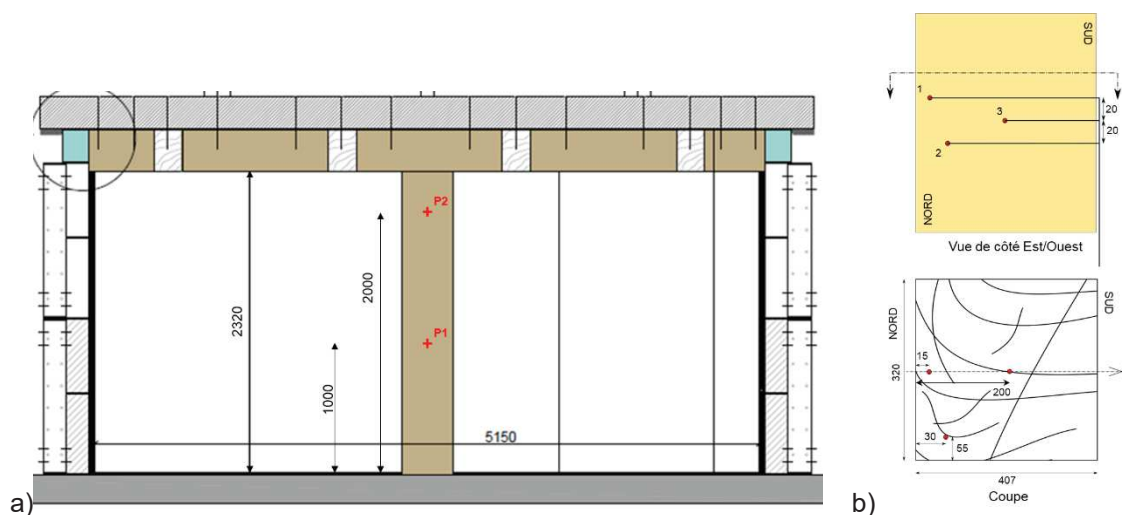


Figure 2-29 : Localisation des points de mesure de température du poteau pour l'essai 3 a) dans la cellule d'essais (élévation Sud) et b) dans la profondeur du poteaux

2.4.6. Prises de vue (caméras vidéo)

Les essais sont filmés au moyen de quatre caméras fixes sur enregistreur avec report sur un écran dans la salle de contrôle, placées devant les ouvertures à l'Est et à l'Ouest, ainsi qu'aux angles Sud-Est et Sud-Ouest.

Des caméras mobiles avec enregistrement sur SD cartes sont ajoutées et positionnées selon les besoins de chaque essai.

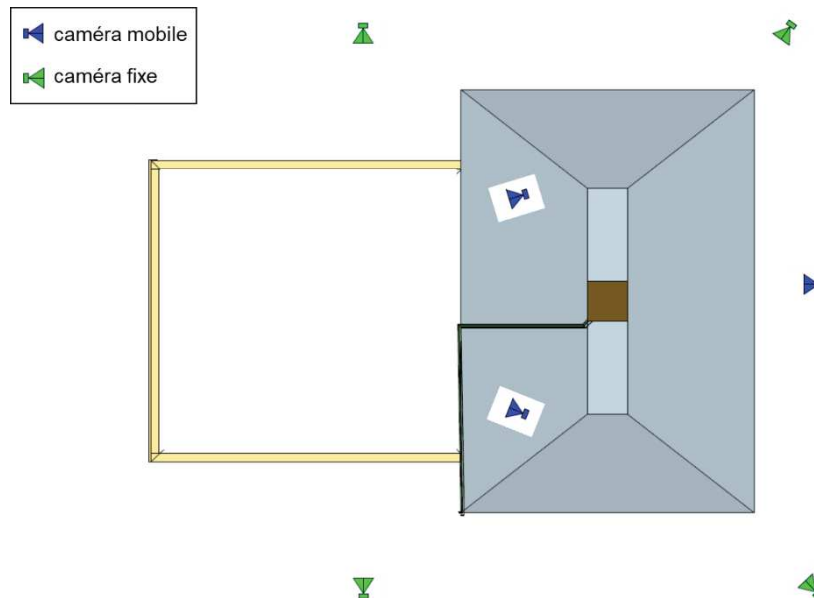


Figure 2-30 : Localisation des caméras fixes (pour tous les essais) et des caméras mobiles (exemple)

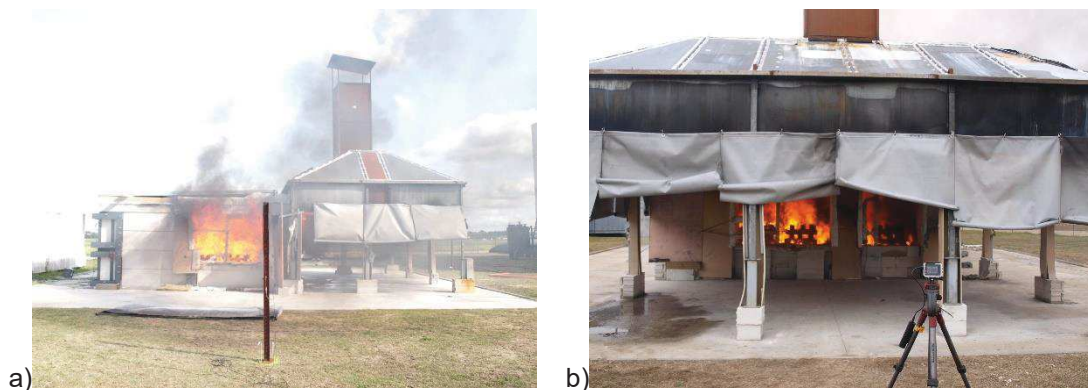


Figure 2-31 : Exemple de caméras autour de la cellule d'essais
 a) caméra fixe sur mât à l'Ouest ; b) caméra sur pied mobile au Sud

2.4.7. Conditions météorologiques

Pendant les essais, les conditions météorologiques locales en termes de force et direction du vent, température et humidité extérieure ainsi que la pression atmosphérique sont enregistrées toutes les cinq minutes à l'aide d'une station portative placée à proximité de la cellule d'essais sans pour autant être influencée par les effets de l'incendie.

3. ESSAI 0 – CONFIGURATION SANS BOIS

3.1. CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai 0 s'est déroulé le 29/07/2021 entre 14h15 et 16h25. Avec un temps ensoleillé et faiblement nuageux (1015 hPa), la température extérieure fut de 24°C pour une humidité relative de 58% avec une légère brise d'Est de 6km/h. Des paravents furent mis en place à deux mètres à l'Est et à l'Ouest de la hotte pour éviter les effets du vent.

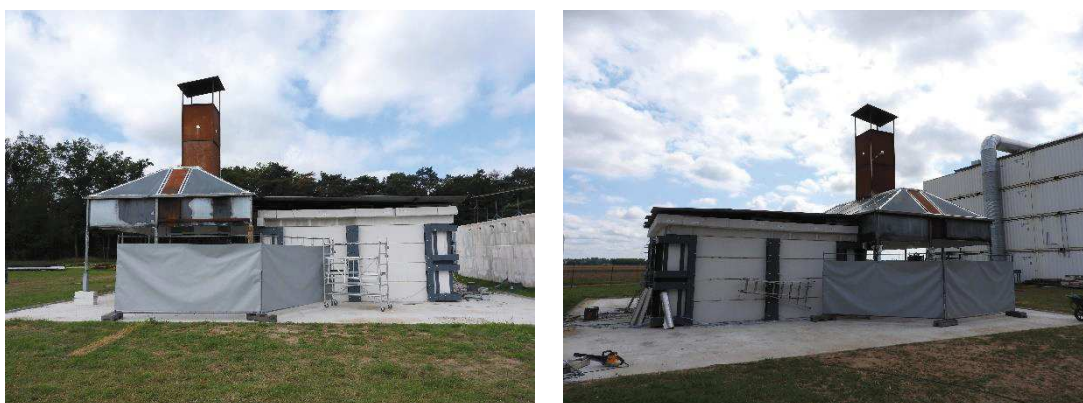


Figure 3-1 : Mise en place des paravents devant les faces Est et Ouest de la hotte pendant l'Essai 0

Cet essai sans structure bois implique un foyer primaire de 8 bûchers de 633 kg de bois (Épicéa), répartis en 4 bûchers, soit 297kg, sur la plateforme de pesée Est et en 4 bûchers, soit 334 kg, sur la plateforme de pesée Ouest. Cette masse de bois correspond à une densité de charge d'environ de 350MJ/m² sur la base d'une chaleur de combustion de bois sec de 16,2MJ/kg et d'une humidité relative moyenne du bois des bûchers de 15%.

L'ignition des bûchers est réalisée au moyen de deux bacs de 30cm x 30cm contenant 1,5L d'heptane et placés chacun au centre de 4 bûchers sur chacune des plateformes de pesée. Ils sont allumés au moyen d'une perche enflammée à son extrémité depuis les ouvertures Sud.



Figure 3-2 : Bûchers mis en place pour l'essai 0 et allumage des bacs d'heptane par boutefeu

Pour cet essai, seules deux caméras au Sud et Sud-Ouest sont employées.

3.2. DÉROULÉ DE L'ESSAI (OBSERVATIONS)

Il faut attendre deux à trois minutes après allumage des bacs pour que tous les bûchers soient bien enflammés. Un pic d'incendie semble être atteint au bout de 10 à 12 minutes.



Figure 3-3 : Phase de démarrage et de développement de l'incendie (Essai 0) 0 à 10min

Pendant une durée de 10 minutes après l'atteinte de ce pic, le feu paraît pleinement développé avec un régime stationnaire. Des flammes extérieures d'environ 1 m de long sortent par les deux ouvertures Sud sur un tiers de la hauteur de chaque ouverture.



Figure 3-4 : Phase d'incendie pleinement développé (Essai 0) 10 à 20min



Figure 3-5 : Flammes extérieures sortant par les ouvertures Sud (Essai 0) 10 à 15min

Après 20 minutes d'essai, le feu décroît petit à petit pour s'éteindre au bout de 60 minutes après combustion de la totalité du bois des bûchers.

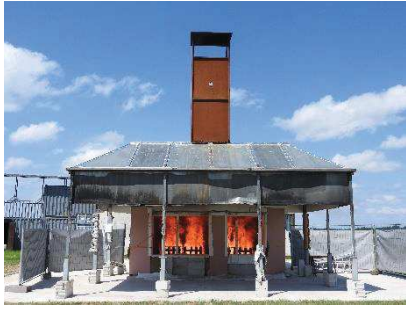


Figure 3-6 : Phase d'extinction de l'incendie (Essai 0) 20 à 50min

3.3. RÉSULTATS DES MESURES

3.3.1. Températures ambiantes

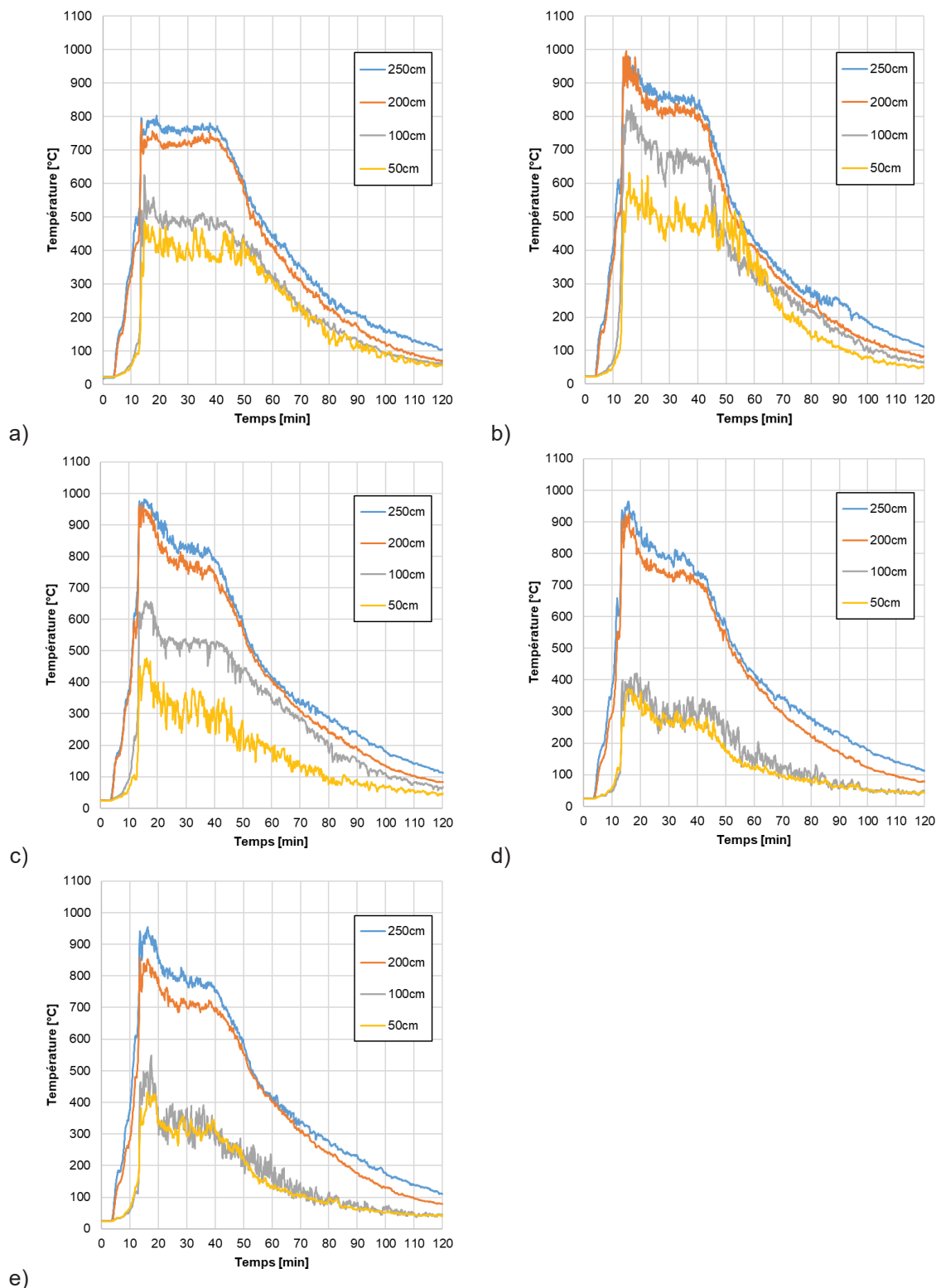


Figure 3-7 : Évolution temporelle des températures dans l'enceinte de la maquette (Essai 0)
 a) Ligne 1, b) Ligne 2, c) Ligne 3, d) Ligne 4, e) Ligne 5

Les évolutions de la température ambiante dans la cellule d'essais montrent une nette stratification entre une zone très chaude au-dessus de 2 m de haut et une zone plus froide en-dessous de 1 m. La ligne verticale 2

au centre de la cellule présente toujours les températures les plus élevées. La ligne verticale 1 au fond présente les températures en partie haute les moins élevées, mais en partie basse se sont les lignes 4 et 5 devant les ouvertures qui présentent les températures les moins élevées. Ainsi en partie haute la température atteint près de 1000°C pour redescendre vers 700 à 800°C pendant la phase établie de l'incendie. En partie basse, la température varie de 400 à 500°C au cœur de la cellule et de 300 à 400°C devant les ouvertures.

3.3.2. Flux thermiques

Pour cet essai, seuls les fluxmètres au plafond (PT5 et PT2) et sur la paroi Est (PT7 et PT8) ont été employés. On notera ainsi un pic de flux radiatif incident de 100 kW/m² au plafond. Il n'est que de 61 kW/m² à une hauteur de 2 m en paroi et de 54 kW/m² en partie basse.

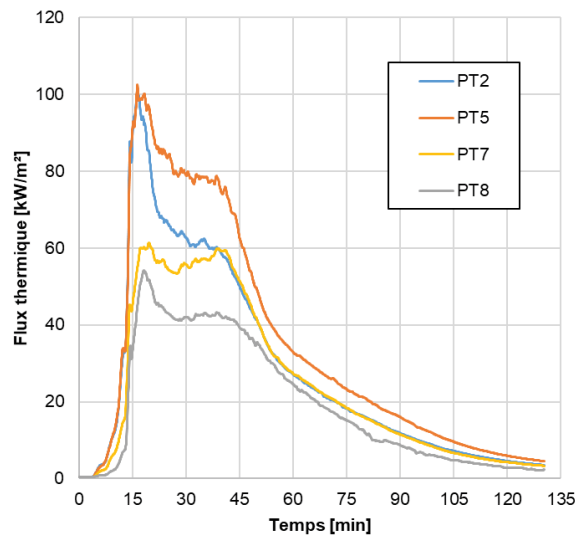


Figure 3-8 : Évolution temporelle des flux thermiques aux parois et plafond (Essai 0)

3.3.3. Mesures aux ouvertures

Les mesures de température et de vitesse aux ouvertures Sud de la cellule d'essais montrent bien un flux sortant en partie haute et un flux entrant en partie basse. Si les niveaux de température sont proche entre les deux ouvertures, les vitesses sur la petite ouverture sont un peu plus rapides et très fluctuantes.

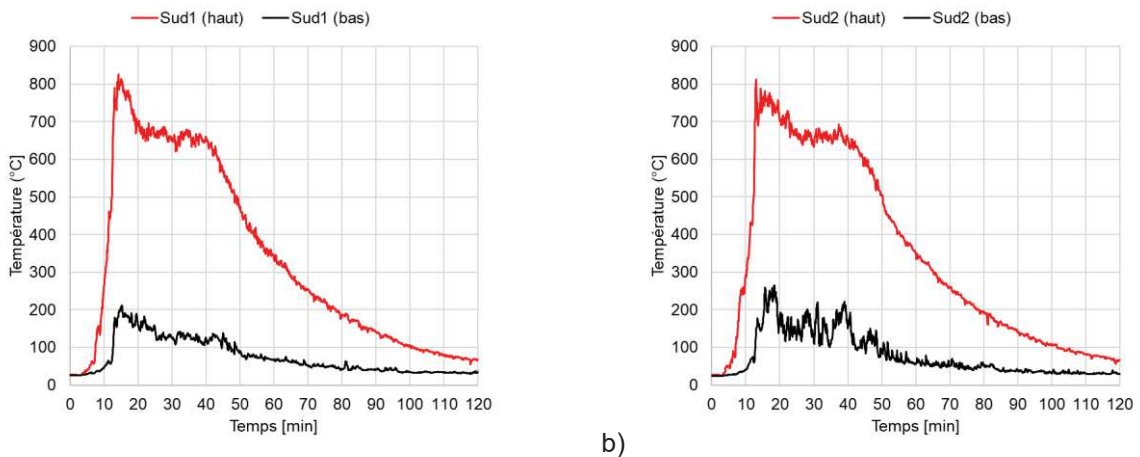
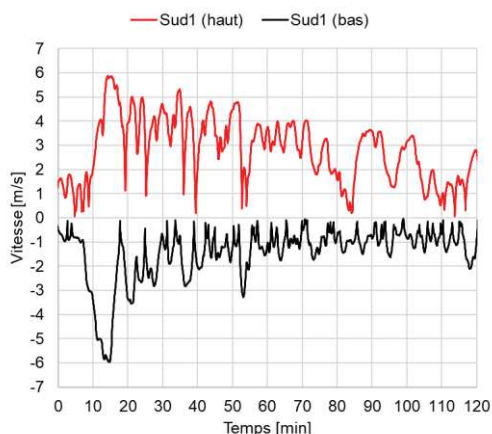
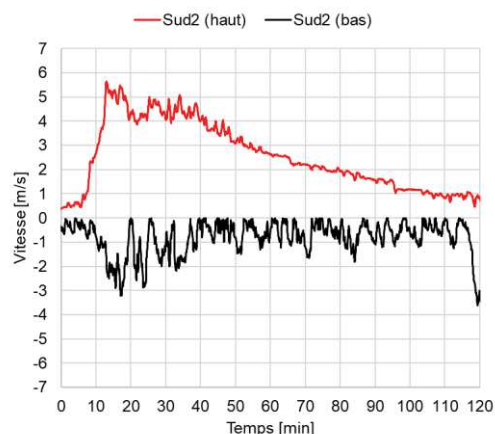


Figure 3-9 : Évolution temporelle des températures au niveau des ouvertures Sud pendant l'essai 0
 a) grande ouverture (Sud1) ; b) petite ouverture (Sud2)



a)



b)

Figure 3-10 : Évolution temporelle des vitesses au niveau des ouvertures Sud pendant l'essai 0
 a) grande ouverture (Sud1) ; b) petite ouverture (Sud2)

3.3.4. Perte de masse

La perte de masse est de 215kg de bois pour les 4 bûchers à l'Est et de 283 kg de bois pour les 4 bûchers à l'Ouest., soit un total de 498kg de bois, représentant 78% de la masse initiale de bois. Après plus de 120 minutes d'essai, il reste une masse de 133 kg de cendres et charbons au total.

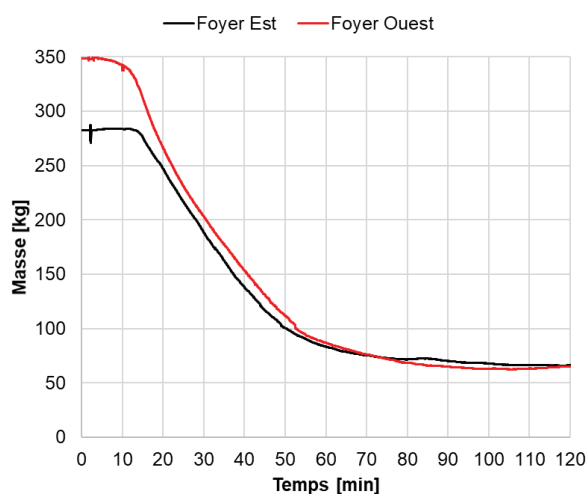


Figure 3-11 : Évolution temporelle de la perte de masse pour les deux plateformes de pesée (Essai 0)

3.3.5. Débit calorifique

Le pic de débit calorifique du foyer est de 4961 kW atteint 13 minutes après l'allumage. L'intensité décroît ensuite rapidement sur 10 minutes pour atteindre un semblant de plateau entre 3000 kW et 2500kW pendant 20 minutes. Enfin, s'ensuit une décroissance lente sur 80 minutes pour atteindre l'extinction du foyer faute de combustible.

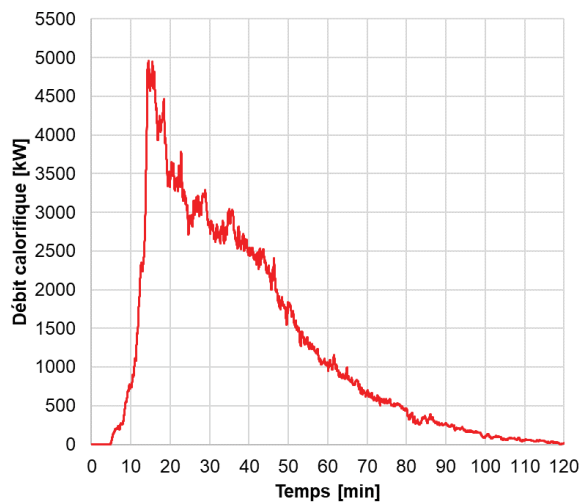


Figure 3-12 : Évolution temporelle du débit calorifique libérée dans la cellule d'essais (Essai 0)

4. ESSAI 1 – CONFIGURATION PAROI CLT MUF

4.1. CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai 1 avec une paroi en CLT colle MUF s'est déroulé le 27/10/2021 entre 13h55 et 17h00 correspondant à la combustion du foyer primaire. Aucune action d'extinction sur le foyer primaire et la paroi CLT n'a été réalisée pendant et après essai. Les mesures de température ont perduré jusqu'au lendemain matin 09h30.



Figure 4-1 : Vue intérieure et extérieure de la paroi CLT avec colle MUF (Essai 1)

L'essai a démarré avec un temps couvert et fini avec un temps clair (982 hPa). La température extérieure fut de 16°C pour une humidité relative de 59% avec une légère brise de SSE, NNE et Est de 6km/h. Aucun paravent ne fut mis en place, mais les rideaux autour de la hotte furent descendus jusqu'à 150cm de haut.

Cet essai implique un foyer primaire de 16 bûchers de 1775 kg de bois (Épicéa), répartis en 8 bûchers, soit 875kg, sur la plateforme de pesée Est et en 8 bûchers, soit 900 kg, sur la plateforme de pesée Ouest. Cette masse de bois correspond à une densité de charge d'environ 968MJ/m², sur la base d'une chaleur de combustion de bois sec de 16,2MJ/kg et d'une humidité relative moyenne du bois des bûchers de 20,8%.

L'ignition des bûchers est réalisé au moyen de récipients circulaires de 20 à 30cm de diamètre contenant de 1,5 à 2,5L d'heptane respectivement et placés sous les 6 bûchers avant (Sud) sur chacune des plateformes de pesée. Ils sont allumés au moyen d'une perche enflammée à son extrémité depuis les ouvertures Sud et des mèches en fil de coton ou fibres de bois imbibées de distillat de pétrole. Du fait du fort taux d'humidité du bois des bûchers, l'équivalent de 1,5L de fuel rouge a été vaporisé sur les bûchers avant l'essai afin de faciliter l'embrasement généralisé du foyer primaire.



Figure 4-2 : Bûchers pour l'essai 1 avec repérage des bacs d'heptane et allumage au boutefeu

Des relevés juste avant l'essai en différents points indiquent une humidité relative de la face intérieure des panneaux de CLT en épicéa de l'ordre de 14% ±2%.

Remarque importante : Il s'agissait du dernier essai de la campagne. Aussi de nombreux équipements et l'instrumentation suite aux quatre précédents incendies importants, étaient endommagés et n'ont pas correctement fonctionné lors de cet ultime essai. Autre conséquence, un défaut électrique a coupé l'enregistrement entre 65 et 90 minutes d'essai.

4.2. DÉROULÉ DE L'ESSAI (OBSERVATIONS)

Une minute après allumage des bacs, les bûchers concernés sont bien enflammés. Il faut environ 5 minutes supplémentaires pour que tous les bûchers soient tous en feu, et que la paroi CLT s'enflamme à son tour quelques secondes plus tard. L'incendie devient alors très intense et dure avec cette intensité jusqu'à 40 minutes. À partir de ce moment le foyer primaire commence à décroître. Mais la paroi CLT est toujours en feu et la chaleur est très soutenue à l'intérieur de la cellule d'essais. Après 80 minutes l'incendie baisse fortement du fait de l'extinction du foyer primaire faute de combustible. Après 85 minutes, la paroi CLT commence à s'éteindre d'elle-même (auto-extinction) sur les zones courantes.



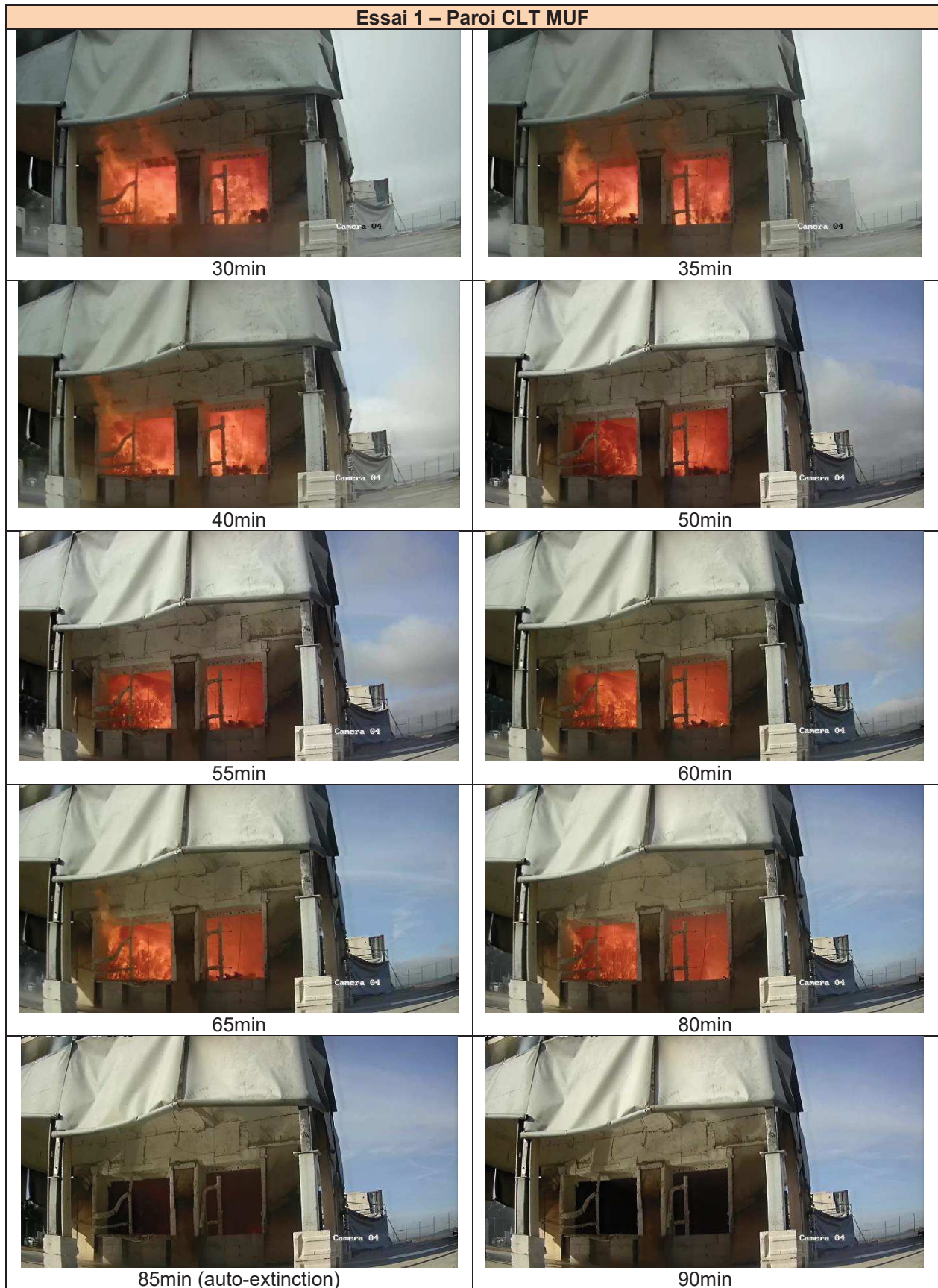


Figure 4-3 : Prises de vue depuis la caméra Sud-Ouest lors de l'Essai 1 sur 90minutes

Si on regarde en détail l'inflammation de la paroi CLT, on constate que celle-ci a lieu sur toute sa largeur à partir d'une hauteur d'environ 1000 mm au-dessus du sol. Les gaz de pyrolyse produits s'enflamment rapidement au contact des flammes des bûchers. La contribution de la paroi CLT conduit à créer de longues flammes extérieures sur l'ouverture Sud1 à proximité d'une longueur de 2000 mm sur près de la moitié de la hauteur de l'ouverture.



Figure 4-4 : Détails de l'inflammation de la paroi CLT MUF lors de l'Essai 1 sur 30secondes

Des morceaux de bûchers enflammés tombés au sol le long de la paroi CLT permettent en ces points un certain auto-entretien localisé de la paroi CLT. Des petites flammes perdurent pendant une vingtaine de minutes. On constate alors qu'un passage d'air se crée au niveau des planches de connexion des panneaux CLT après disparition du mastic silicone, favorisant l'entretien de bois CLT braisant en ces points, alors que le reste des panneaux s'est éteint.



Figure 4-5 : Fin de l'Essai 1 (fin de combustion des bûchers et auto-extinction de la paroi CLT MUF)

4.3. RÉSULTATS DES MESURES

4.3.1. Températures ambiantes

Au regard du grand nombre de dysfonctionnement des thermocouples, seul un graphe unique de l'évolution temporelle des températures dans la cellule d'essais est présenté. Au plus fort de l'incendie, les températures varient entre 700°C et 1100°C selon la hauteur. Le thermocouple à 50 cm du sol est fortement impacté par le feu des bûchers.

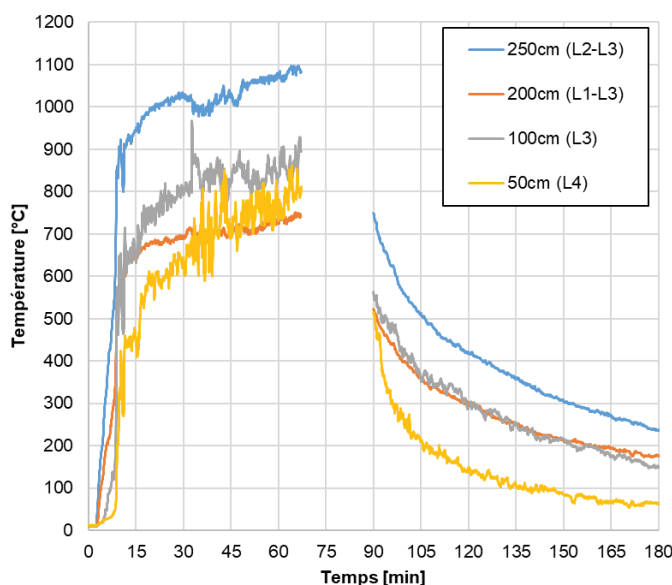


Figure 4-6 : Évolution temporelle des températures dans l'enceinte de la maquette (Essai 1) – repérage des lignes de mesure exploitables

4.3.2. Flux thermiques

Les mesures de flux thermiques au-delà de 55 minutes n'ont pu être exploitées.

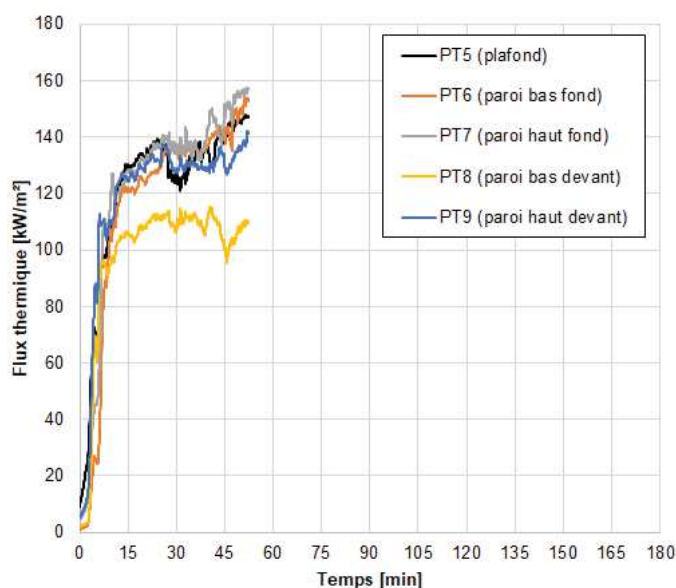


Figure 4-7 : Évolution temporelle des flux thermiques au plafond (béton cellulaire protégé) et sur la paroi CLT (Essai 1)

Les évolutions du flux thermique au plafond et sur la paroi CLT sont très proches en variant de 120 à 155 kW/m² pendant la phase de feu généralisé. Seul le PT en partie basse à proximité d'une ouverture au Sud montre un flux thermique plus réduit de 100 kW/m². C'est le PT à 200 cm de haut sur la paroi CLT et au fond de la cellule qui présente l'agression la plus importante.

4.3.3. Mesures aux ouvertures

Les mesures de température et de vitesse aux ouvertures Sud de la cellule d'essais montrent bien un flux sortant en partie haute et un flux entrant en partie basse. Les niveaux de température sont proches entre les deux ouvertures, et du même niveau que la température intérieure à 200cm de haut. Les vitesses sortantes sont les plus importantes pour la grande ouverture située à côté de la paroi CLT.

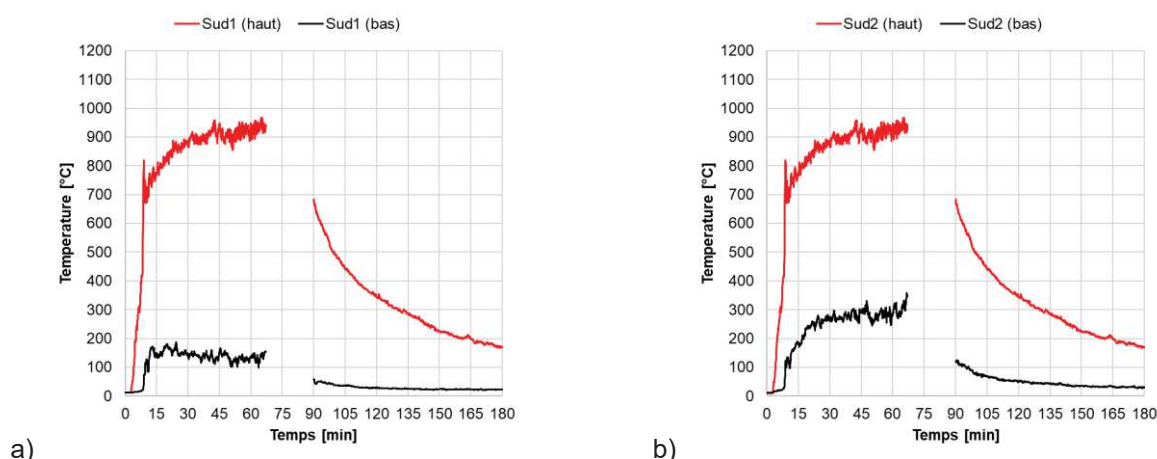


Figure 4-8 : Évolution temporelle des températures au niveau des ouvertures Sud pendant l'essai 1
 a) grande ouverture Sud1 ; b) petite ouverture Sud2

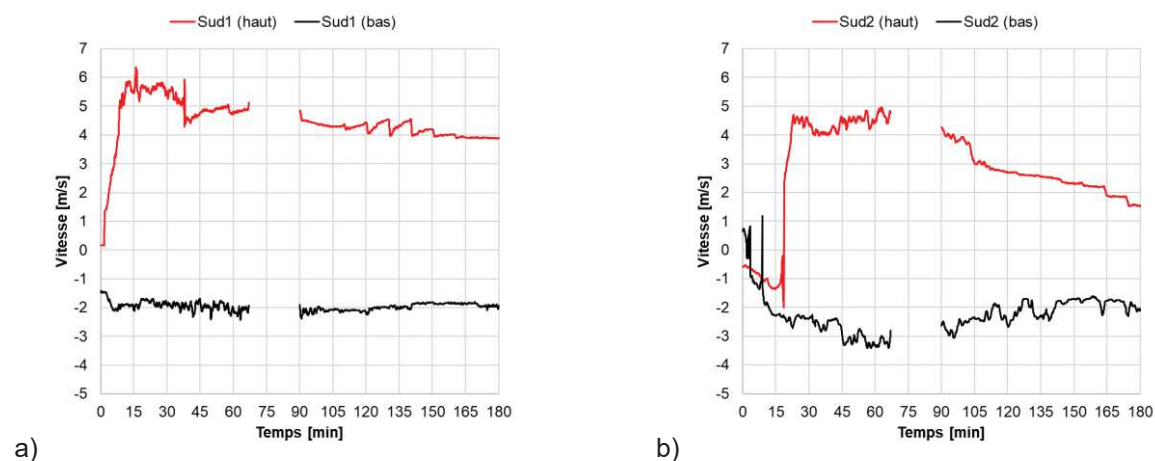


Figure 4-9 : Évolution temporelle des vitesses au niveau des ouvertures Sud pendant l'essai 1
 a) grande ouverture Sud1 ; b) petite ouverture Sud2

4.3.4. Perte de masse

La mesure de perte de masse n'est pas exploitable après 60 minutes d'essai. Sur cette période la perte de masse est de 556kg de bois pour les 8 bûchers à l'Est et de 664 kg de bois pour les 8 bûchers à l'Ouest, soit un total de 1210kg de bois, représentant 68% de la masse initiale de bois. La perte de masse et sa vitesse (pente) sont plus importantes à l'Ouest du côté de la paroi CLT.

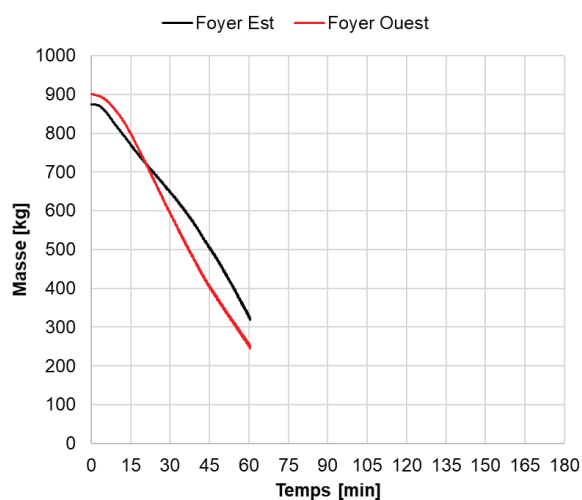


Figure 4-10 : Évolution temporelle de la perte de masse pour les deux plateformes de pesée (Essai 1)

4.3.5. Débit calorifique

La mesure de puissance n'est pas exploitable après 60 minutes d'essai. Le pic de débit calorifique de l'incendie comprenant d'une part le foyer primaire de 16 bûchers de bois et d'autre part la paroi CLT d'environ 14,4m², est de 9300 kW atteint 21 minutes après l'allumage. Ensuite, après une phase stationnaire de 20 minutes autour d'une valeur de 9000kW, l'intensité du feu décroît.

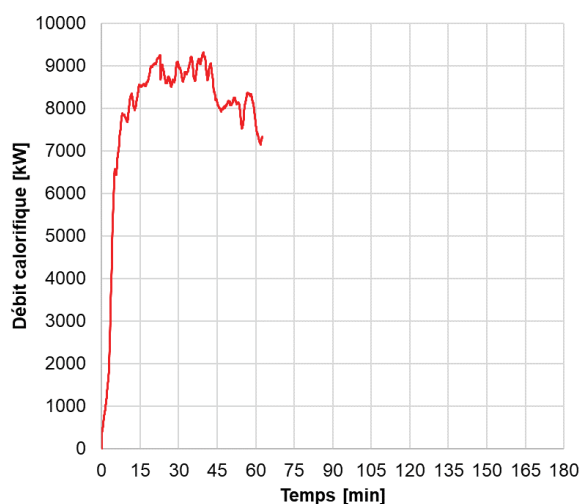


Figure 4-11 : Évolution temporelle du débit calorifique libérée dans la hotte (Essai 1)

4.3.6. Température dans les panneaux CLT

Les mesures au point S4 (cf. Figure 2-26) n'ont fonctionné qu'à partir de 95 minutes d'essai et ne sont utilisables que pour l'analyse du refroidissement du bois. Pour les autres localisations, les mesures de température dans les panneaux de bois CLT montrent l'atteinte d'un critère de carbonisation de 300°C à 40 et 85 mm de profondeur pour ces trois localisations. Dans tous les points de mesure, la température ne dépasse pas 100°C sur les 180 minutes d'essai à 130 mm de profondeur.

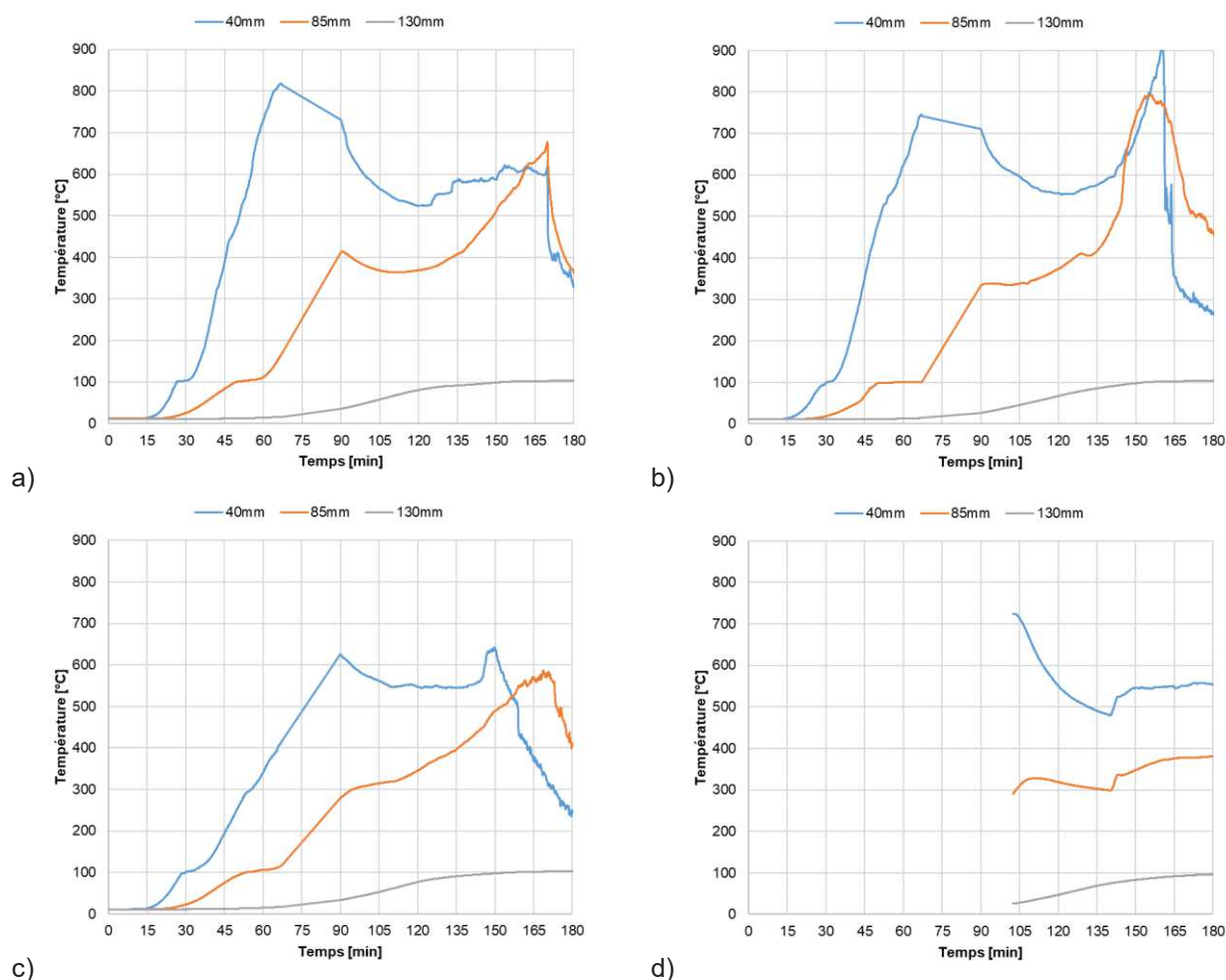


Figure 4-12 : Évolution temporelle de la température à différentes profondeurs et localisations des panneaux CLT (Essai 1) - a) S1 (bas Nord) b) S2 (haut Nord) c) S3 (Bas Sud) d) S4 (Haut Sud)

4.3.7. Relevés d'épaisseur de carbonisation

Quelques jours après l'essai, des échantillons de CLT de 400mm x 400mm ont été découpés dans les panneaux CLT en six localisations de la paroi, notamment en lieu et place des quatre points de mesure dans le bois et deux positions aux mêmes hauteurs et dans l'axe médian de la paroi.

Les épaisseurs de carbonisation varient entre 50 mm et 130 mm. Les échantillons S1 et S4 présentent les épaisseurs les plus marquées. La plupart des échantillons présentent les 2 à 3 plis extérieurs sains sans marque de carbonisation.

Épaisseur [mm]	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Minimale	75	60	60	50	60	54
Moyenne	98	88	80	85	75	75
Maximale	125	102	95	130	85	92

Figure 4-13 : Relevés d'épaisseur de carbonisation [mm] de la paroi CLT pour les six échantillons prélevés (Essai 1)

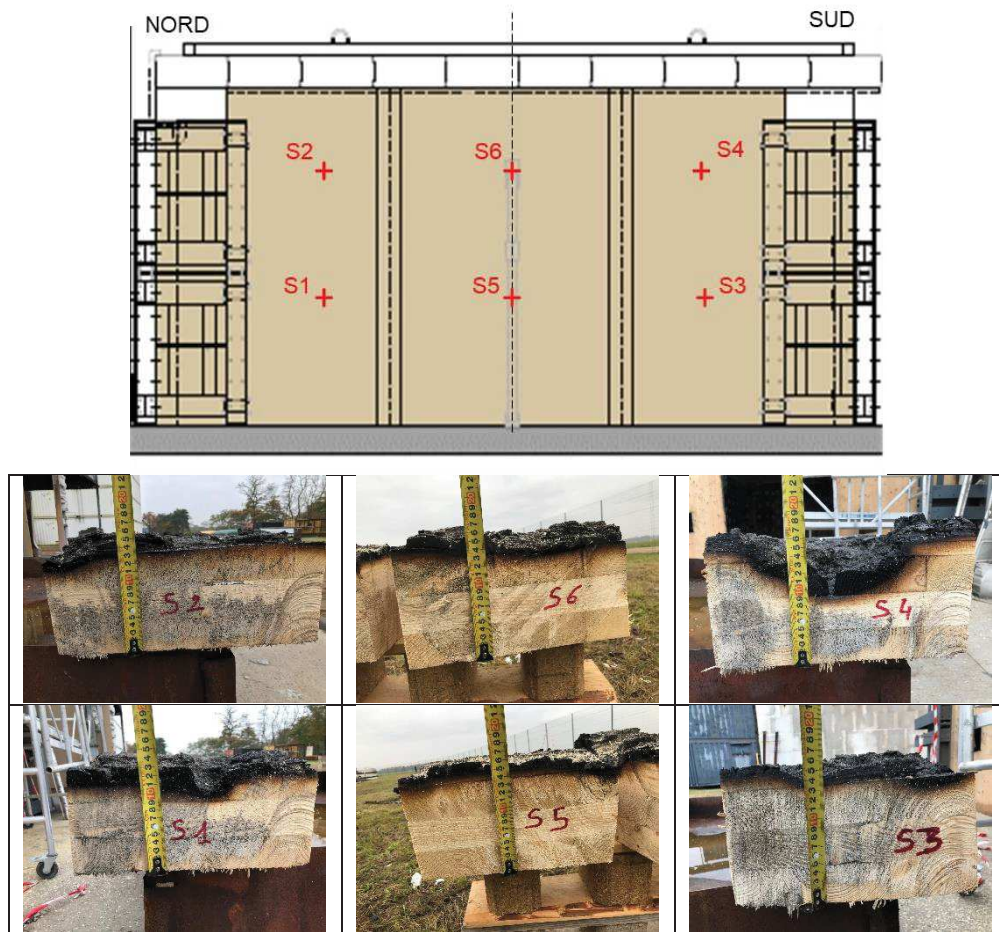


Figure 4-14 : Localisation et relevés d'épaisseur de carbonisation sur la paroi CLT après Essai 1

5. ESSAI 2 – CONFIGURATION PLAFOND CLT MUF

5.1. CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai 2 avec un plafond en panneaux CLT colle MUF s'est déroulé le 30/09/2021 entre 13h50 et 16h00 correspondant à la combustion du foyer primaire. Aucune action d'extinction sur le foyer primaire et le plafond CLT n'a été réalisée pendant et après l'essai. Les mesures de température ont perduré jusqu'au lendemain matin 10h00.



Figure 5-1 : Vue du montage et intérieur du plafond CLT avec colle MUF (Essai 2)

L'essai a démarré avec un temps couvert et fini avec un temps clair (998 hPa). La température extérieure fut de 15°C pour une humidité relative de 61% avec une légère brise de Nord et Nord-Ouest de 7km/h. Aucun paravent ne fut mis en place, mais les rideaux autour de la hotte furent descendus jusqu'à 150cm de haut.

Cet essai implique un foyer primaire de 16 bûchers de 1464 kg de bois (Épicéa), répartis en 8 bûchers, soit 735kg, sur la plateforme de pesée Est et en 8 bûchers, soit 729 kg, sur la plateforme de pesée Ouest. Cette masse de bois correspond à une densité de charge d'environ 809 MJ/m², sur la base d'une chaleur de combustion de bois sec de 16,2MJ/kg et d'une humidité relative moyenne du bois des bûchers de 15,2%.

L'ignition des bûchers est réalisée au moyen de récipients circulaires de 20 à 30cm de diamètre contenant de 1,5 à 2,5L d'heptane respectivement et placés sous les trois bûchers avant (Sud) en quinconce sur chacune des plateformes de pesée. Ils sont allumés au moyen d'une perche enflammée à son extrémité depuis les ouvertures Sud et des mèches en fil de coton ou fibres de bois imbibées de distillat de pétrole.



Figure 5-2 : Bûchers pour l'essai 2 et repérage des départs de feu

Cet essai comprend en plus des ouvertures au Sud, des ouvertures en façade Est et Ouest. Ces dernières sont restées sommairement fermées par rideaux pendant 5 minutes environ au début de l'essai pour reproduire un effet de bris de vitrage et créer un certain confinement favorable à la montée en température à l'intérieur de la cellule d'essais et obtenir un embrasement généralisé du foyer primaire.

Des relevés juste avant l'essai en différents points indiquent une humidité relative de la face inférieure des panneaux de CLT en épicéa de l'ordre de 15% ±2%.

5.2. DÉROULÉ DE L'ESSAI (OBSERVATIONS)

Une minute après allumage des bacs, les bûchers concernés sont bien enflammés. Il faut environ 3 min30s pour que le plafond CLT s'enflamme alors que tous les bûchers ne sont pas encore en feu. La contribution du plafond conduit rapidement à leur embrasement. L'incendie devient alors très intense et dure avec cette intensité jusqu'à 40 minutes. À partir de ce moment le foyer primaire commence à décroître. On observe un début de l'auto-extinction du plafond CLT avec une forte décroissance des flammes sous celui-ci au bout de 53 minutes d'essai alors que le feu du foyer primaire est encore assez important. Les deux sources d'incendie décroissent ensuite peu à peu ensemble jusqu'à 70minutes pour s'éteindre définitivement, le foyer primaire par manque de combustible, le plafond CLT par auto-extinction.





Figure 5-3 : Prises de vue depuis la caméra Sud-Ouest lors de l'Essai 2 sur 70minutes

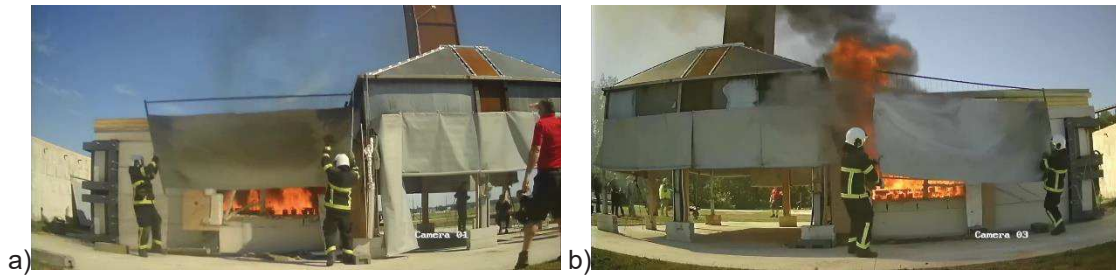


Figure 5-4 : Retrait des rideaux aux ouvertures a) Ouest et b) Est lors de l'Essai 2 (t=3min30s)

L'inflammation du plafond CLT démarre à l'avant (Sud) de la cellule derrière le meneau de la façade entre les deux ouvertures Sud.



Figure 5-5 : Détails de l'inflammation du plafond CLT MUF lors de l'Essai 2

Les flammes qui sortent par les ouvertures Est et ouest au plus fort de l'incendie sont massives, mais d'une hauteur modérée (1000 mm environ). Les fumées sont noires avec des flammes de couleur orangées traduisant un manque d'oxygénation du feu.



Figure 5-6 : Sorties des flammes aux ouvertures a) Ouest et b) Est lors de l'Essai 2

À la fin de l'essai, il n'y a plus de combustible sur les plateformes de pesée, et le plafond CLT ne présente pas d'incandescence sur les zones courantes, mais des cas très faibles dans les coins Nord-Est et Sud-Est. On notera également l'échappement de vapeur d'eau derrière le plafond CLT en façade Nord par les orifices créés par les chanfreins.



Figure 5-7 : Fin de l'Essai 2 (fin de combustion des bûchers et auto-extinction du plafond CLT MUF)



Figure 5-8 : Sortie de vapeur d'eau par les chanfreins des panneaux CLT en façade Nord (Essai 2)

5.3. RÉSULTATS DES MESURES

5.3.1. Températures ambiantes

Les mesures des lignes verticales dans le plan médian de la cellule d'essais montrent des niveaux de température homogènes sur toute la hauteur variant de 800°C à 1100°C. Les lignes verticales devant les ouvertures Sud présentent quant à elle une nette stratification entre une zone très chaude au-dessus de 2 m de haut, variant de 800°C à 1100°C, et une zone plus froide en-dessous de 1 m, en-dessous de 600°C. La mesure à 250cm de haut et devant la grande ouverture Sud n'a pas fonctionné de 45 à 92 min.

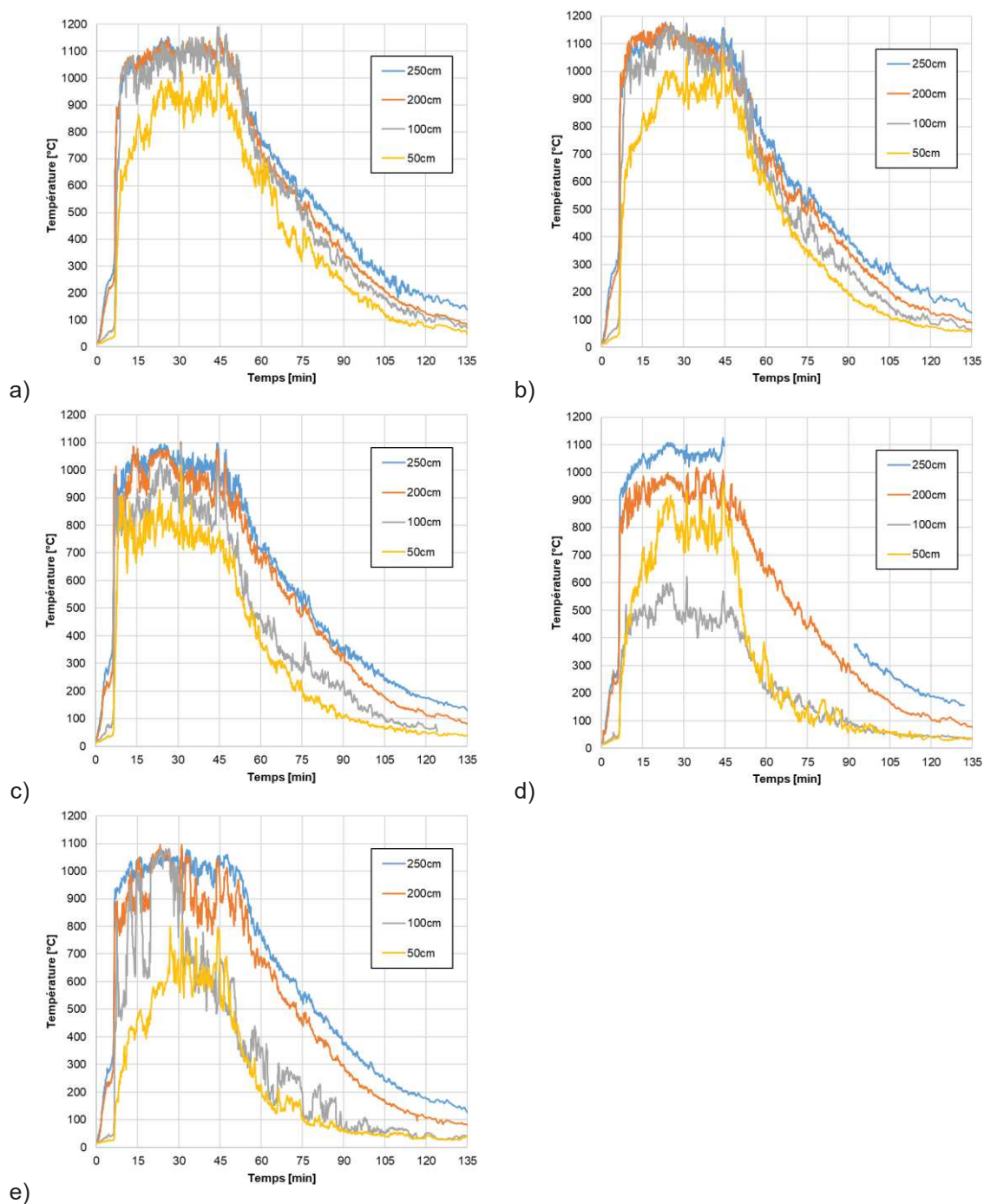
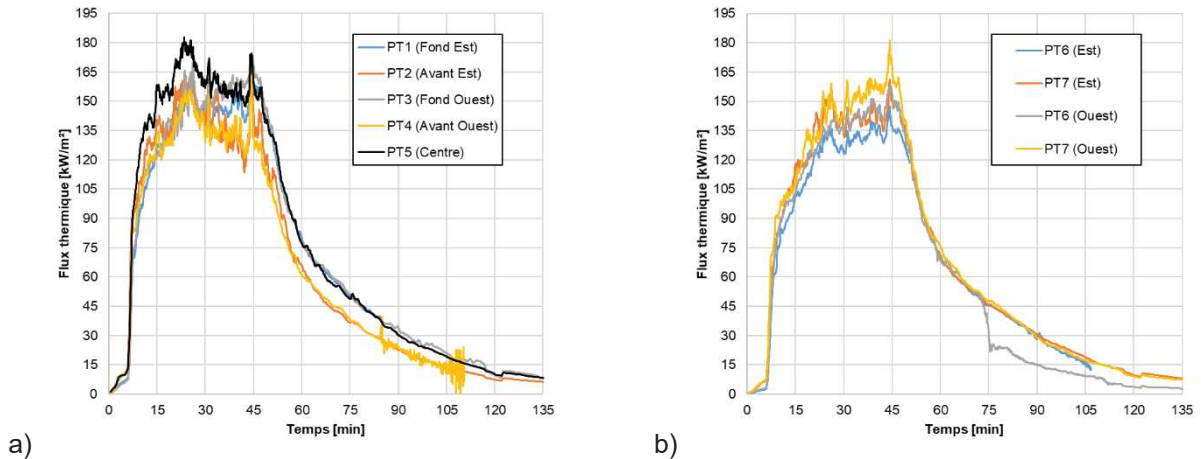


Figure 5-9 : Évolution temporelle des températures dans l'enceinte de la maquette (Essai 2)
 a) Ligne 1, b) Ligne 2, c) Ligne 3, d) Ligne 4, e) Ligne 5

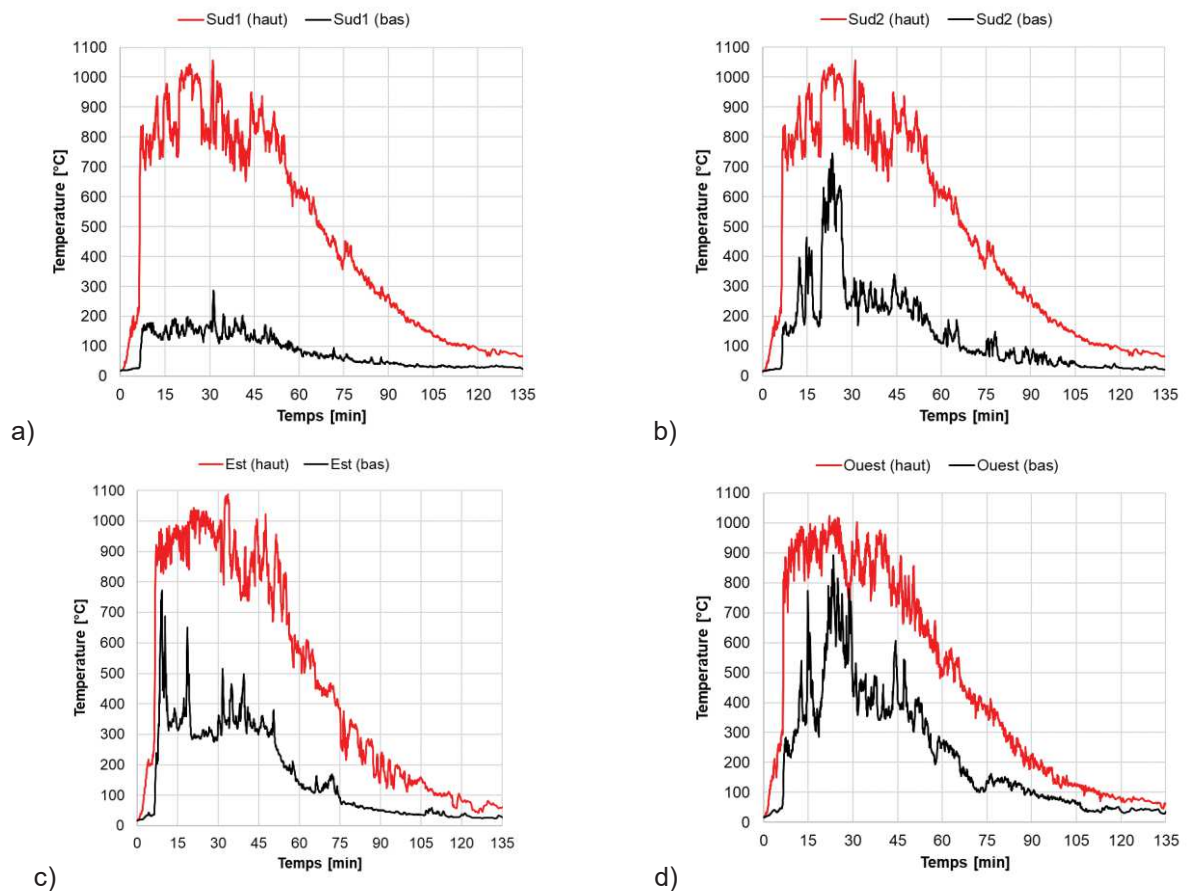
5.3.2. Flux thermiques

Les évolutions du flux thermique au plafond et sur la paroi CLT sont très proches en variant de 135 à 165 kW/m² pendant la phase de feu généralisé. Le PT au centre du plafond présente malgré tout les valeurs les plus élevées avec un pic à 182 kW/m². C'est le PT à 100 cm de haut sur la paroi Est et au fond de la cellule qui présente l'agression la plus faible avec un maximum à 145kW/m².



**Figure 5-10 : Évolution temporelle des flux thermiques
 a) au plafond CLT et b) aux parois béton avec habillage plâtre (Essai 2)**

5.3.1. Mesures aux ouvertures



**Figure 5-11 : Évolution temporelle des températures au niveau des ouvertures pendant l'essai 2
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest**

Les mesures de température et de vitesse aux ouvertures de la cellule d'essais montrent bien un flux sortant en partie haute et un flux entrant en partie basse. Les niveaux de température sont proches entre les différentes ouvertures, et du même niveau que la température intérieure à 200cm de haut des lignes verticales devant les ouvertures Sud. Les vitesses sortantes sont les plus importantes pour les ouvertures Sud. Les vitesses entrantes sur les ouvertures latérales Est et Ouest sont très fluctuantes car plus sensibles aux effets du vent extérieur.

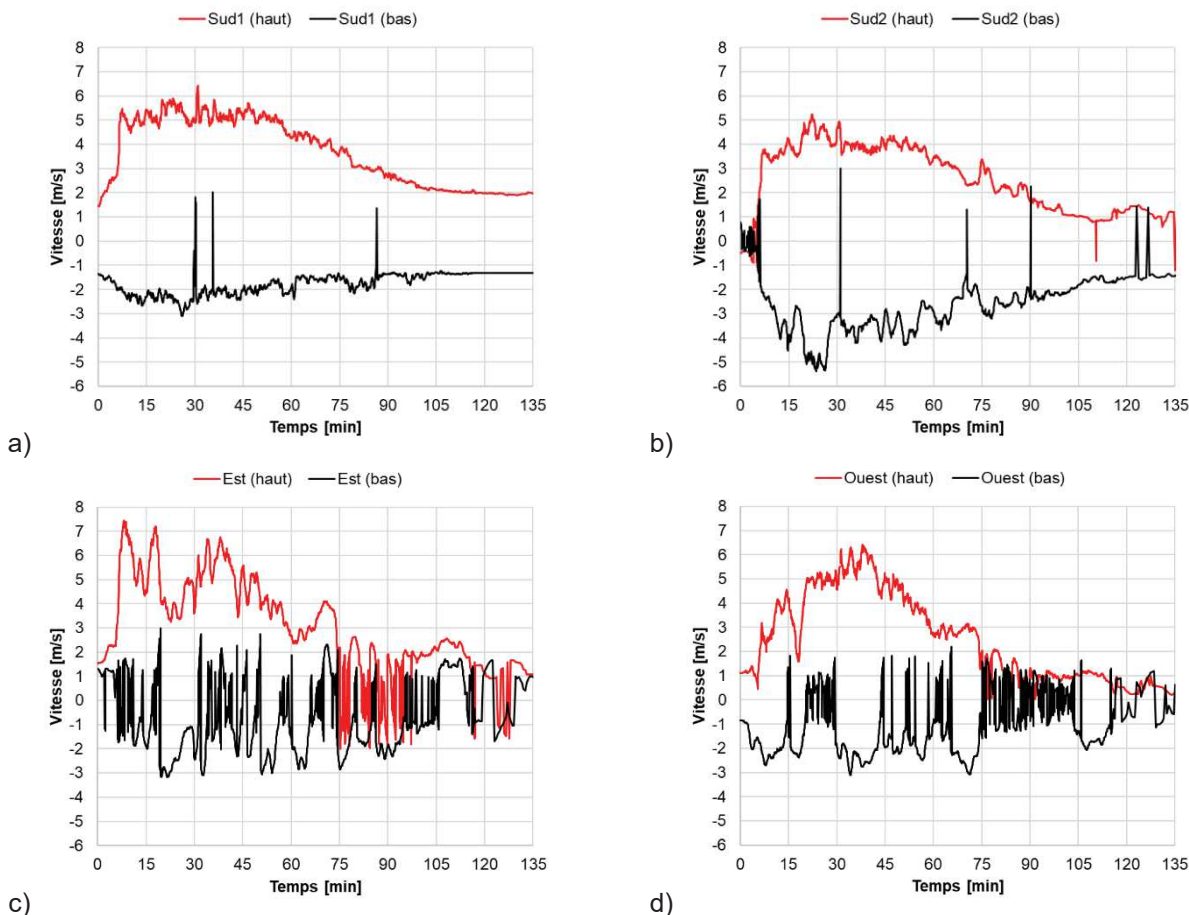


Figure 5-12 : Évolution temporelle des vitesses au niveau des ouvertures pendant l'essai 2
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest

5.3.2. Perte de masse

La perte de masse est de 638kg de bois pour les 8 bûchers à l'Est et de 625 kg de bois pour les 8 bûchers à l'Ouest, soit un total de 1263kg de bois, représentant 86% de la masse initiale de bois. Un peu avant 120 minutes d'essai, il reste sur chaque balance environ 100 kg de cendres et charbons.

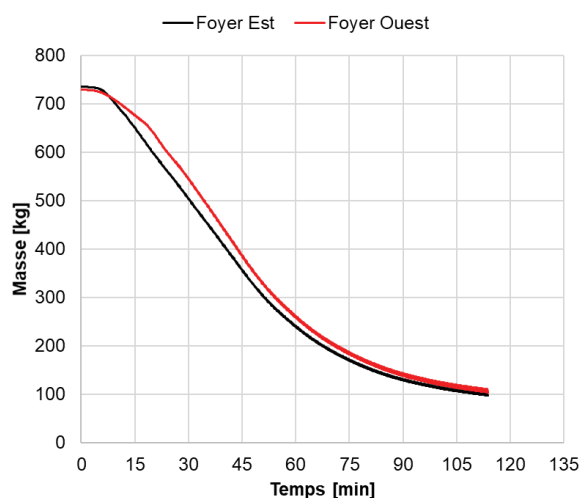


Figure 5-13 : Évolution temporelle de la perte de masse pour les deux plateformes de pesée (Essai 2)

5.3.3. Débit calorifique

Le débit calorifique mesuré dans la cheminée de la hotte ne comprend que la libération de l'énergie du foyer primaire et du plafond CLT sortant par les ouvertures au Sud de la cellule d'essais. Cette puissance atteint un pic de 6000kW après 8 minutes d'essais. Ensuite, après une phase stationnaire d'environ 30 minutes, l'intensité du feu décroît sur 60 minutes.

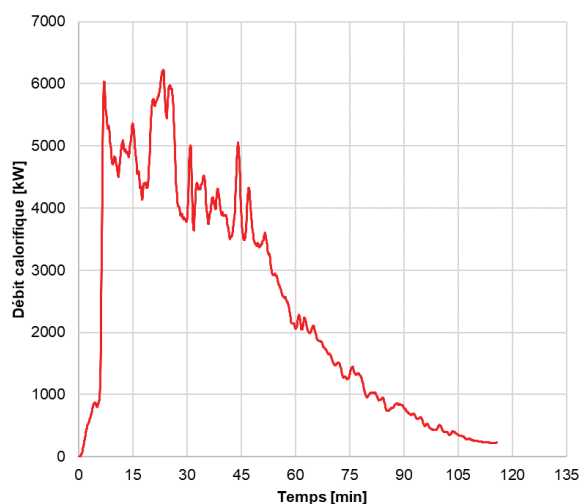


Figure 5-14 : Évolution temporelle du débit calorifique libérée via les ouvertures Sud (Essai 2)

5.3.4. Température dans les panneaux CLT

Les mesures de température dans les panneaux de bois CLT montrent l'atteinte d'un critère de carbonisation de 300°C à 22,5 et 45 mm de profondeur pour les localisations S2 et S3, au centre et au fond de la cellule d'essais. Au point S1 devant la grande ouverture Sud et l'ouverture Ouest, le critère n'est pas atteint entre le premier et second pli à 45 mm. Dans tous les points de mesure, la température ne dépasse pas 100°C sur les 135 minutes d'essai à 90 mm de profondeur.

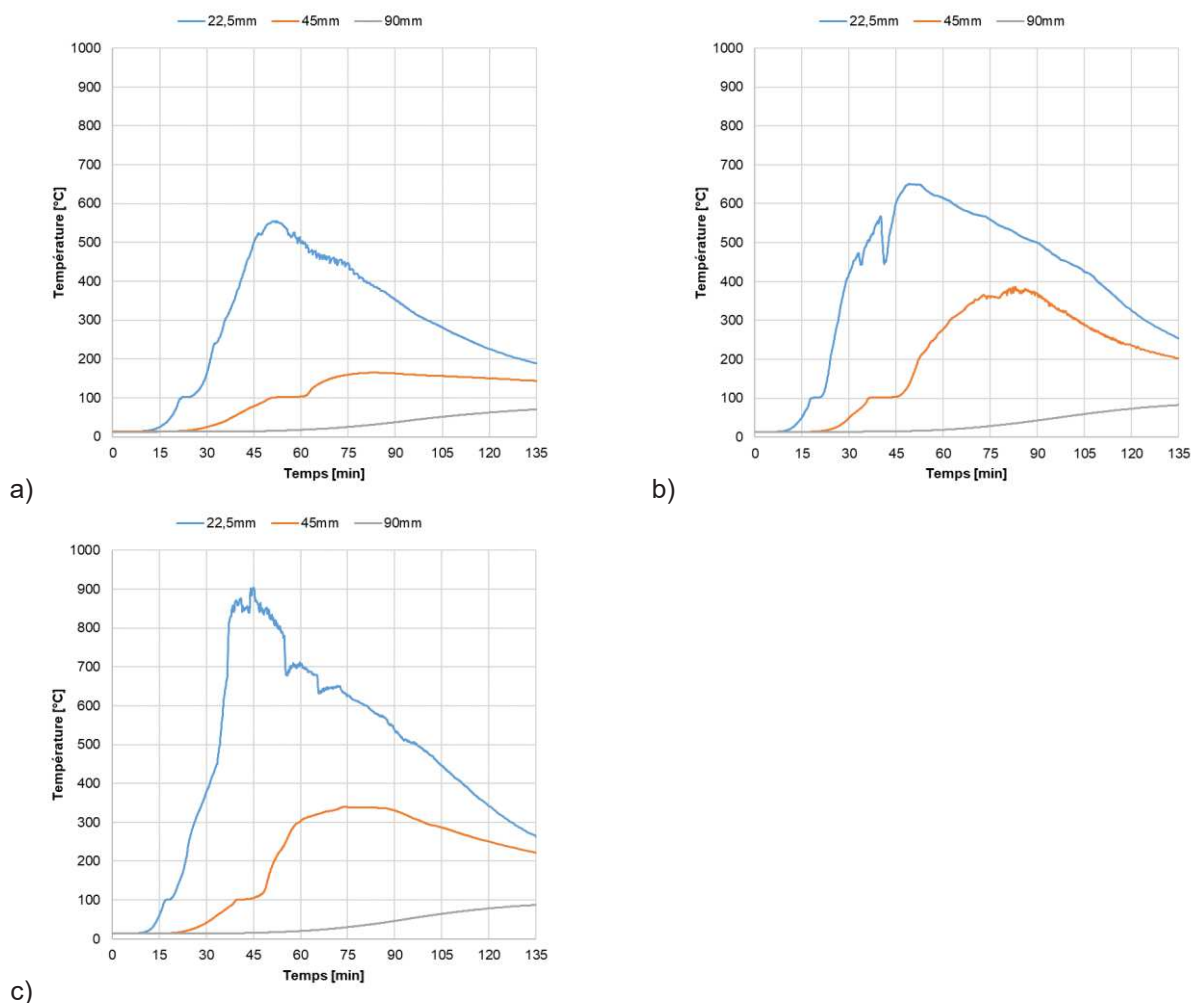


Figure 5-15 : Évolution temporelle de la température à différentes profondeurs et localisations des panneaux CLT (Essai 2) - a) S1 ; b) S2 ; c) S3

5.3.5. Relevés d'épaisseur de carbonisation

Quelques jours après l'essai, des échantillons de CLT de 400mm x 400m ont été découpés dans les panneaux du plafond aux trois localisations S1, S2 et S3.

Les épaisseurs de carbonisation varient entre 32 mm et 58 mm. La plupart des échantillons présentent les 3 à 4 plis extérieurs sains sans marque de carbonisation. Les échantillons S2 et S3 présentent les épaisseurs les plus marquées. L'échantillon S1 situé le plus près d'une ouverture Sud présente les plus faibles épaisseurs de carbonisation.

Épaisseur [mm]	S1	S2	S3
Minimale	32	42	42
Moyenne	40	51	50
Maximale	45	58	55

Figure 5-16 : Relevés d'épaisseur de carbonisation [mm] du plafond CLT colle MUF pour les trois échantillons de prélèvement (Essai 2)

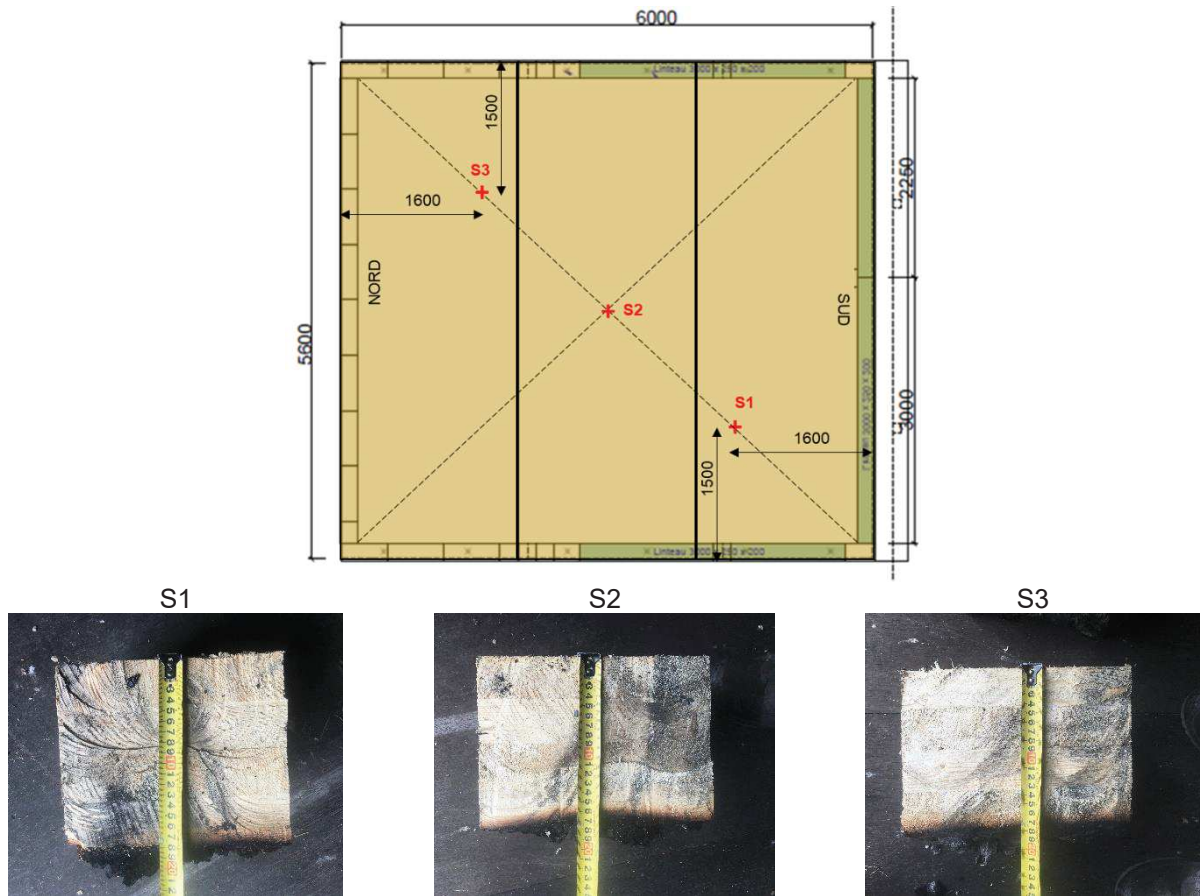


Figure 5-17 : localisation et relevés d'épaisseur de carbonisation du plafond CLT après Essai 2

6. ESSAI 3 – CONFIGURATION POTEAUX-POUTRES LAMELLÉ-COLLÉ

6.1. CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai 3 avec un poteau et des poutres en bois lamellé-collé (BLC) s'est déroulé le 21/09/2021 entre 13h25 et 15h55 correspondant à la combustion du foyer primaire. Aucune action d'extinction sur le foyer primaire et le bois LC n'a été réalisée pendant et après l'essai. Les mesures de température ont perduré jusqu'au lendemain matin 08h00.



Figure 6-1 : Vue du poteau et des poutres BLC de l'Essai 3

L'essai a démarré avec un temps légèrement nuageux (1022 hPa). La température extérieure fut de 17°C pour une humidité relative de 89% avec une très légère brise de NNE et Est de 3km/h. Aucun paravent ne fut mis en place, mais les rideaux autour de la hotte furent descendus jusqu'à 150cm de haut.

Cet essai implique un foyer primaire de 16 bûchers de 1441 kg de bois (Épicéa), répartis en 8 bûchers, soit 708kg, sur la plateforme de pesée Est et en 8 bûchers, soit 732 kg, sur la plateforme de pesée Ouest. Cette masse de bois correspond à une densité de charge d'environ 795 MJ/m², sur la base d'une chaleur de combustion de bois sec de 16,2MJ/kg et d'une humidité relative moyenne du bois des bûchers de 16,2%.

L'ignition des bûchers est réalisée au moyen de récipients circulaires de 20 à 30cm de diamètre contenant de 1,5 à 2,5L d'heptane respectivement et placés sous quatre bûchers en quinconce sur chacune des plateformes de pesée. Ils sont allumés au moyen d'une perche enflammée à son extrémité depuis les ouvertures Sud et des mèches en fil de coton ou fibres de bois imbibées de distillat de pétrole.



Figure 6-2 : Bûchers pour l'essai 3 et repérage des départs de feu

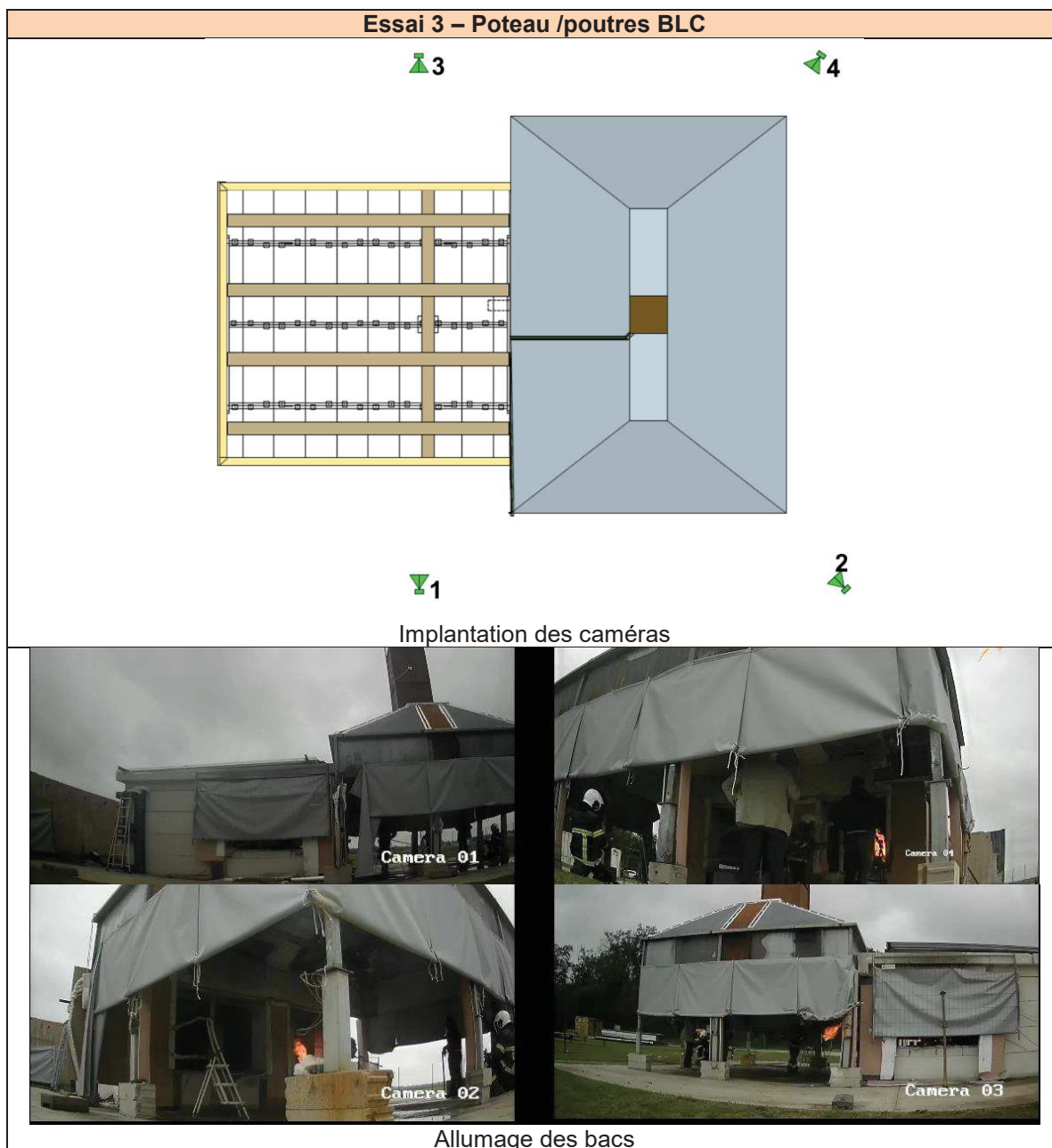
Cet essai comprend en plus des ouvertures Sud, des ouvertures en façade Est et Ouest. Ces dernières sont restées sommairement fermées par rideaux pendant 5 minutes environ au début de l'essai pour reproduire un effet de bris de vitrage et créer un certain confinement favorable à la montée en température à l'intérieur de la cellule d'essais et obtenir un embrasement généralisé du foyer primaire.

Des relevés juste avant l'essai en différents points indiquent une humidité relative de la face intérieure des solives et poteau en épicéa de l'ordre de 18% ±2%.

Remarque : une première tentative d'essai avait échoué le 16/09/2021 faute d'inflammation généralisée des bûchers de bois. L'essai avait alors été avorté. Les faibles impacts de suies et de début de carbonisation sur les solives et le poteau ont été légèrement poncées afin de conserver la même structure pour l'essai du 21/09/2021.

6.2. DÉROULÉ DE L'ESSAI (OBSERVATIONS)

Une minute après allumage des bacs, les bûchers concernés sont bien enflammés. Il faut environ 5 minutes supplémentaires pour que tous les bûchers soient bien en feu. L'implication (inflammation) des poutres et du poteau intervient 7,5 minutes après l'allumage. L'incendie croit alors rapidement pour atteindre un pic vers 10 minutes. Le feu est alors très intense et dure avec cette intensité jusqu'à 35 à 40 minutes. À partir de ce moment le feu commence à décroître. La diminution de la combustion des poutres et du poteau semble simultanée à la décroissance du foyer primaire. Au bout de 55 minutes, les deux sources s'éteignent : le foyer primaire par manque de combustible, et le feu de poutres et poteau par auto-extinction. On constate même que les poutres s'éteignent avant les bûchers.



Essai 3 – Poteau /poutres BLC



t=0 inflammation des bûchers



5min



7,5min (inflammation du poteau et poutres BLC)

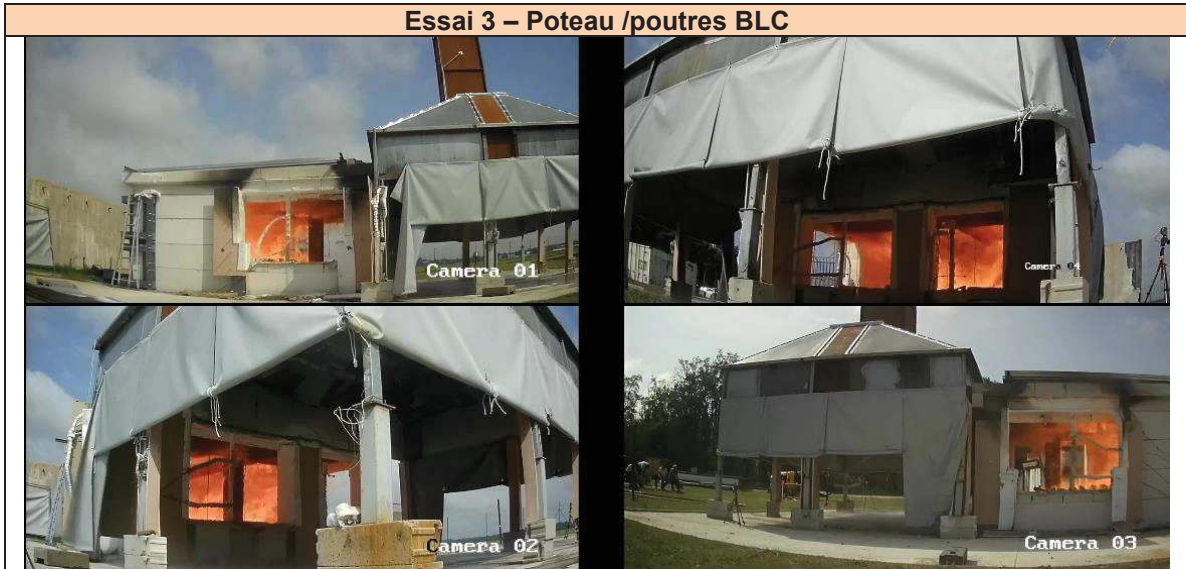
Essai 3 – Poteau /poutres BLC



Essai 3 – Poteau /poutres BLC



Essai 3 – Poteau /poutres BLC



40min



45min



50min



Figure 6-3 : Prises de vue depuis les caméras fixes lors de l'Essai 3 sur 60minutes

On constate que l'inflammation du bois de structure a débuté par le poteau en partie basse côté Ouest, puis une entretoise au-dessus du même côté, pour rapidement impliquer l'ensemble du bois de structure.



Figure 6-4 : Détail de l'inflammation du poteau et entretoise lors de l'Essai 3

Les flammes extérieures au niveau des ouvertures sont importantes (1500 mm de longueur environ) au moment du feu généralisé. Elles produisent peu de suie et fumées.



Figure 6-5 : Sorties de flammes aux ouvertures a) Sud ; b) Ouest et c) Est lors de l'Essai 3

À la fin de l'essai 3, les bûchers du foyer primaire sont totalement épuisés et les poutres et poteau se sont éteintes



**Figure 6-6 : Fin de l'Essai 3
 (fin de combustion des bûchers et auto-extinction
 des poutres/poteau BLC)**

6.3. RÉSULTATS DES MESURES

6.3.1. Températures ambiantes

Les mesures des lignes verticales au fond de la cellule d'essais montrent des niveaux de température homogènes sur toute la hauteur variant de 900°C à 1100°C. Les lignes verticales avant présentent quant à elles une nette stratification entre une zone chaude au-dessus de 2 m de haut, variant de 700°C à 1000°C, et une zone plus froide en-dessous de 1 m, en-dessous de 600°C. La mesure à 50cm de haut au fond de la cellule d'essais n'a pas fonctionné 40 minutes d'essai.

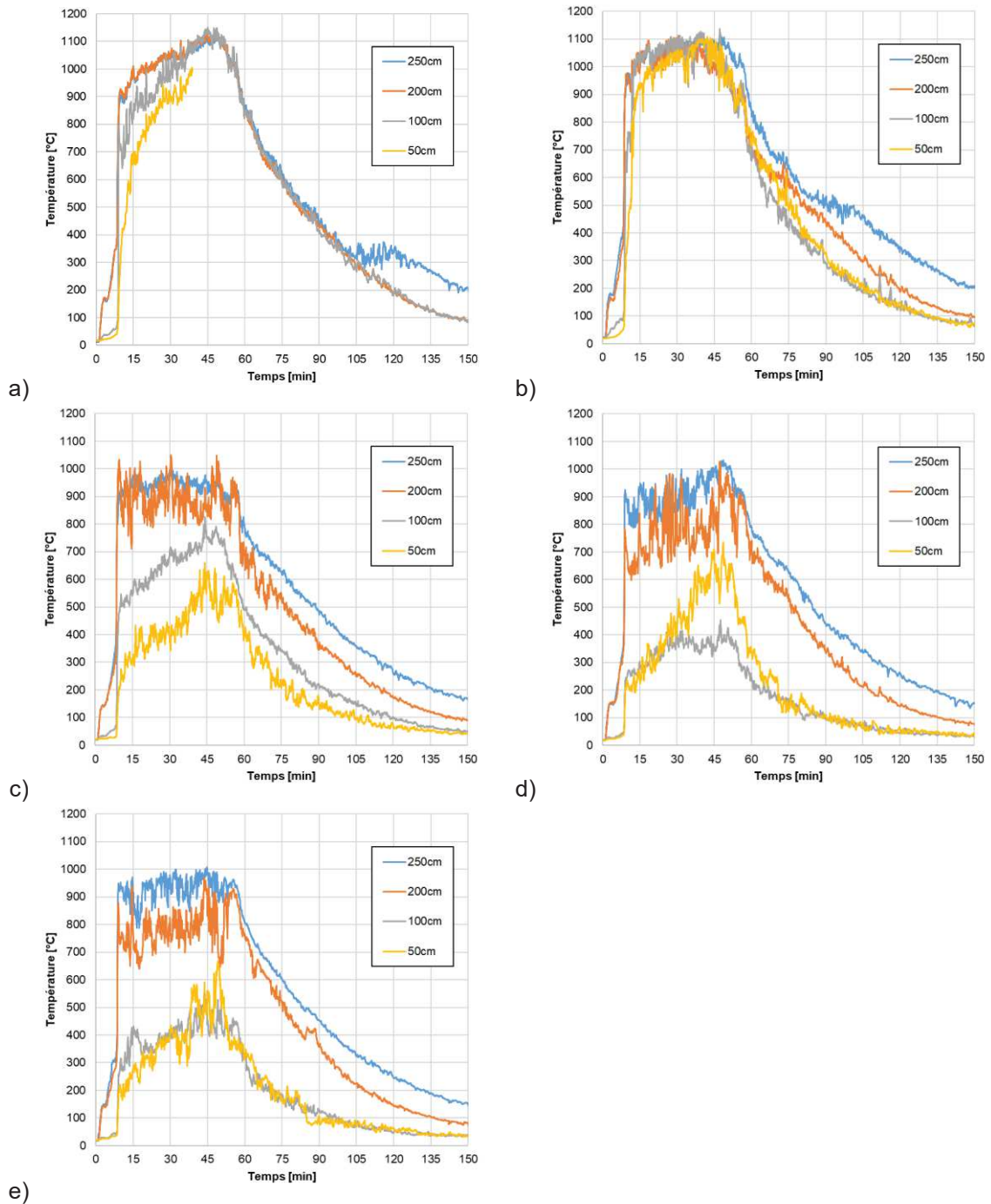


Figure 6-7 : Évolution temporelle des températures dans l'enceinte de la maquette (Essai 3)
 a) Ligne 1, b) Ligne 2, c) Ligne 3, d) Ligne 4, e) Ligne 5

6.3.2. Flux thermiques

Au plafond, les flux thermiques sont les plus élevés au fond de la cellule d'essais avec des pics à 160kW/m². Au contraire, les flux thermiques les moins élevés autour de 135 kW/m² en pic sont devant les ouvertures Sud. Au centre du plafond, une valeur intermédiaire de 140 kW/m² est obtenue. Sur les parois, les flux thermiques les plus élevés de l'ordre de 155kW/m² sont en partie haute, mais ils restent inférieurs à ceux obtenus sous plafond.

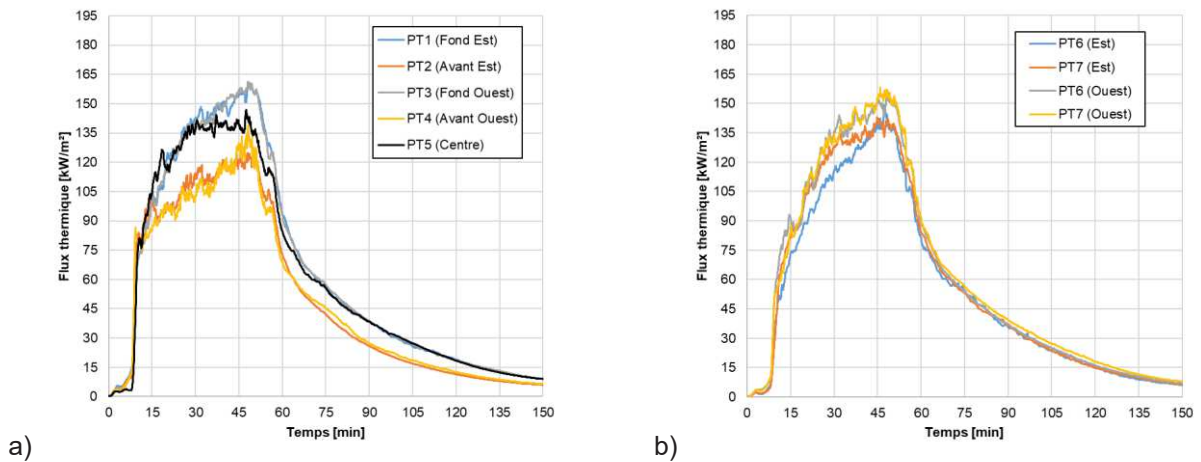


Figure 6-8 : Évolution temporelle des flux thermiques
 a) au plafond et b) aux parois (Essai 3)

6.3.3. Mesures aux ouvertures

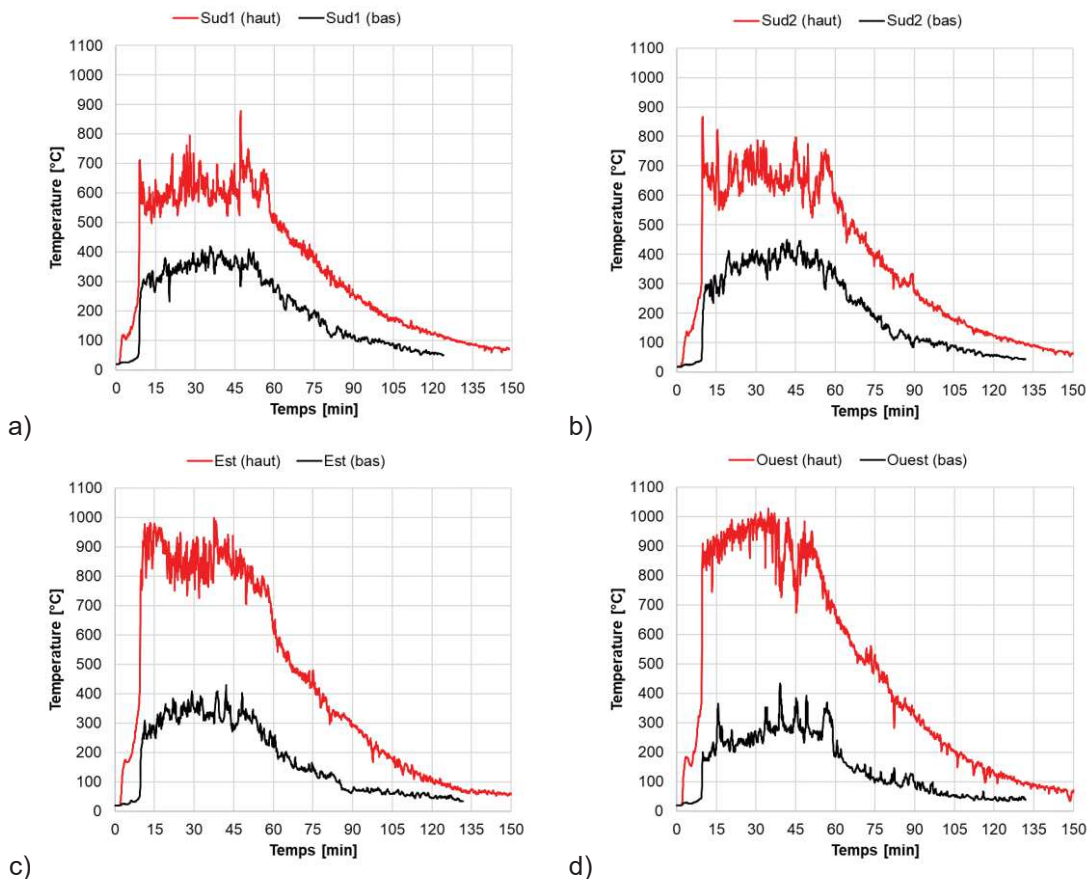


Figure 6-9 : Évolution temporelle des températures au niveau des ouvertures pendant l'essai 3
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest

Les mesures de température et de vitesse aux ouvertures de la cellule d'essais montrent bien un flux sortant en partie haute et un flux entrant en partie basse. Les niveaux de température de couche chaude sont moins élevés pour les ouvertures au Sud que pour les ouvertures Est et Ouest, avec près de 400°C de différence. Ces différences se retrouvent sur les magnitudes de vitesses sortantes, notamment à l'Est.

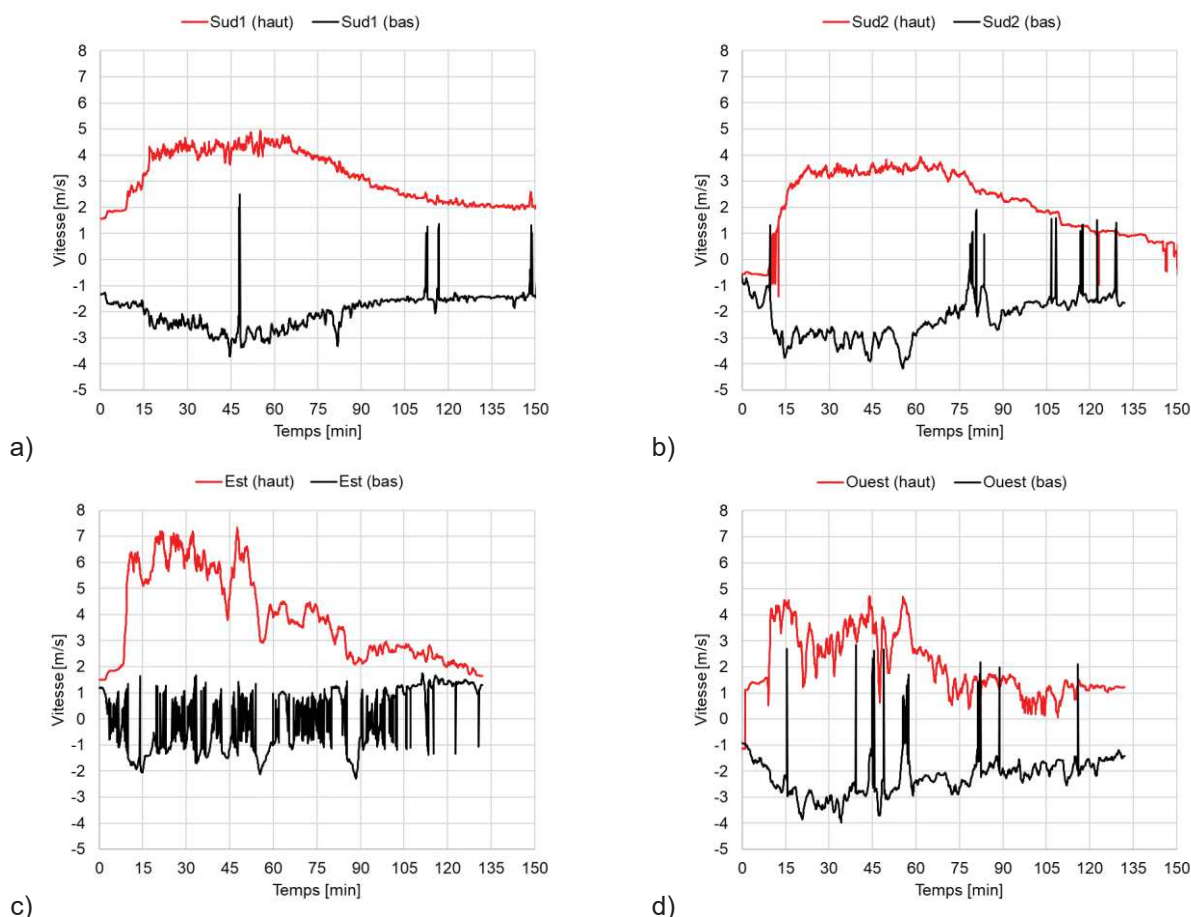


Figure 6-10 : Évolution temporelle des vitesses au niveau des ouvertures pendant l'essai 3
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest

6.3.4. Perte de masse

La perte de masse est de 463kg de bois pour les 8 bûchers à l'Est et de 532 kg de bois pour les 8 bûchers à l'Ouest, soit un total de 995 kg de bois, représentant 70% de la masse initiale de bois. Après 150 minutes d'essai, il reste sur chaque balance environ 200 à 240 kg de cendres et charbons.

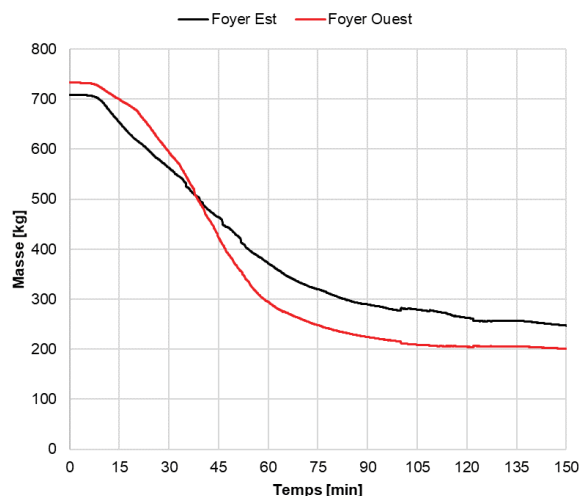


Figure 6-11 : Évolution temporelle de la perte de masse pour les deux plateformes de pesée (Essai 3)

6.3.5. Débit calorifique

Le débit calorifique mesuré dans la cheminée de la hotte ne comprend que la libération de l'énergie du foyer primaire et du bois LC sortant par les ouvertures au Sud de la cellule d'essais. Cette puissance atteint un pic de 4000kW après 8 minutes d'essais. Ensuite, après une phase stationnaire d'environ 40 minutes autour d'une valeur de 2500kW, l'intensité du feu décroît sur 75 minutes.

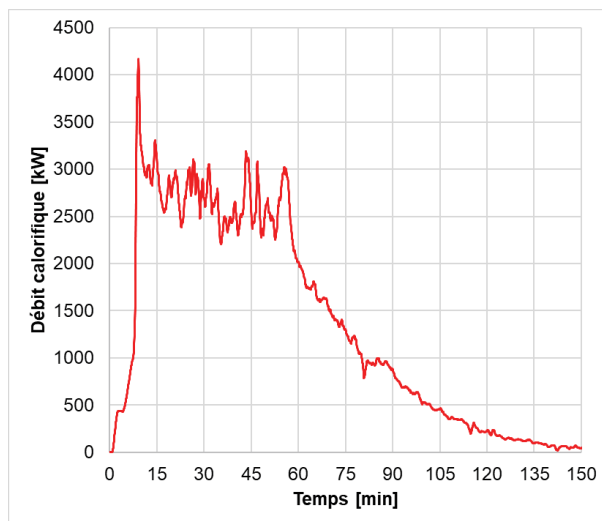


Figure 6-12 : Évolution temporelle du débit calorifique libérée via les ouvertures Sud (Essai 3)

6.3.6. Température dans les poutres et poteau LC

Les mesures de température dans les solives en BLC montrent l'atteinte d'un critère de carbonisation de 300°C à 15 mm de profondeur pour les trois localisations, mais à 30 mm de profondeur uniquement pour les points S1 et S2. Pour tous les points de mesure des solives, la température à 150 mm de profondeur dépasse légèrement 100°C au bout de 150 minutes d'essai.

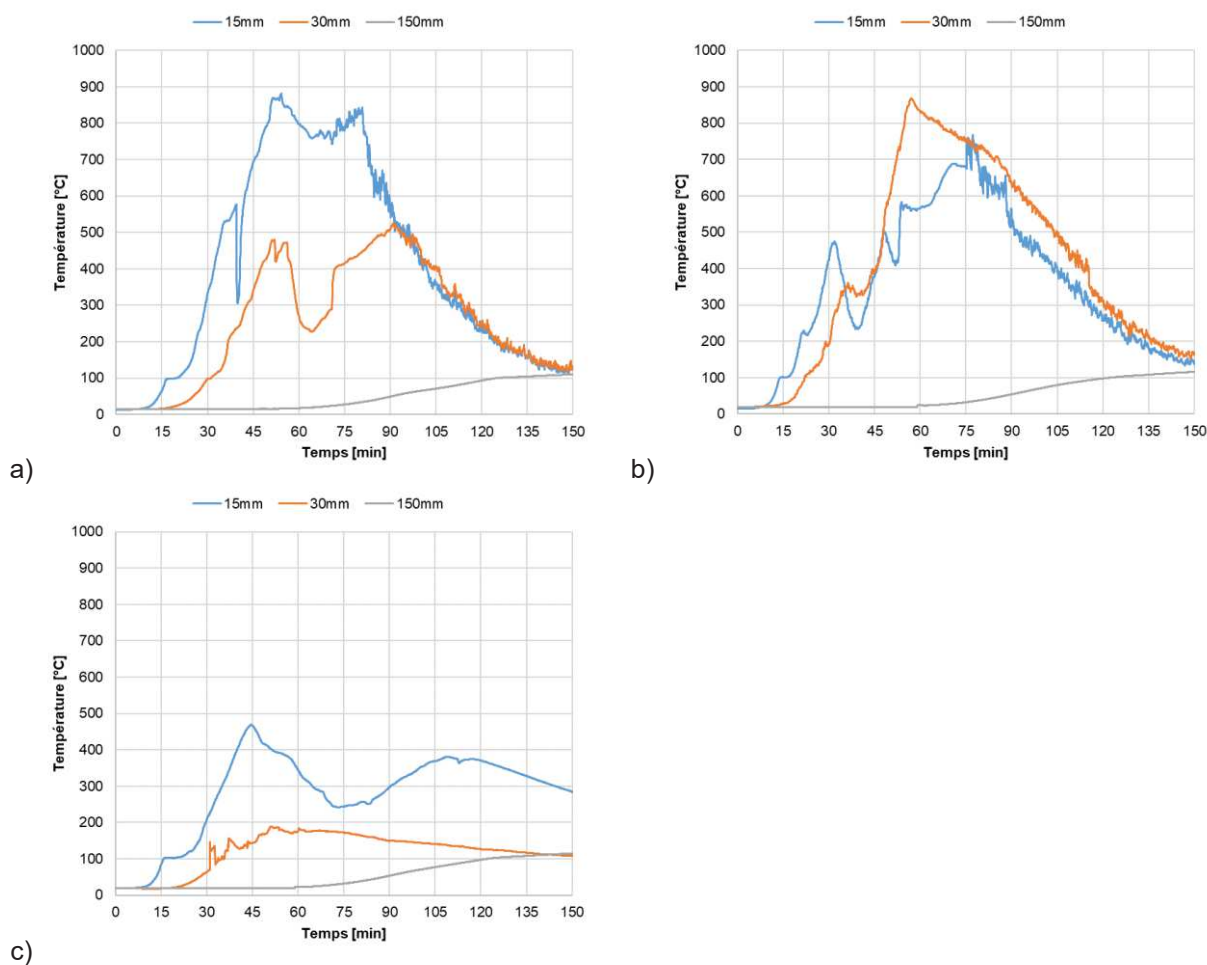


Figure 6-13 : Évolution temporelle de la température à différentes profondeurs et localisations des solives (Essai 3) - a) S1 (Avant Est) ; b) S2 (Centre) ; c) S3 (Fond Ouest)

Les mesures de température dans le poteau BLC montrent l'atteinte du critère de carbonisation de 300°C à 15 mm et 30 mm de profondeur pour les deux hauteurs. Dans tous les cas, la température à 200 mm de profondeur ne dépasse pas 30°C sur les 150 minutes d'essai.

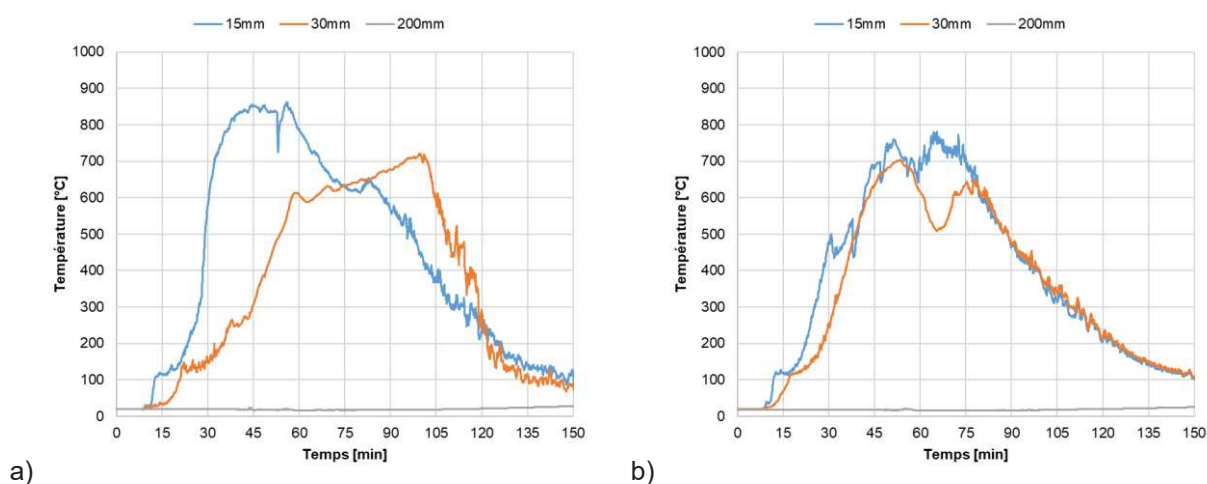


Figure 6-14 : Évolution temporelle de la température à différentes profondeurs et localisations du poteau (Essai 3) - a) P1 (100cm) ; b) P2 (200cm)

6.3.7. Relevés de carbonisation

Quelques jours après l'essai, des tranches de 50 mm d'épaisseur sont découpées dans les solives et entretoises à différentes localisations. Une mesure de profondeur de carbonisation est faite selon la hauteur dans l'axe médian de la poutre, et selon la semelle au 1/3 inférieur et 1/3 supérieur de la hauteur.

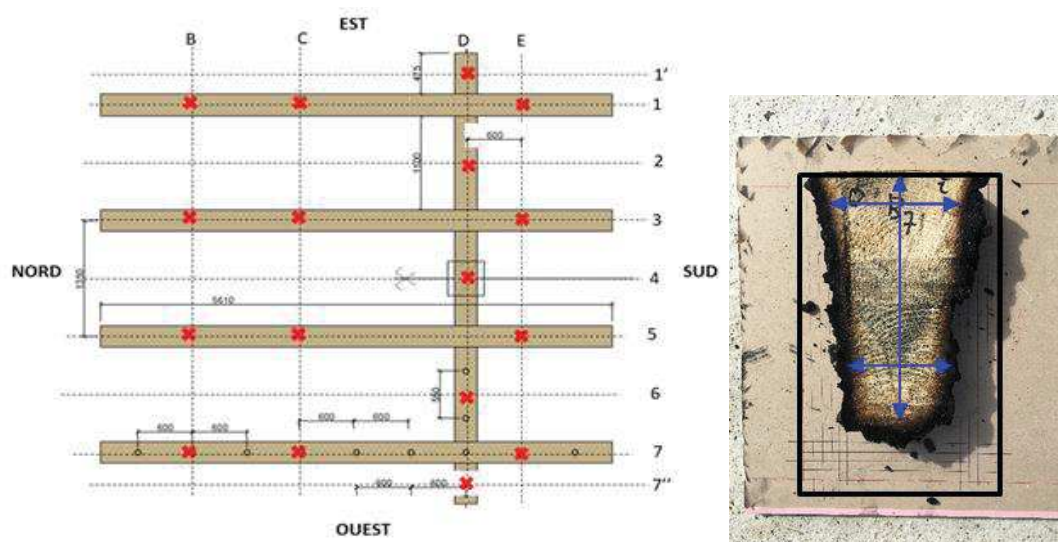


Figure 6-15 : Position des prélèvements (tranche) des solives et des entretoises et localisation des mesures sur une coupe type de poutre (le contour noir représente la section initiale de la poutre)

Les épaisseurs de carbonisation varient entre 35 mm et 115 mm sur la hauteur des poutres, entre 32,5 et 69 mm sur la largeur supérieure et de 45 à 69 mm sur la largeur inférieure. Outre l'entretoise centrale coincée entre le poteau et deux solives, les solives du fond et à l'ouest présentent les plus grandes épaisseurs de carbonisation

	B	C	D	E
1'			50/40/55	
1	60/52,5/52,5	55/55/57,5		35/45/51,5
2			53/45/55	
3	80/47,5/65	70/65/58	//	47/35/45
4			115/47,5/50	
5	95/47,5/69	77/69/59,5		46/35/45
6			55/44/57,5	
7	77/45/65	75/65/62,5		35/39/55
7''			50/32,5/55	

Figure 6-16 : Relevés des épaisseurs de carbonisation [mm] des solives et entretoises selon leur localisation – hauteur/semelle supérieure/semelle inférieure (Essai 3)

Quelques jours après l'essai, des tranches du poteau de 50 mm d'épaisseur sont découpées aux hauteurs correspondant à la position des mesures de température. Une mesure de profondeur de carbonisation est faite sur les deux axes Nord/Sud et Est/Ouest de la cellule d'essais.

Les épaisseurs de carbonisation varient de 54 à 115 mm. La partie basse du poteau présente une plus forte carbonisation que la partie haute. Dans tous les cas, l'épaisseur carbonisée est la plus importante dans le sens Est/Ouest.

	Est/Ouest	Nord/Sud
100cm (bas)	115	72.5
200cm (haut)	100	54

Figure 6-17 : Relevés des épaisseurs de carbonisation [mm] des poteaux selon la hauteur et l'orientation (Essai 3)

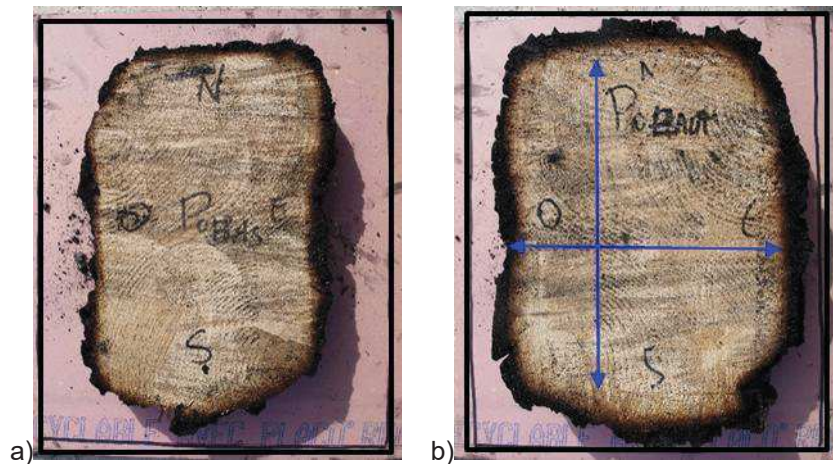


Figure 6-18 : Échantillons prélevés sur le poteau (Essai 3) a) 100cm de haut ; b) 200cm de haut (le contour noir représente la section initiale de poteau)

7. ESSAI 4 – CONFIGURATION PLAFOND CLT PU

7.1. CONDITIONS D'ESSAIS

L'essai 4 incluant un plafond en panneaux CLT avec colle PU s'est déroulé le 13/10/2021 entre 13h40 et 16h40 correspondant à la combustion du foyer primaire. Aucune action d'extinction sur le foyer primaire et le bois LC n'a été réalisée pendant et après l'essai. Les mesures de température ont perduré jusqu'au lendemain matin 08h50.



Figure 7-1 : Vue du plafond CLT colle PU (Essai 4)

L'essai a démarré avec un temps légèrement nuageux (1022 hPa). La température extérieure fut de 14°C pour une humidité relative de 57% avec une légère brise de NNE et Nord de 10km/h avec des rafales à 17km/h. Un paravent a alors été installé perpendiculairement à l'ouverture Est. Les rideaux autour de la hotte furent descendus jusqu'à 150cm de haut.

Cet essai implique un foyer primaire de 16 bûchers de 1490 kg de bois (Épicéa), répartis en 8 bûchers, soit 748 kg, sur la plateforme de pesée Est et en 8 bûchers, soit 741 kg, sur la plateforme de pesée Ouest. Cette masse de bois correspond à une densité de charge d'environ 822 MJ/m², sur la base d'une chaleur de combustion de bois sec de 16,2 MJ/kg et d'une humidité relative moyenne du bois des bûchers de 15,8%.

L'ignition des bûchers est réalisée au moyen de récipients circulaires de 20 à 30cm de diamètre contenant de 1,5 à 2,5L d'heptane respectivement et placés sous cinq bûchers sur chacune des plateformes de pesée. Ils sont allumés au moyen d'une perche enflammée à son extrémité depuis les ouvertures Sud et des mèches en fil de coton ou fibres de bois imbibées de distillat de pétrole.



Figure 7-2 : Bûchers pour l'essai 4 et repérage des départs de feu

Cet essai comprend en plus des ouvertures Sud, des ouvertures en façade Est et Ouest. Ces dernières sont restées sommairement fermées par rideaux pendant 5 minutes environ au début de l'essai pour reproduire un effet de bris de vitrage et créer un certain confinement favorable à la montée en température à l'intérieur de la cellule d'essais et obtenir un embrasement généralisé du foyer primaire.

Des relevés juste avant l'essai en différents points indiquent une humidité relative de la face inférieure des panneaux de CLT en épicéa de l'ordre de 11% ±2%.

7.2. DÉROULÉ DE L'ESSAI (OBSERVATIONS)

Une minute après allumage des bacs, les bûchers concernés sont bien enflammés. Il faut environ 4 min15s pour que le plafond CLT s'enflamme alors que tous les bûchers ne sont pas encore en feu. La contribution du plafond conduit ensuite rapidement à leur embrasement. L'incendie devient très intense et dure avec cette intensité jusqu'à 45 minutes. On observe des chutes de morceaux de lames de bois du plafond CLT. À partir de 50 minutes le foyer primaire commence à décroître. On constate une réduction de l'intensité du feu. Les deux sources d'incendie décroissent peu à peu ensemble jusqu'à 70minutes. À partir de cet instant, le foyer primaire s'éteint faute de combustible, mais le plafond CLT continue de brûler modérément et présente des petites zones courantes avec des flammes. En effet, des phénomènes localisés de délamination conduisent à renflammer des petites surfaces de bois sain. Au bout de 130 minutes il y a bien auto-extinction du plafond CLT.



Essai 4 – Plafond CLT PU



30min



35min



40min



45min



50min



55min



60min



70min



80min



90min

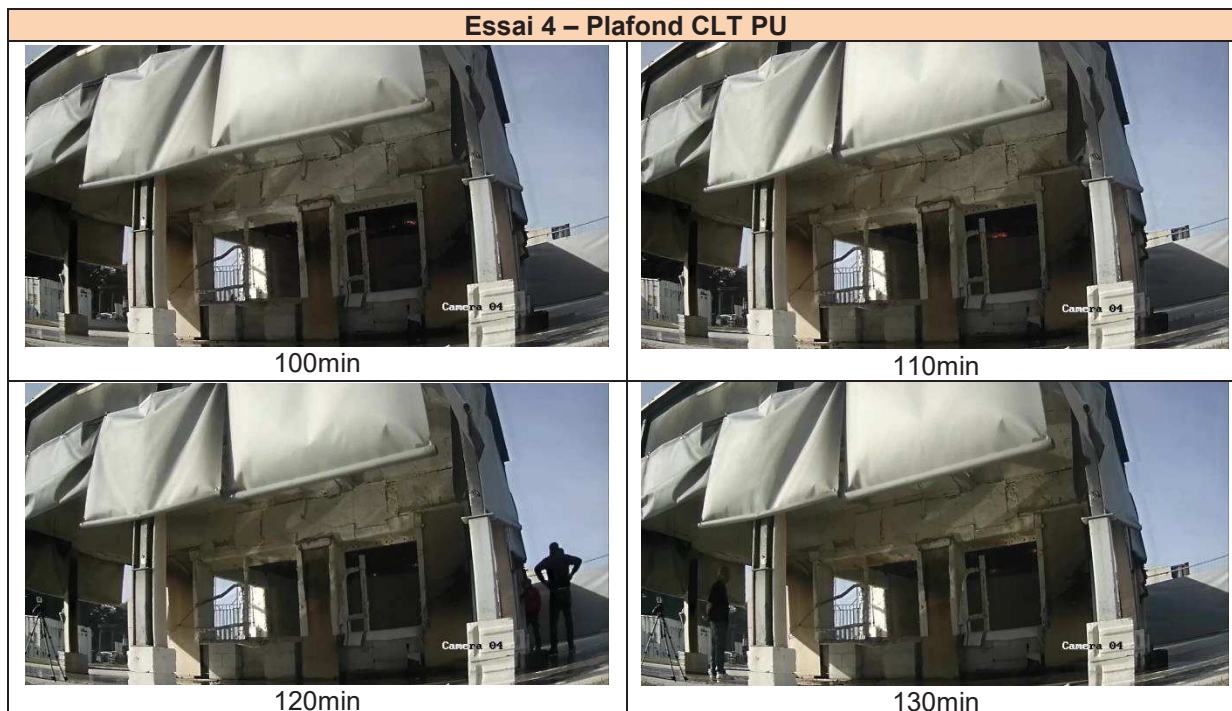


Figure 7-3 : Prises de vue depuis la caméra Sud-Est lors de l'Essai 4 sur 130minutes

L'inflammation du plafond CLT démarre à l'avant Sud-Est de la cellule. Une fois une surface d'environ 1 m² enflammée, l'ensemble du plafond est impliqué.



Figure 7-4 : Détails de l'inflammation du plafond CLT PU lors de l'Essai 4 sur 30secondes

Les flammes qui sortent par les ouvertures sont importantes au plus fort de l'incendie, mais d'une hauteur modérée (1000 mm environ). Les fumées sont noires avec des flammes de couleur orangées traduisant un manque d'oxygénation du feu.



Figure 7-5 : Sorties de flammes aux ouvertures a) Ouest, b) Sud et c) Est lors de l'Essai 4

Les phénomènes de délamination sont très localisés avec des chutes de morceaux de bois de quelques centimètres à une dizaine de centimètre de long. Les surfaces de bois sain qui apparaissent peuvent faire de 10 à 30dm² de surface.



**Figure 7-6 : Phénomènes de délamination lors de l'essai 4
a) pendant le feu généralisé b) après essai**

À la fin de l'essai, il n'y a plus de combustible sur les plateformes de pesée, et le plafond ne présente pas d'incandescence dans les zones courantes. Quelques flammes persistent par intermittence, mais disparaissent 30minutes après la fin de l'essai.



Figure 7-7 : Fin de l'Essai 4 (fin de combustion des bûchers et auto-extinction du plafond CLT PU)

7.3. RÉSULTATS DES MESURES

7.3.1. Températures ambiantes

Les mesures des lignes verticales 1 et 2 au fond de la cellule d'essais montrent des niveaux de température homogènes sur toute la hauteur variant de 900°C à 1100°C. Les lignes verticales avant 4 et 5 présentent quant à elles une nette stratification entre une zone chaude au-dessus de 2 m de haut, autour de 1000°C, et une zone plus froide en-dessous de 1 m, en-dessous de 700°C. Les mesures de la ligne 4 inférieures à 200cm de haut n'ont pas fonctionné après 50 minutes d'essai.

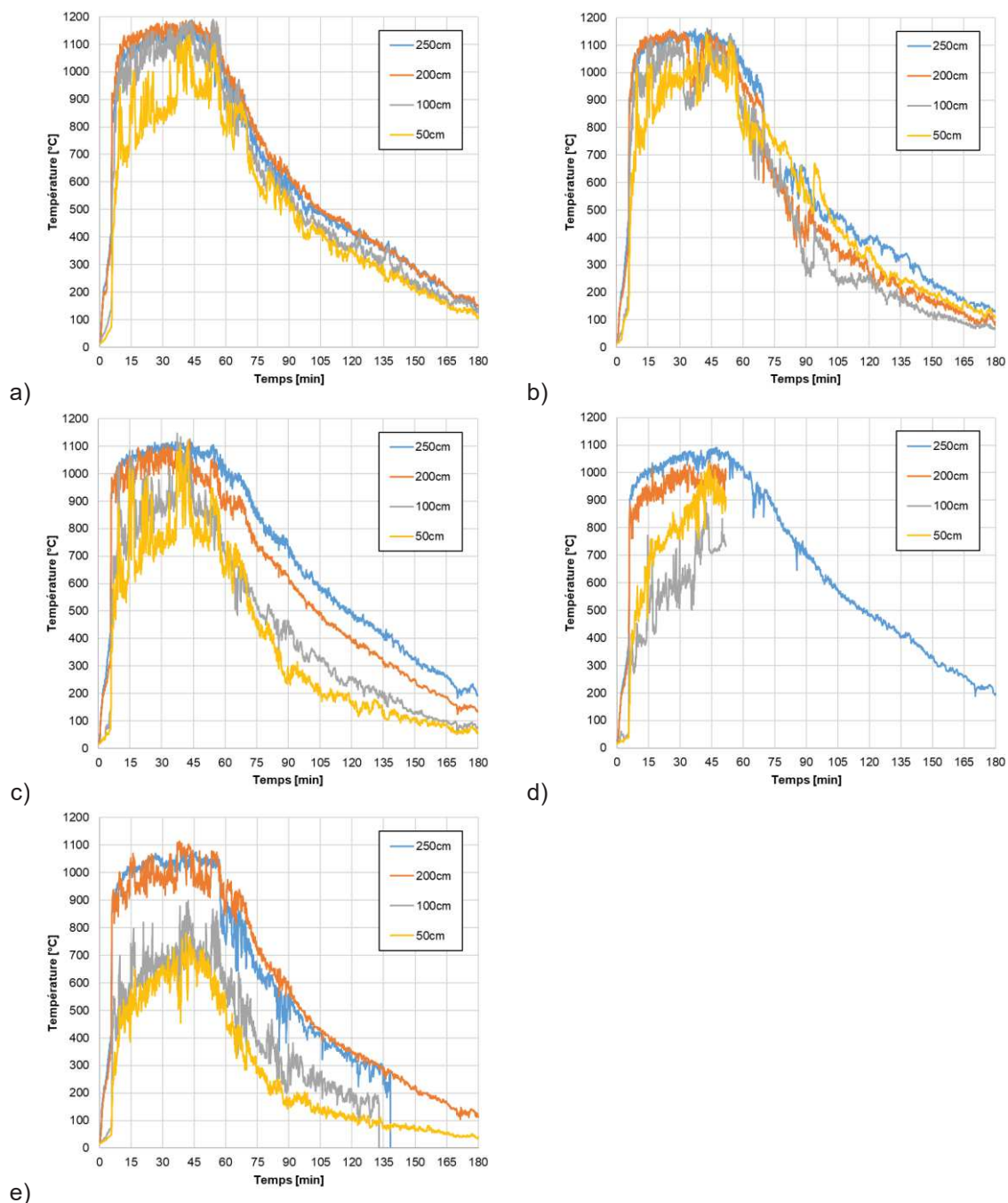


Figure 7-8 : Évolution temporelle des températures dans l'enceinte de la maquette (Essai 4)
 a) Ligne 1, b) Ligne 2, c) Ligne 3, d) Ligne 4, e) Ligne 5

7.3.2. Flux thermiques

Les évolutions du flux thermique au plafond CLT et sur la paroi sont très proches en atteignant 180 kW/m². Les mesures n'ont plus fonctionné après 45 minutes d'essais, sauf pour la mesure sur la paroi Ouest en partie haute.

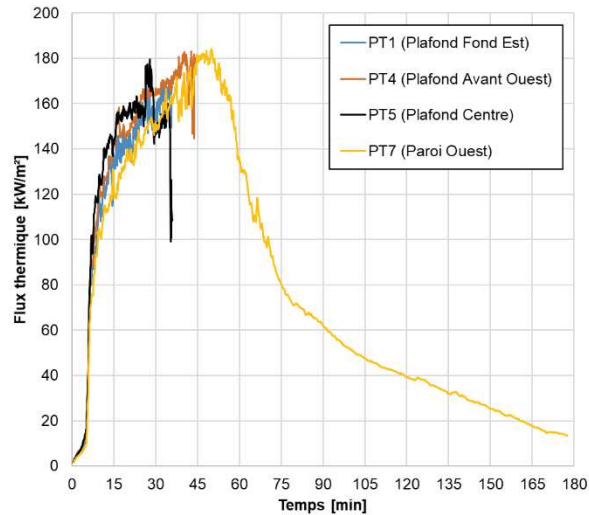
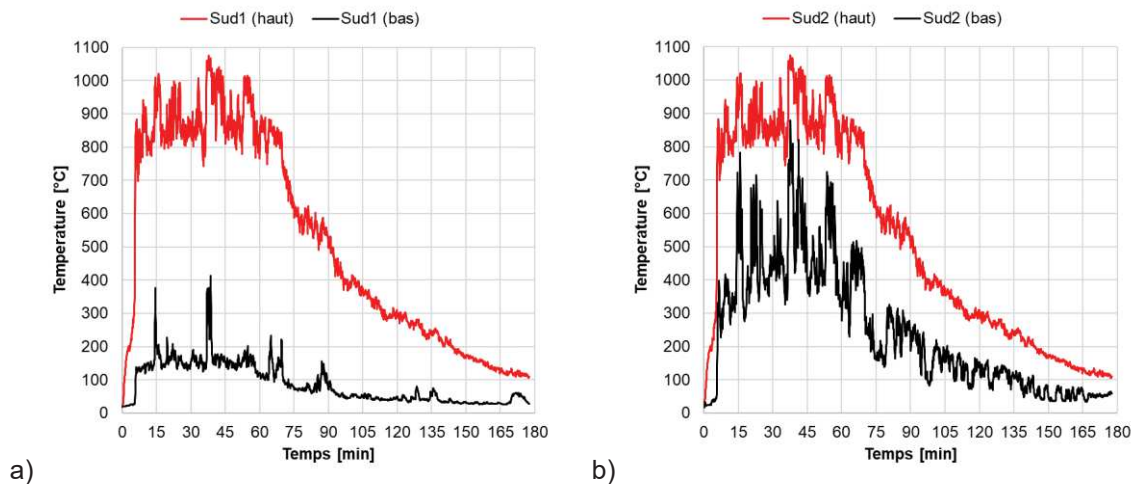


Figure 7-9 : Évolution temporelle des flux thermiques au plafond CLT et sur la paroi Ouest (Essai 4)

7.3.3. Mesures aux ouvertures

Les mesures de température et de vitesse aux ouvertures de la cellule d'essais montrent bien un flux sortant en partie haute et un flux entrant en partie basse. Les niveaux de température de couche chaude sont moins élevés pour les ouvertures au Sud que pour les ouvertures Est et Ouest, avec près de 400°C de différence. Ces différences se retrouvent sur les magnitudes de vitesses sortantes, notamment à l'Est.



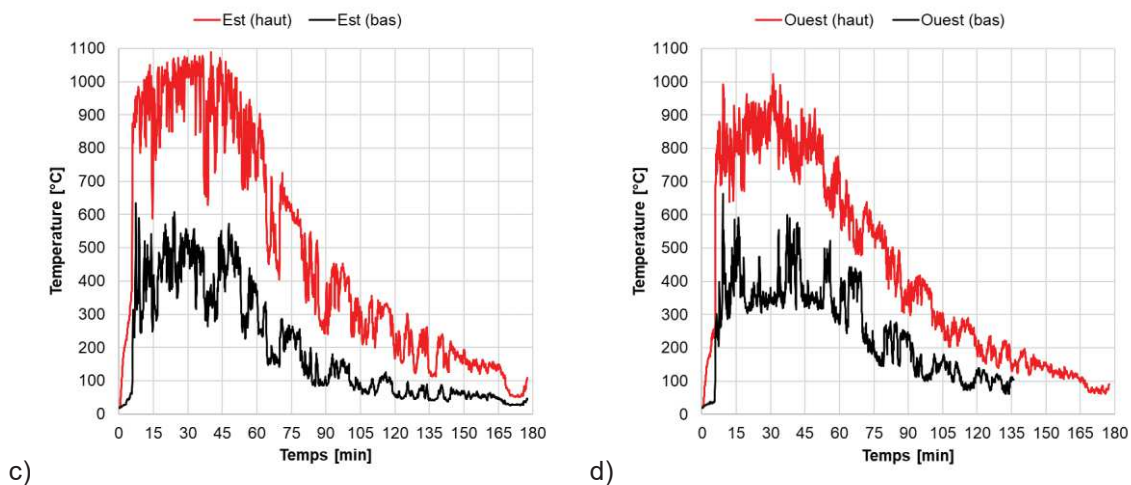


Figure 7-10 : Évolution temporelle des températures au niveau des ouvertures pendant l'essai 4
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest

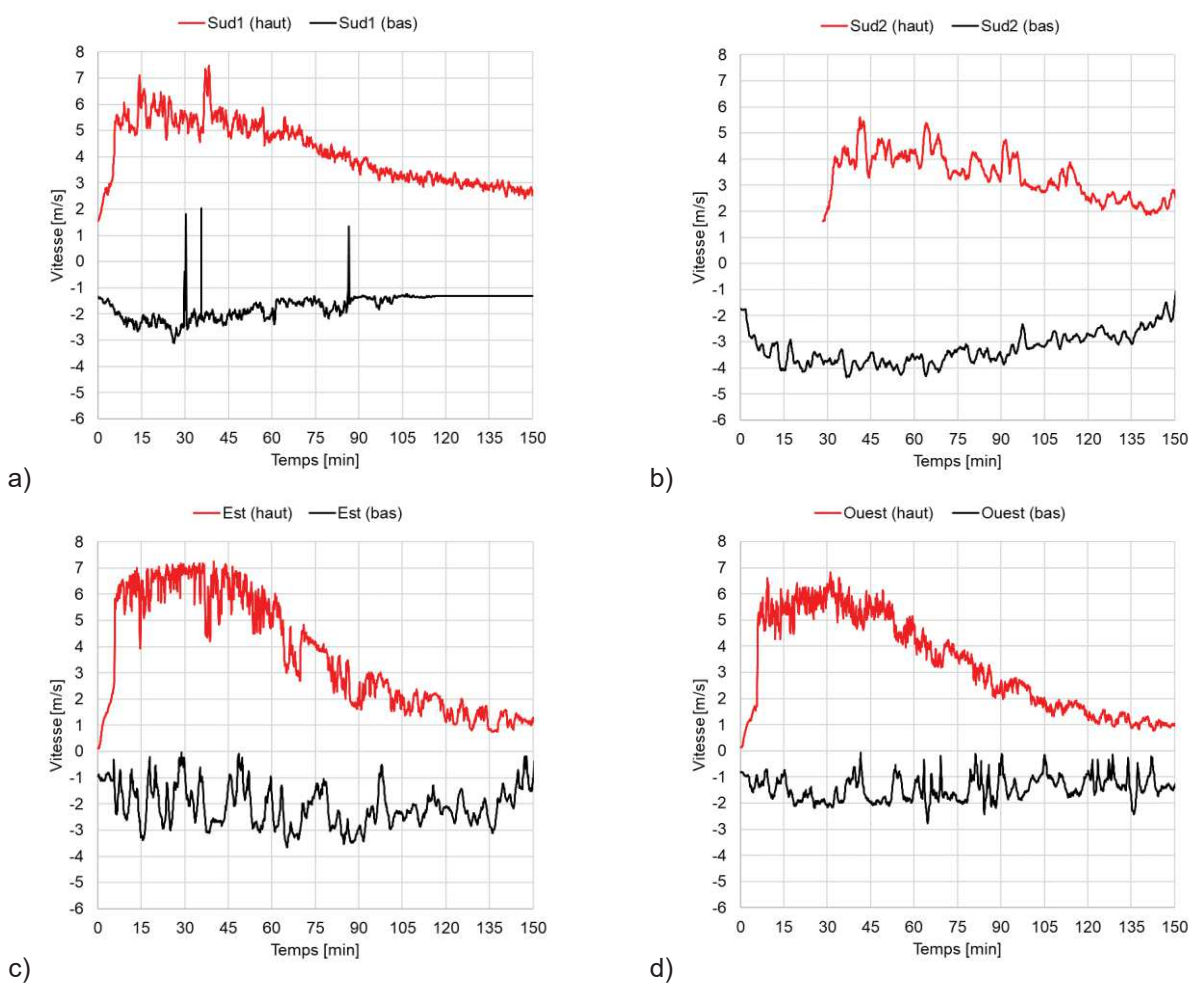


Figure 7-11 : Évolution temporelle des vitesses au niveau des ouvertures pendant l'essai 4
 a) grande ouverture au Sud ; b) petite ouverture au Sud ; c) ouverture Est ; d) ouverture Ouest

7.3.4. Perte de masse

La perte de masse est de 569kg de bois pour les 8 bûchers à l'Est et de 598 kg de bois pour les 8 bûchers à l'Ouest, soit un total de 1167 kg de bois, représentant 78% de le masse initiale de bois. Après 180 minutes d'essai, il reste sur chaque balance environ 140 à 180 kg de cendres et charbons.

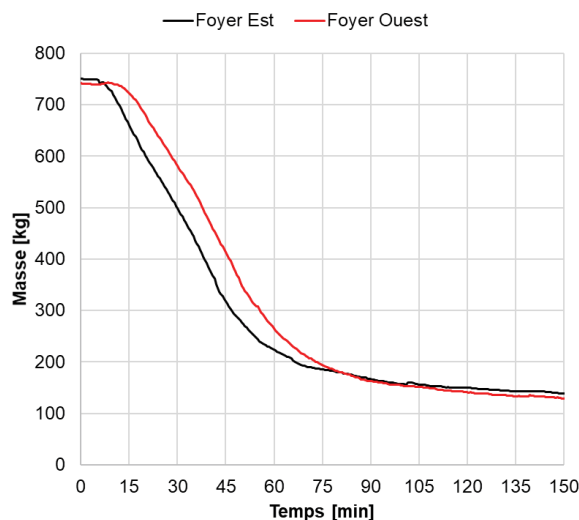


Figure 7-12 : Évolution temporelle de la perte de masse pour les deux plateformes de pesée (Essai 4)

7.3.5. Débit calorifique

Le débit calorifique mesuré dans la cheminée de la hotte ne comprend que la libération de l'énergie du foyer primaire et du plafond CLT sortant par les ouvertures au Sud de la cellule d'essais. Cette puissance atteint un pic de 5580kW après 6 minutes d'essais. Ensuite, après une phase stationnaire d'environ 40 minutes autour d'une valeur de 4800kW, l'intensité du feu décroît sur 120 minutes.

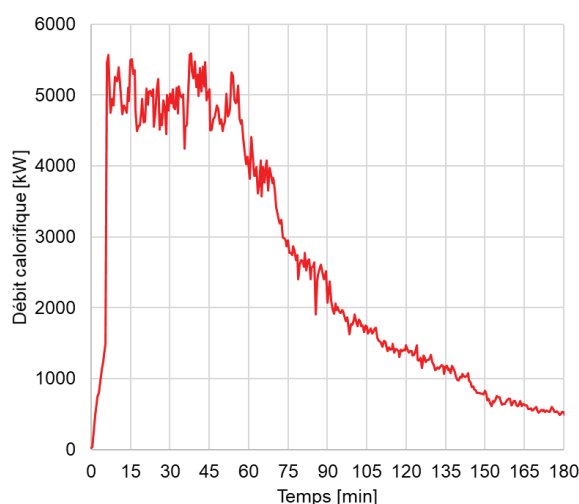


Figure 7-13 : Évolution temporelle du débit calorifique libérée via les ouvertures Sud (Essai 4)

7.3.6. Température dans les panneaux CLT

Les mesures de température dans les panneaux de bois CLT montrent l'atteinte d'un critère de carbonisation de 300°C à 40 et 80 mm de profondeur pour tous les points de prélèvement. L'atteinte de ce critère est observée à 120 mm de profondeur pour le prélèvement au centre et au fond de la cellule.

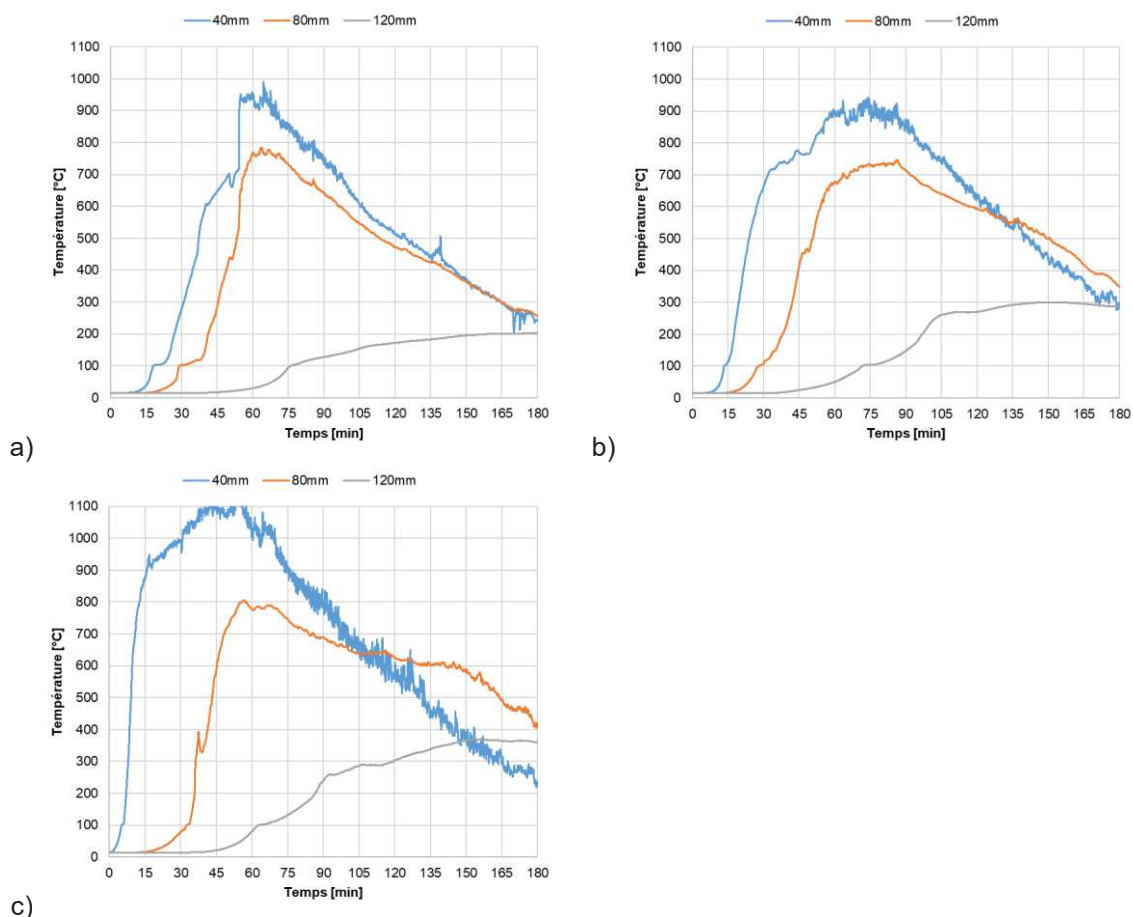


Figure 7-14 : Évolution temporelle de la température à différentes profondeurs et localisations des panneaux CLT (Essai 4) - a) S1 ; b) S2 ; c) S3

7.3.7. Relevés de carbonisation

Quelques jours après l'essai, des échantillons de CLT de 400mm x 400mm ont été découpés dans les panneaux du plafond aux trois localisations S1, S2 et S3. Les épaisseurs de carbonisation varient entre 78 mm et 105 mm. Les échantillons présentent 2 plis extérieurs sains sans marque de carbonisation. Le troisième pli est légèrement ou modérément carbonisé selon les échantillons. Dans tous le cas les épaisseurs ne sont pas homogènes par échantillon du fait de la délamination localisée des panneaux.

Épaisseur [mm]	S1	S2	S3
Minimale	78	80	95
Moyenne	99	95	102
Maximale	90	90	105

Figure 7-15 : Relevés d'épaisseur de carbonisation [mm] du plafond CLT pour les trois échantillons prélevés (Essai 4)

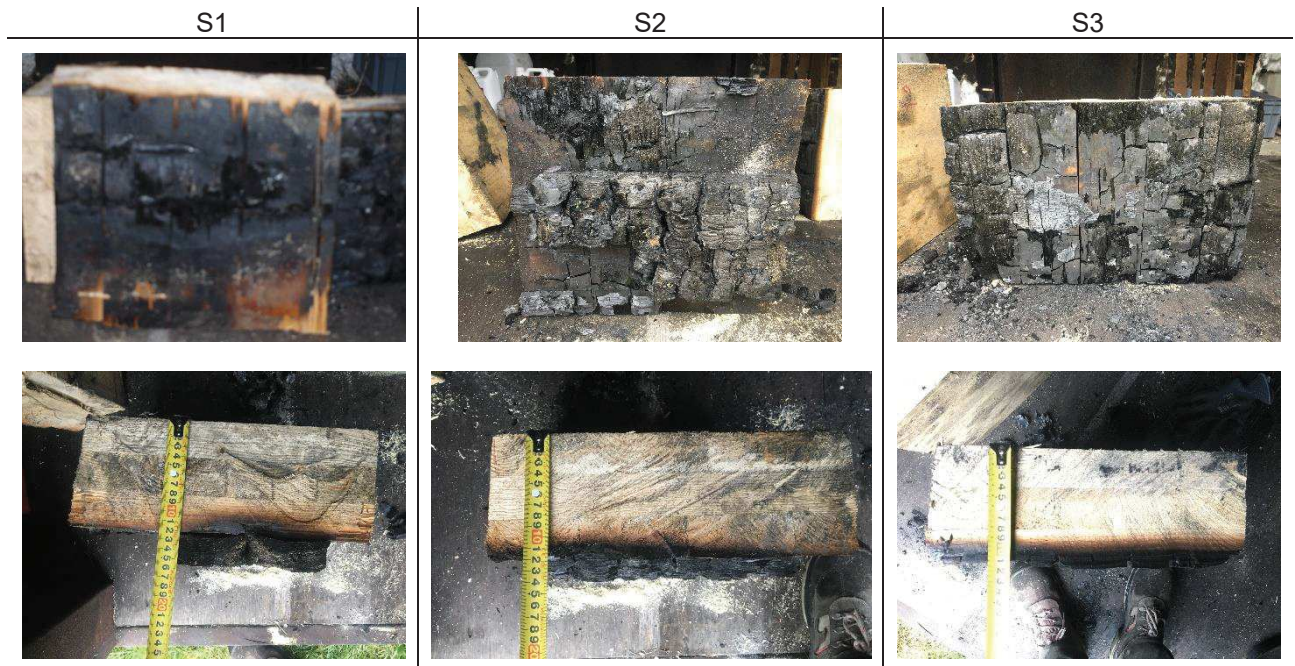


Figure 7-16 : Relevés d'épaisseur de carbonisation du plafond CLT après Essai 4 aux trois localisations – vues de dessus et de côté

8. ANALYSE ET DISCUSSION

8.1. RÉGIME D'INCENDIE

Tous les essais ont montré des feux bien développés avec des flammes extérieures et un niveau de température important. L'évolution de la température moyenne dans la cellule d'essais pour chaque configuration montre une certaine hiérarchie avec les configurations de plafond CLT plus élevées que les configurations avec poteau/poutres ou paroi.

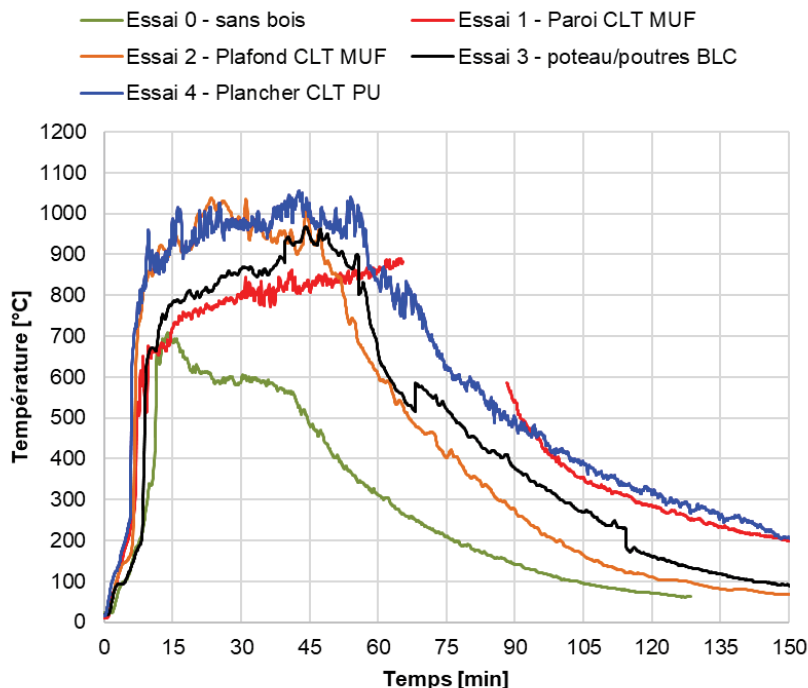


Figure 8-1 : Évolution de la température moyenne dans la cellule d'essais pour chaque configuration

En situation de feu en local, la dynamique du feu est soit contrôlée par les dimensions de l'ouverture, soit pilotée par la quantité de mouvement créée par la combustion du foyer (débit de pyrolyse). Dans le premier cas, les ouvertures sont petites, la combustion est riche en combustible et une partie importante de la chaleur est rejetée à l'extérieur sous forme de flammes externes. Les températures sont relativement uniformes à l'intérieur du compartiment. Par conséquent, les températures internes diminuent avec la diminution des ouvertures. Dans le second cas, les grandes ouvertures permettent aux fumées et gaz chaud de s'évacuer facilement. Le débit de pyrolyse du feu intérieur aspire l'air dans le compartiment refroidissant les gaz chauds. Les températures sont stratifiées et plus modérées.

Pour caractériser ces deux situations, ou régime d'incendie, le facteur d'ouverture O est souvent employé [1][22][23]. Il est basé sur le principe d'un bilan énergétique à l'intérieur du compartiment entre les pertes de chaleur à travers les parois du local et la production de chaleur représentée par l'apport d'air frais aux ouvertures et les pertes de chaleur à travers l'ouverture.

$$O = \frac{A_T}{A_o \sqrt{h}}$$

où :

- O est le facteur d'ouverture ($m^{-1/2}$),
- A_T est la surface totale des parois horizontales et verticales de la cellule sauf le plancher (sol),
- h est la hauteur moyenne des ouvertures (m),
- A_o est la surface des ouvertures (m^2),

Plus le facteur O est élevé, plus le feu est contrôlé par la ventilation (par la dimension des ouvertures), et a contrario, plus le facteur d'ouverture est faible, plus l'incendie est piloté par le foyer interne.

Les caractéristiques d'ouverture des configurations des essais 2, 3 et 4 les classent alors comme un régime de combustion contrôlé par le combustible (suffisamment ventilé) avec des températures élevées, alors que les essais 0 et 1 présentent un régime d'incendie contrôlé par la ventilation. Toutefois on se rend compte que l'essai 3 est plus proche d'un régime contrôlé par le combustible.

Il faut alors introduire dans cette analyse du régime d'incendie la surface de bois qui vient redéfinir le bilan énergétique. Un facteur d'ouverture modifié par la surface de bois de structure est alors proposé [24] :

$$O_{mod} = \frac{A_T - A_{bois}}{A_o \sqrt{h}}$$

Où

- O_{mod} est le facteur d'ouverture modifié ($m^{-1/2}$),
- A_{bois} est la surface développée de bois de structure exposé (m^2)

Essai	Facteur d'ouverture $O [m^{-1/2}]$	Facteur d'ouverture modifié $O_{mod} [m^{-1/2}]$	$A_{bois}/A_T [-]^5$
0 - sans bois	12,74	12,74	-
1 - paroi CLT MUF	12,48	10,34	0,17
2 - plafond CLT MUF	5,05	3,37	0,33
3 - poteau/poutres BLC	5,00	3,47	0,31
4 - plafond CLT PU	5,05	3,37	0,33

Tableau 8-1 : Caractéristiques des configurations d'essais réalisés

Ainsi, l'augmentation de surfaces en bois devrait entraîner une diminution du facteur d'ouverture impliquant un plus fort contrôle par le combustible et une augmentation de la température. Cependant, l'essai 3 indique que les températures peuvent commencer progressivement à décroître et se dirigent vers un régime de contrôle par la ventilation, mais avec des températures plus basses. On aurait donc un nouveau régime d'incendie du fait de la présence de bois.

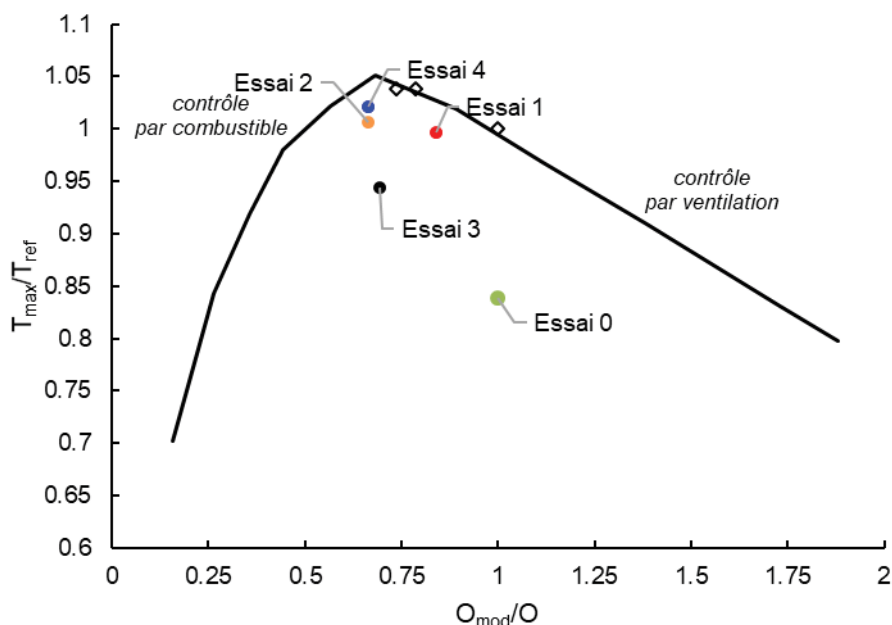


Tableau 8-2 : Comparaison des données des essais avec la courbe de caractérisation des régimes d'incendie [22][24] ($T_{ref} = 1050^\circ C$ suivant Figure 8-1)

⁵ Ce ratio servira de définition de pourcentage de surface de bois apparent dans un local. D'autres définitions et calculs de ratio peuvent exister

8.2. DÉBITS CALORIFIQUES

À partir de la perte de masse et en se basant sur une chaleur de combustion du bois de 16,2MJ/kg, il est possible de déterminer les débits calorifiques des foyers primaires. Hormis l'essai 0 qui impliquait presque deux fois moins de bois, les pics de puissance varient autour de $5800\text{kW} \pm 1000\text{kW}$, soit une puissance calorifique surfacique de 200kW/m^2 , proche de la valeur normative de 250kW/m^2 [1]. On notera que pendant les essais 1 à 4, un fort entrainement d'air est apparu aux ouvertures Est/Ouest favorisant la combustion des bûchers avant (Sud) de la cellule

Par contre les évolutions des puissances de foyer primaire sont très différentes entre les configurations. Sans bois de structure, la cinétique est très proche de la théorie des bûchers de bois décrite dans le SFPE Handbook [16] avec une montée rapide et une décroissance immédiate sur une période bien plus longue. Dans le cas avec d'une charge calorifique importante de l'ordre de 740MJ/m^2 avec un facteur d'ouverture de $5,78\text{m}^{-1/2}$, les pics de puissance sont atteints tardivement avec un plateau qui peut encore varier significativement. Avec une charge calorifique très importante de 950MJ/m^2 (Essai 1), si le pic apparaît après 20minutes d'essai, on observe un réel plateau ensuite.

Remarque : il faut noter que la mesure par perte de masse est délicate avec des balances placées dans le local en feu. Malgré la protection thermique, les éléments sensibles et la structure porteuse du plateau de pesée en acier peuvent être impactés par des niveaux modérés (60 à 80°C) surtout en fin d'essai une fois que le transfert de chaleur à traverser la protection, altérant le système de mesure.

Le débit calorifique total de chaque essai, issu du débit calorifique déterminé au Sud par la hotte (Essais 0 et 1) et en ajoutant le débit calorifique déterminés aux ouvertures Est/ouest (Essais 2, 3 et 4), les puissances d'incendie sont presque multipliées par deux. La hiérarchie observée sur les débits calorifiques des foyers primaires est bien conservée avec les débits calorifiques totaux. La configuration avec plafond CLT PU présente la plus forte puissance, comme pour le foyer primaire.

On notera que les puissances libérées aux ouvertures Est/Ouest sont légèrement plus élevées que celles aux ouvertures Sud.

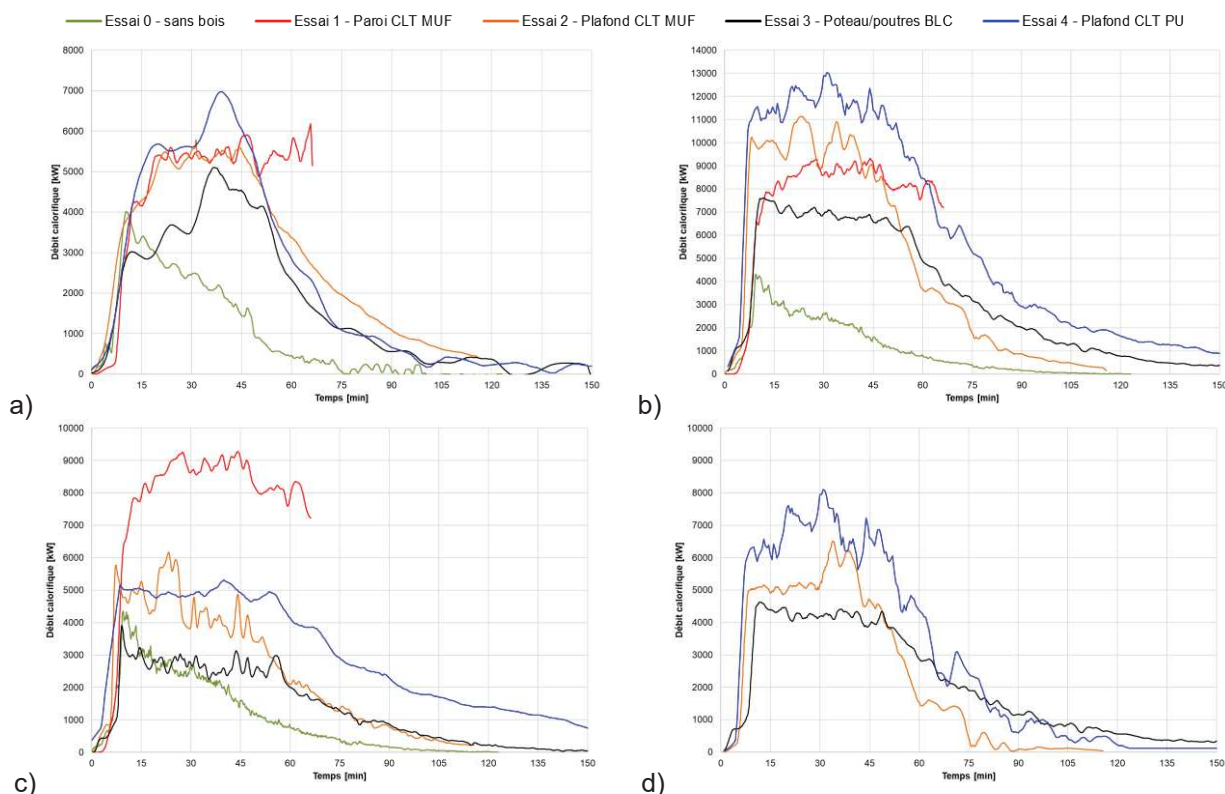


Figure 8-2 : évolution des différents débits calorifiques lors des essais
 a) foyer primaire ; b) total ; c) ouvertures Sud ; d) ouvertures Est/Ouest

8.3. CONTRIBUTION DU BOIS

La contribution énergétique du bois structural peut-être simplement déterminée en retirant la part du débit calorifique du foyer primaire au débit calorifique total.

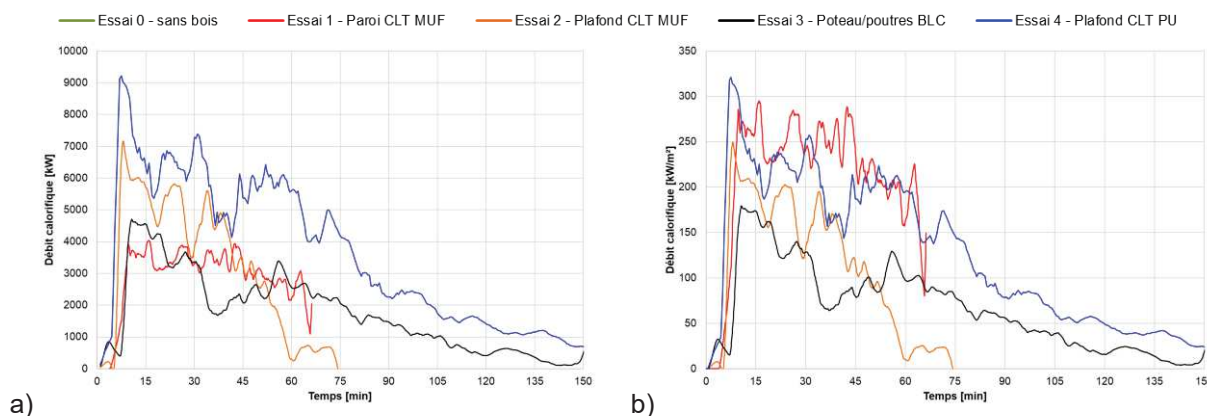


Tableau 8-3 : Évolution du débit calorifique a) total et b) surfacique du bois de structure lors des essais

On constate alors un fort pic de puissance au début, un plateau intermédiaire et une puissance se réduisant peu à peu jusqu'à l'auto-extinction. Du fait que rapidement l'ensemble des surfaces de bois sont impliquées et que l'auto-extinction du bois est plutôt généralisée, cette évolution traduit alors une réduction avec le temps du débit de pyrolyse du bois

L'inflammation du bois de CLT colle MUF a eu lieu pour des températures des gaz à proximité de l'ordre de 290°C. Pour les poutres une température de l'ordre de 250°C est mesurée à 2 m de haut. L'essai 4 avec un plafond CLT indique une température de 300°C au moment de l'inflammation. Ces valeurs sont cohérentes avec la littérature.

Sur la base de l'évolution des températures dans le bois aux différentes épaisseurs et en retenant un critère de carbonisation à 300°C, les vitesses de carbonisation varient entre 0,63 et 0,97mm/min pour les panneaux CLT en colle MUF, entre 0,56 et 1,28mm/min pour les poutres et poteau en BLC, et entre 0,65 et 2,53mm/min pour le plafond CLT avec colle PU. Hormis la valeur pour le CLT avec colle PU où il y a eu des délaminations localisées, les valeurs sont cohérentes avec la littérature [2]. Dans tous les cas, les épaisseurs et vitesses de carbonisation sont les plus faibles sur les échantillons prélevés au plus près de la façade Sud largement ventilée.

	Essai 1 parois CLT MUF	Essai 2 plafond CLT MUF	Essai 3 poutres BLC	Essai3 poteau BLC	Essai4 Plafond CLT PU
Minimale.	0,72	0,63	0,56	0,80	0,65
Maximale	0,97	0,86	1,220	1,28	2,53

Tableau 8-4 : Vitesses de carbonisation [mm/min] minimale et maximale obtenues lors des essais

Les mesures de la température au cœur du bois de structure après les essais sur une durée de 20heures montrent qu'il n'y pas eu d'élévation significative de température pour le plafond CLT MUF (Essai2) et les solives (Essai3).

Pour la paroi CLT, la température est bien montée mais sans franchissement du critère de carbonisation de 300°C à 120mm d'épaisseur comme observé lors des relevés.

Par contre, le plafond CLT avec colle PU montre le franchissement du critère. Ce fait traduit probablement les délaminations localisées. Ce franchissement du critère est également observé pour le thermocouple en haut du poteau. Dans ce cas, cela illustre la progression de l'incandescence démarrant à la tête du poteau, interface avec l'entretoise.

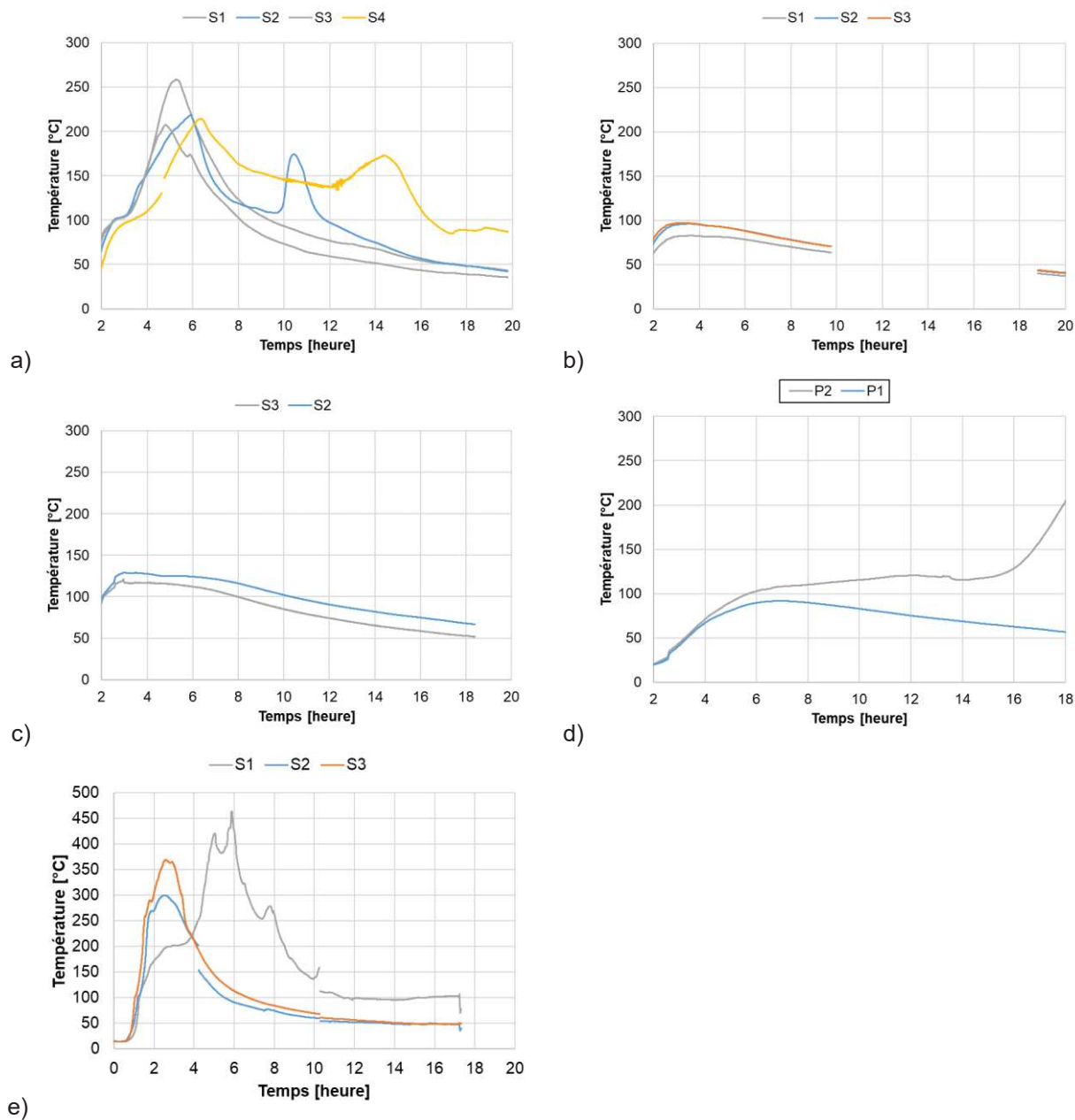


Figure 8-3 : Évolution de la température dans le bois après les essais, a) Essai 1 paroi CLT MUF (ép.130mm) ; b) Essai 2 plafond CLT MUF (ép. 90mm) c) Essai 3 (poutres) (ép. 150mm) ; d) Essai 3 (poteau) (ép. 200mm) ; e) Essai 4 plafond CLT PU (ép.120mm)

8.4. AUTO-EXTINCTION DU BOIS

Tous les essais ont montré une auto-extinction sans flammes vives en fin d'essai une fois le foyer primaire totalement éteint. Cette auto-extinction arrive en trois temps. Dans un premier temps, il y a une extinction du foyer primaire après épuisement du combustible, le bois de structure continue de brûler. Ensuite, une fois le foyer primaire éteint, les zones courantes des plafonds, de la paroi et des poutres/poteau s'éteignent à leur tour. On notera tout de même un délai plus long pour le plafond CLT PU du fait des délaminations localisées qui permettent un certain auto-entretien pendant une durée plus longue. Enfin il y a bien auto-extinction du bois avec la disparition des flammes vives.



Figure 8-4 : Illustrations du phénomène d'auto-extinction du bois de structure pour les essais 1 à 4

Les interfaces et les points de connexion peuvent présenter encore, parfois, des flammes, et assurément du bois braisant, qui avec des conditions de ventilation et de confinement, favorise une combustion très lente du bois, avec l'apparition de points d'incandescence jusqu'à percement parfois du plafond ou de la paroi. Les zones d'incandescence sont présentées en ANNEXE E.

On rappelle qu'aucun traitement n'a été fait sur ces interfaces hormis le haut de la paroi CLT. De même aucune action d'extinction sur le foyer primaire et le bois de structure n'a été réalisée pendant et après les essais.

9. CONCLUSION

Quatre essais incendie sur des configurations constructives en bois ont été réalisés par Efectis sur le 2nd semestre 2021 avec une maquette à échelle réelle d'environ 30m² au sol et 3m de haut (simple rez-de-chaussée).

Un essai avec une paroi en CLT avec colle MUF a été réalisé (Essai 1) pour une cellule d'essais présentant des caractéristiques d'ouvertures modérées (ouvertures uniquement en façade Sud de 5,6m²) et un foyer de départ de feu avec une très forte charge calorifique (>900 MJ/m² environ) correspondant à une occupation de type Habitation. La surface de bois apparent est de l'ordre de 15m², soit 17% de la surface totale des parois horizontales et verticales de la cellule sauf le plancher (sol).

Deux essais avec un plafond en CLT ont été considérés : l'un avec des panneaux CLT et colle MUF (Essai 2) lui conférant des propriétés de non délamination à chaud, l'autre avec des panneaux CLT et colle PU (Essai 4) de conception standard. La cellule d'essais présentait des caractéristiques d'ouvertures plus importantes (ouvertures en façades Sud, Est et Ouest soit environ 14m²) et un foyer de départ de feu de forte charge calorifique (700MJ/m² environ) correspondant à une occupation de type Bureaux. La surface de bois apparent est de l'ordre de 28m², soit 33,3% de la surface totale des parois horizontales et verticales de la cellule sauf le plancher (sol).

Cette même configuration d'ouvertures de cellule d'essais et de foyer a été employée pour un essai de poutres et poteau en lamellé-collé (Essai 3) sous une dalle en béton cellulaire. La surface de bois apparent est de l'ordre de 26m², soit 30,6% de la surface totale des parois horizontales et verticales de la cellule sauf le plancher (sol).

Dans tous les cas après un feu intense et pleinement développé supérieur à 7MW, une auto-extinction avec absence de flammes vives est observée. On rappelle qu'aucune action d'extinction sur le foyer primaire et le bois de structure n'a été réalisée pendant et après l'essai sur plus de 20 heures.

Des points d'incandescence et de feu très lent dans les zones d'interface (bois/paroi, bois/plafond et bois/bois) ont été observés, témoignant du besoin de traiter ces points spécifiquement.

10. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- [1] NF EN 1991-1-2/NA, Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-2 : actions générales - Actions sur les structures exposées au feu » - Annexe nationale à la NF EN 1991-1-2 - Actions sur les structures exposées au feu - Février 2007
- [2] NF EN 1995-1-2, Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités- Calcul des structures au feu, Septembre 2005.
- [3] Doctrine pour la construction des immeubles en matériaux biosourcés et combustibles – Direction des transports et de la protection du public de la Préfecture de Police - 20/07/2021.
- [4] Dispositions visant à accompagner la construction des bâtiments bois d'une hauteur supérieure à 8m, Avis CCDSA Séance plénière du 15/10/2020, préfecture de la Gironde
- [5] Note commentée de préconisation pour la sécurité en cas d'incendie des bâtiments en bois de moyenne et grande hauteur (>28m). ADIVbois. Version 1.0, Juin 2021
- [6] Note commentée de préconisation pour la sécurité en cas d'incendie des établissements recevant du public bâtiments en bois de 8 à 28m. ADIVbois. Version 1.0, Juin 2021
- [7] Note commentée de préconisation pour la sécurité en cas d'incendie des établissements recevant des travailleurs, bâtiments en bois de 8 à 28m. ADIVbois. Version 1.0, Juin 2021
- [8] Note commentée de préconisation pour la sécurité en cas d'incendie des bâtiments d'habitation, bâtiments en bois de 8 à 28m. ADIVbois. Version 1.0, Juin 2021
- [9] Étude de faisabilité d'application de l'ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur – Note de synthèse et Guide méthodologique, Rapport Efectis-CSTB, Réf. 18-000832-RévB, 09 Juin 2018
- [10] Étude de faisabilité d'application de l'ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur Étude de modèles numériques de développement d'incendie – Rapport Efectis-CSTB Réf. 18-000289- Rév.B, 09 Mars 2018
- [11] Étude de faisabilité d'application de l'ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur Approches numériques d'évaluation du comportement sous feux réels de structures en bois – Rapport Efectis-CSTB Réf 18-000290-RévB, 09 Mars 2018
- [12] Étude de faisabilité d'application de l'ingénierie de sécurité incendie aux bâtiments en bois de grande hauteur – Étude bibliographique et recueil de données existantes, Rapport Efectis-CSTB, Réf. 17-001650-RévB, 09 Mars 2018
- [13] Essais au feu sur maquettes reconstituant un local avec certaines parois en bois apparent -Réalisation d'essais à échelle intermédiaire – CSTB Rapport Réf. STB-DSSF/EA2R/26088892 du 08/04/2022
- [14] Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer, Haukur Ingason, Ulf Wickstroek, Fire Safety Journal 42 (2007) 161–166
- [15] A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application. McCaffrey, B. and Heskestad, G. (1976). Combustion and Flame, 26 :125–127
- [16] SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association. 5th Ed. 2016
- [17] The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds, M. Thornton. Phil. Mag. 3., 1917
- [18] The Measurement of Heat Release Rates by Oxygen Consumption Calorimetry in Fires Under Suppression. B. Z. Dlugogorski, J. R. Mawhinney and V. Huu Duc Fire safety Science proceeding of the 4th Int. Symp., Ottawa, 1994
- [19] Bartlett, A.I., Hadden, R.M. & Bisby, L.A. A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. Fire Technol 55, 1–49 (2019)
- [20] Byström, Alexandra. Compartment Fire Temperature Calculations and Measurements.” (2017). PhD Thesis. Luleå University of Technology
- [21] Sharma, Puneet & Quintiere, James. (2010). Compartment Fire Temperatures. Journal of Fire Protection Engineering - 20. 253-271.

- [22] Thomas, P.H., Heselden, A.J. and Law, M., Fully-developed compartment fire -two kinds of behaviour. 1967. 18.
- [23] Thomas, P.H. and Heselden, A.J. Fully-developed Fires in Single Compartments. Fire Research Station, 1972. 923.
- [24] C. Gorska, J.P. Hidalgo, J.L. Torero, Fire dynamics in mass timber compartments, Fire Safety Journal (2020).

ANNEXE A PLANS

A.1 CELLULE D'ESSAI SANS BOIS

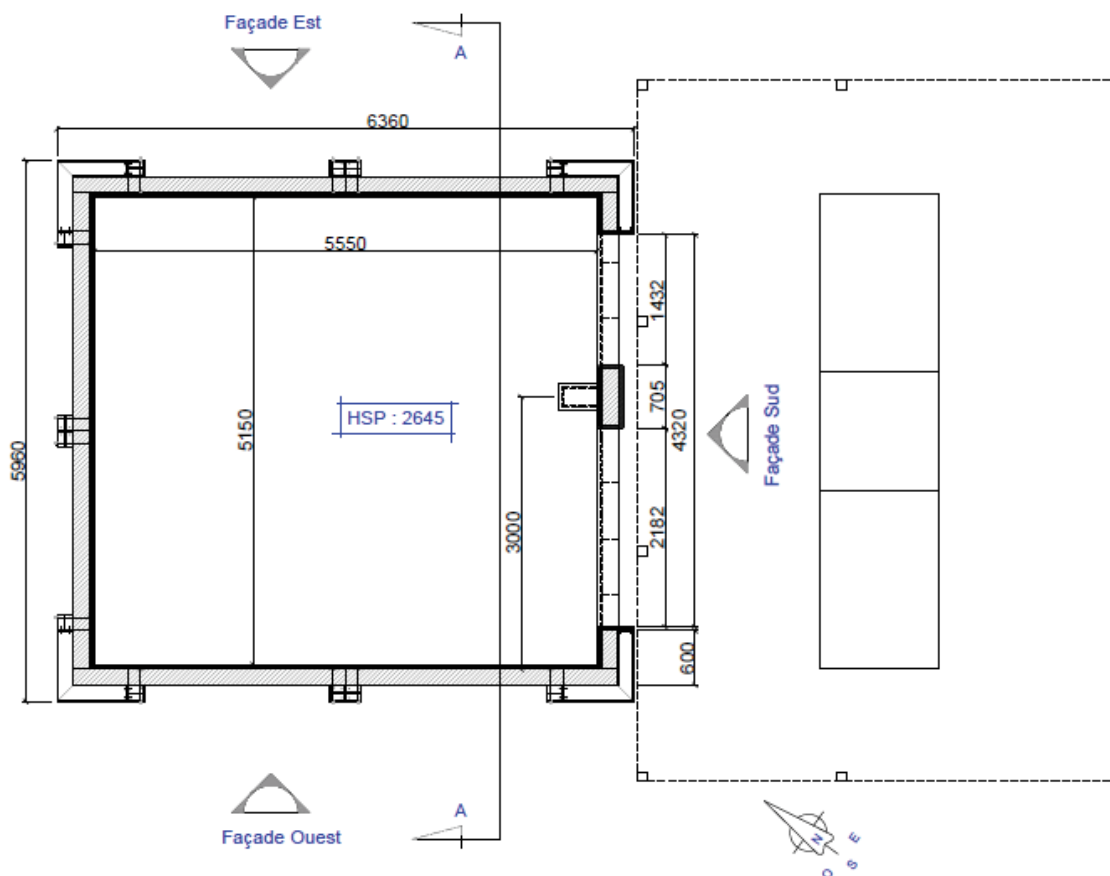


Figure A-1 : Vue en plan de la cellule d'essai pour l'essai 0 (sans bois)

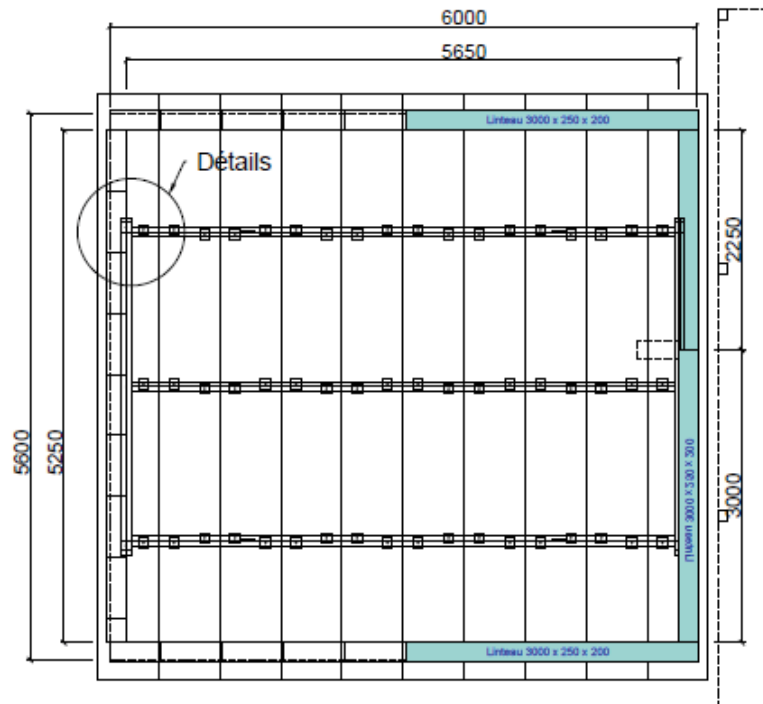


Figure A-2 : Vue de dessus de la cellule d'essai pour l'essai 0 (sans bois)

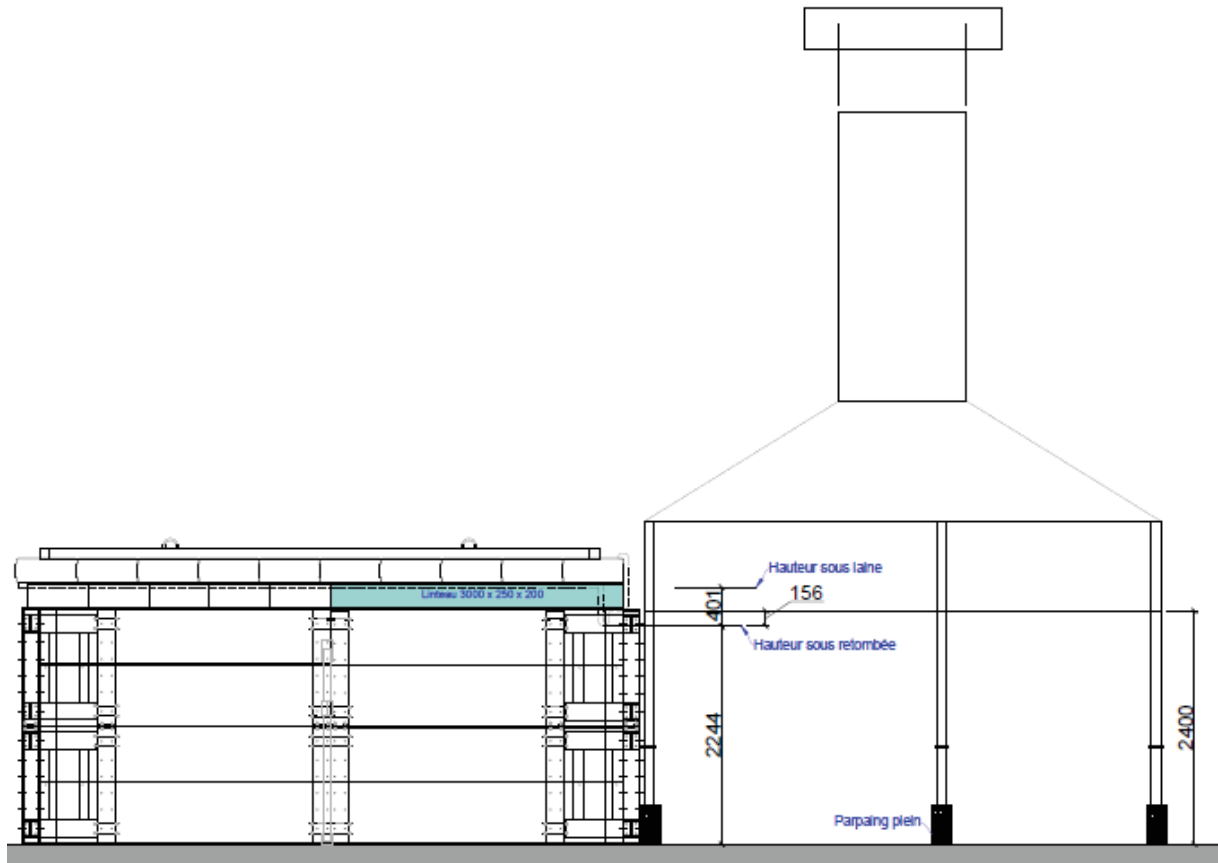


Figure A-3 : Élévation Ouest de la cellule d'essai pour l'essai 0 (sans bois)

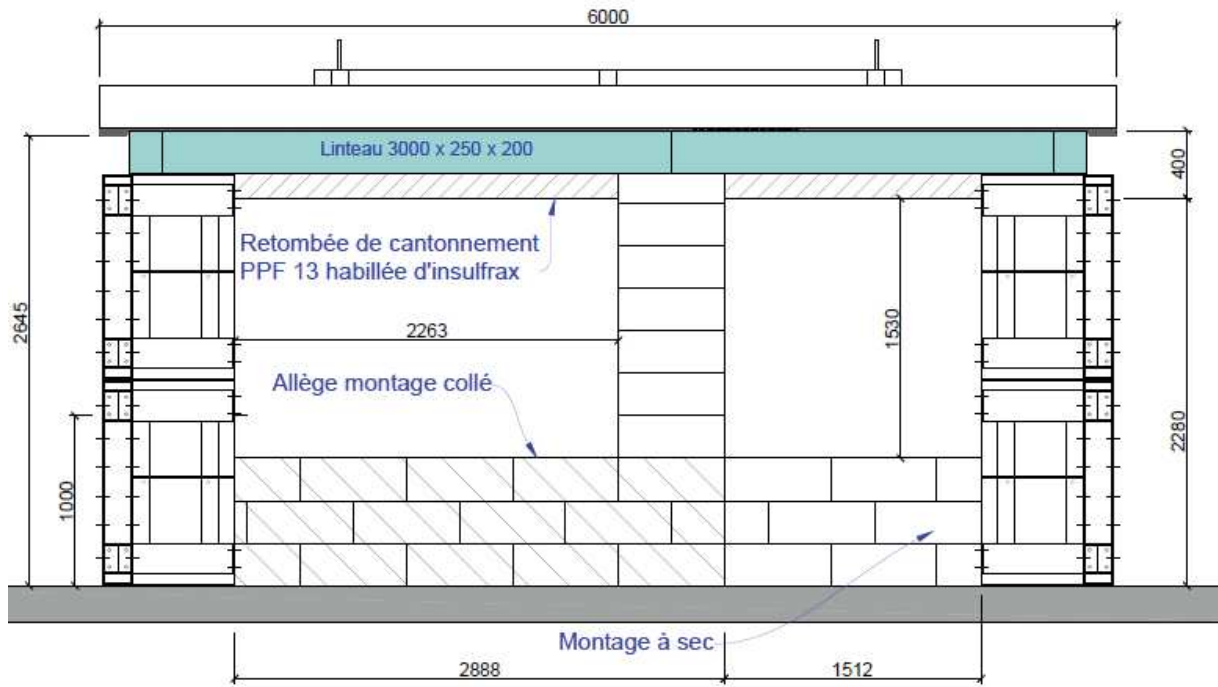


Figure A-4 : Élévation Sud de la cellule d'essai pour l'essai 0 (sans bois)

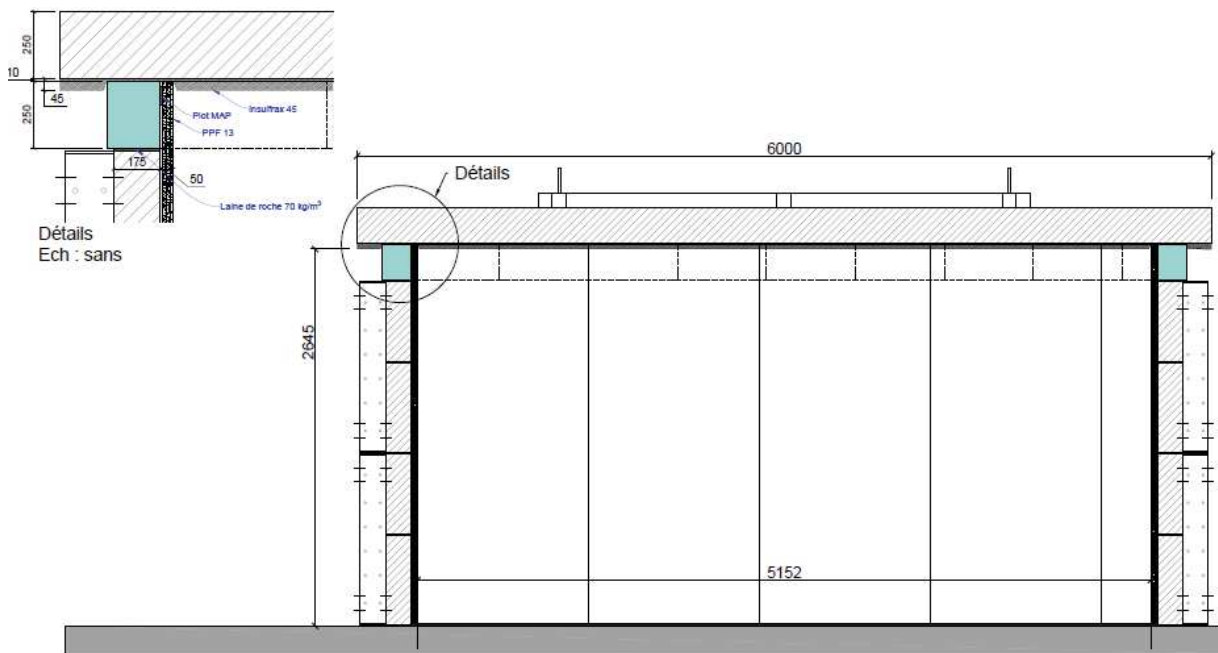


Figure A-5 : Coupe AA de la cellule d'essai pour l'essai 0 (sans bois) avec détail

A.2 CONFIGURATION AVEC UNE PAROI EN CLT

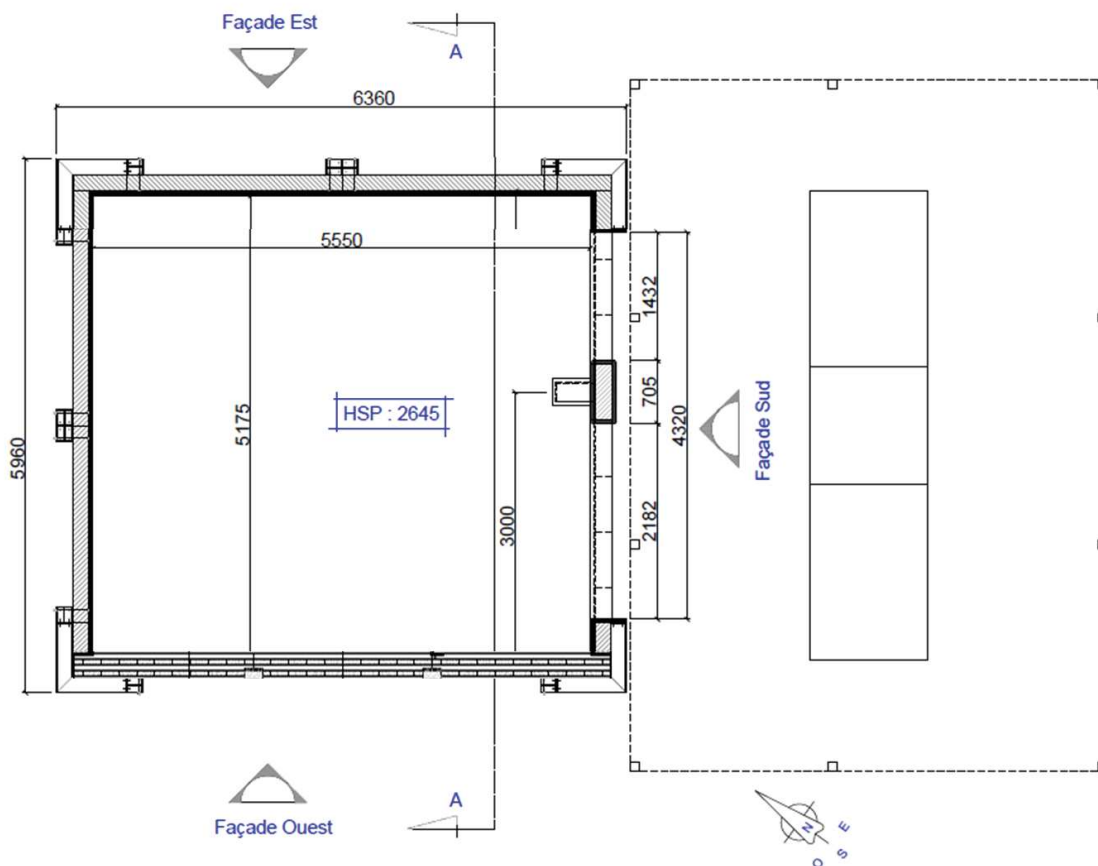


Figure A-6 : Vue en plan de la cellule d'essai pour l'essai 1 (Paroi CLT)

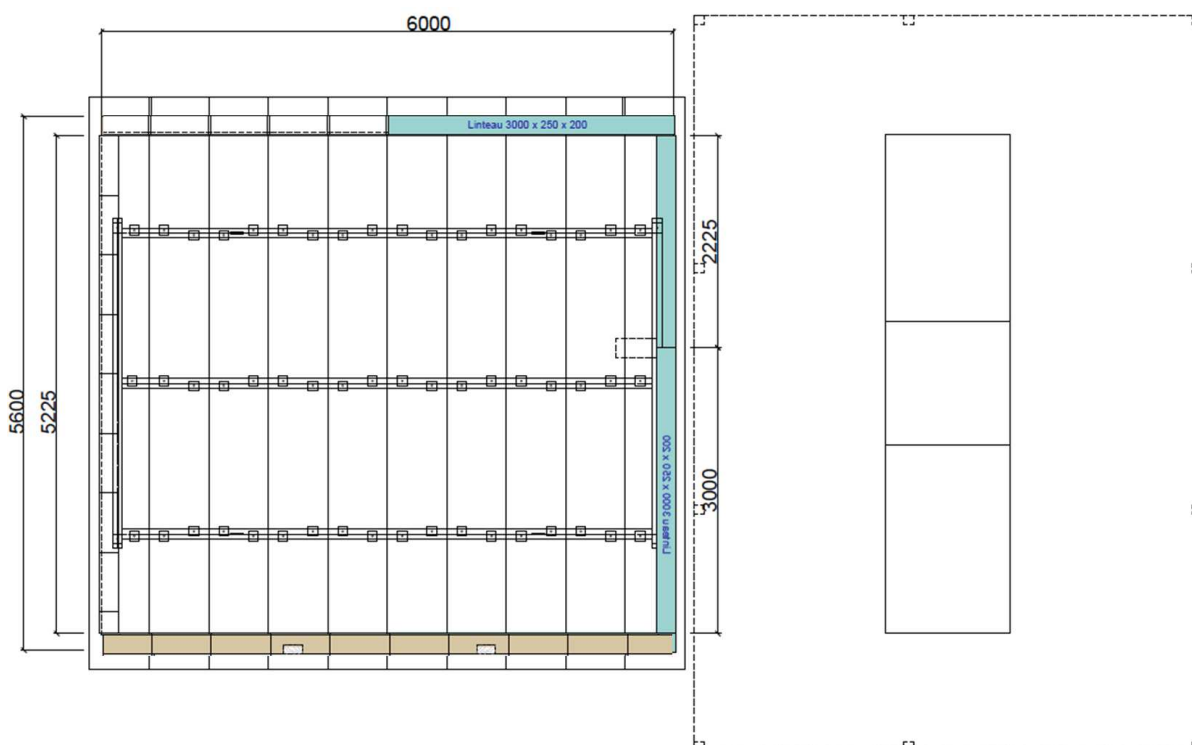


Figure A-7 : Vue de dessus de la cellule d'essai pour l'essai 1 (Paroi CLT)

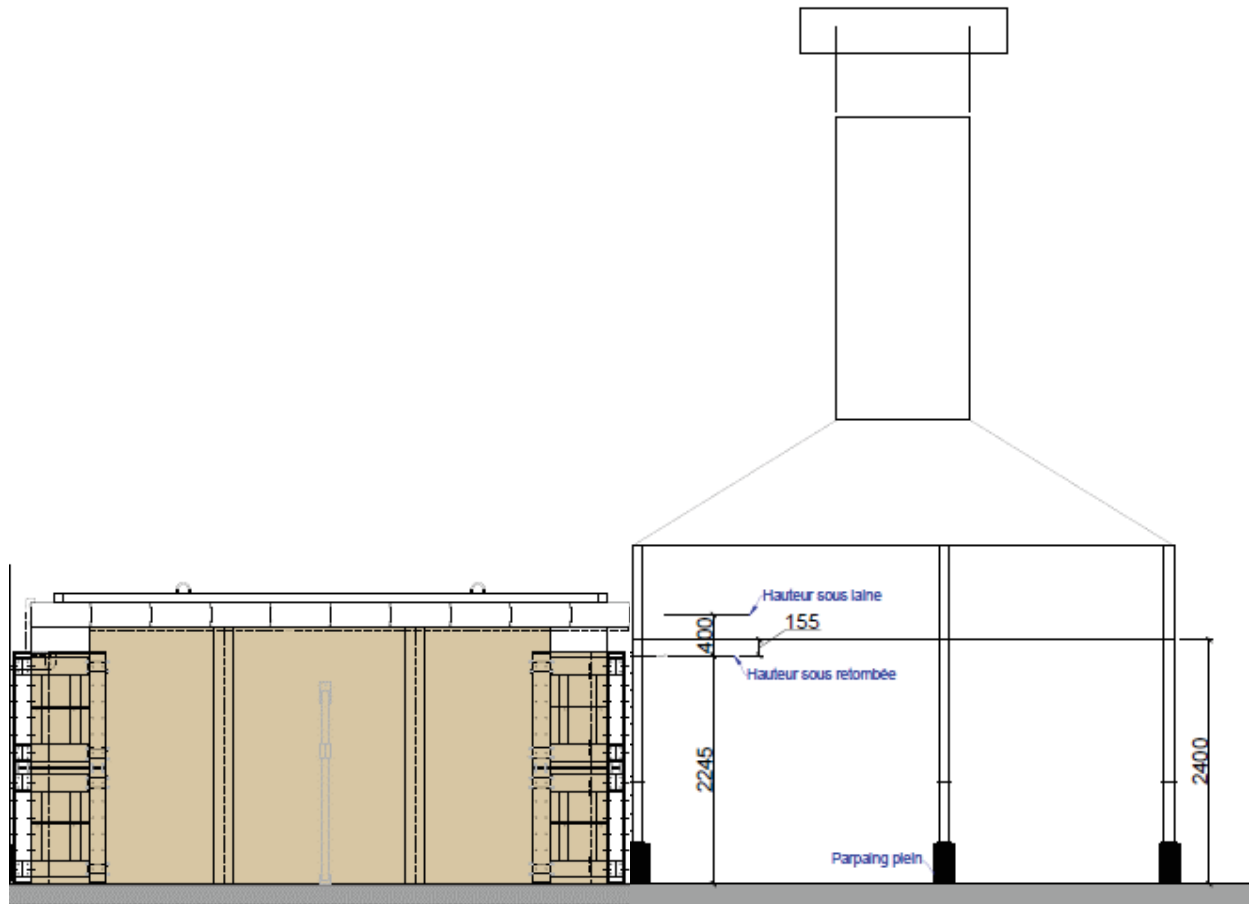


Figure A-8 : Élévation Ouest de la cellule d'essai pour l'essai 1 (Paroi CLT)

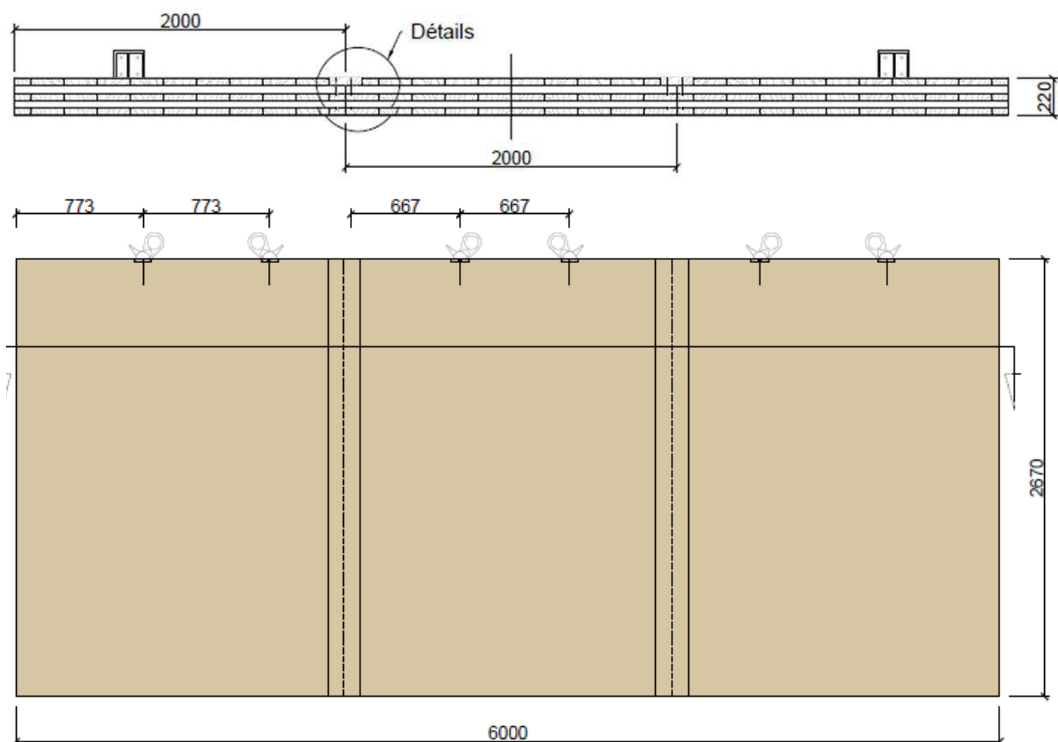


Figure A-9 : Détail de la paroi pour l'essai 1 (Paroi CLT)

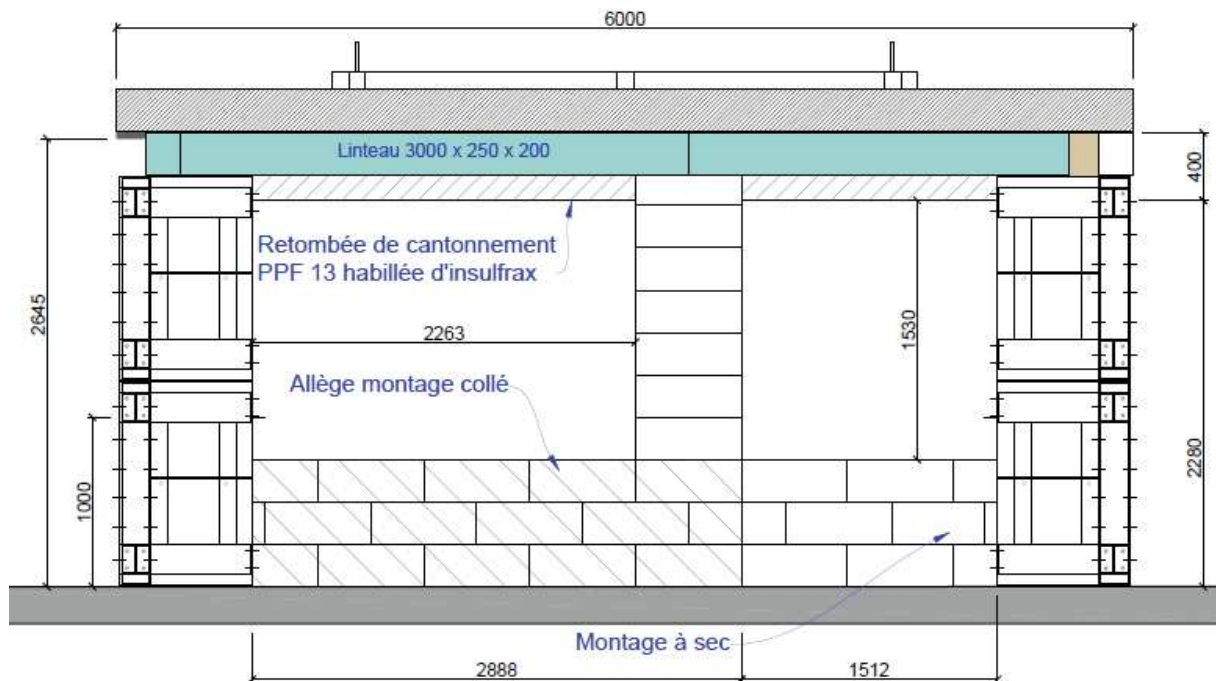


Figure A-10 : Élévation Sud de la cellule d'essai pour l'essai 1 (Paroi CLT)

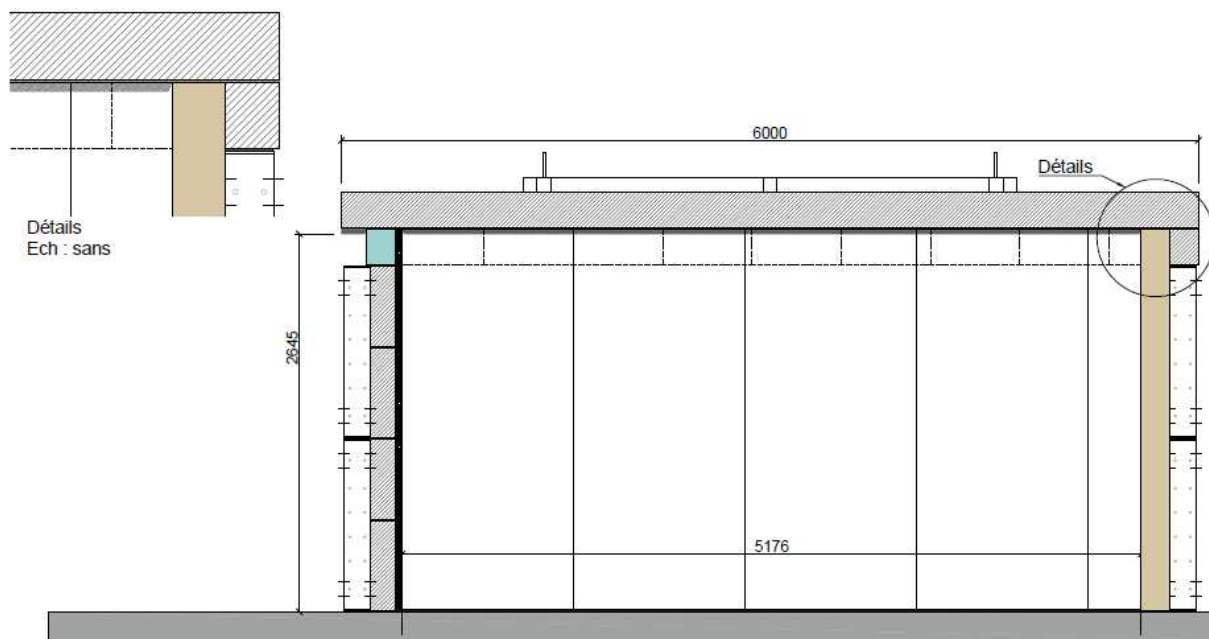


Figure A-11 : Coupe AA de la cellule d'essai pour l'essai 1 (Paroi CLT) avec détail

A.3 CONFIGURATION AVEC UN PLAFOND CLT

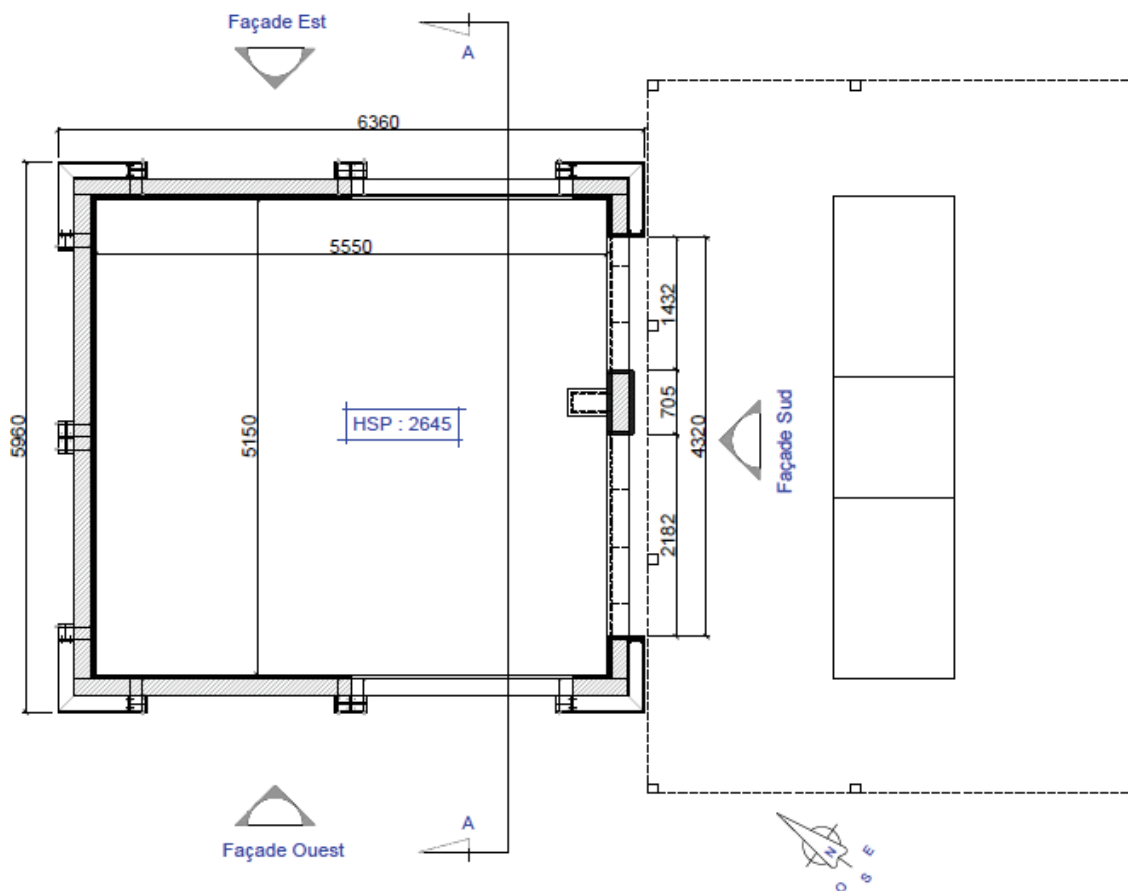


Figure A-12 : Vue en plan de la cellule d'essai pour les essais 2 et 4 (Plafond CLT)



Figure A-13 : Vue de dessus de la cellule d'essai pour les essais 2 et 4 (plafond CLT)

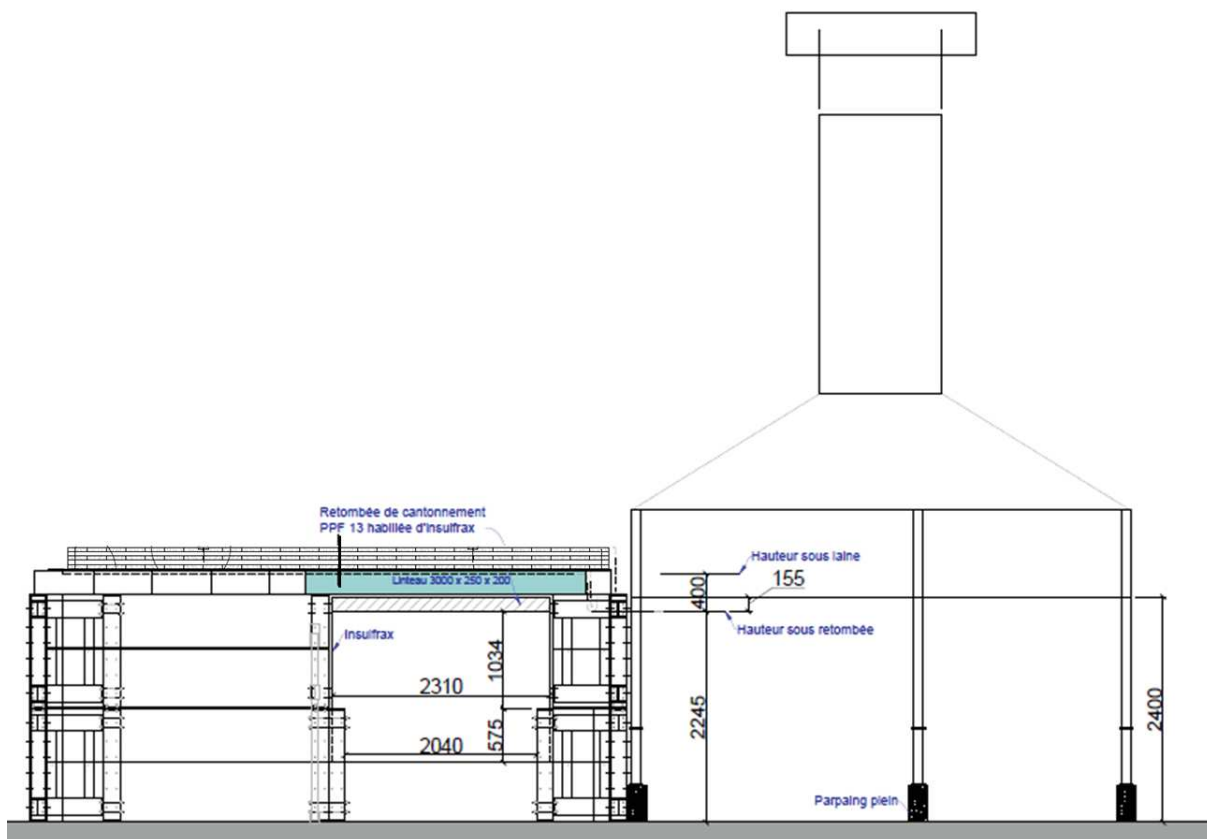


Figure A-14 : Élévation Ouest de la cellule d'essai pour les essais 2 et 4 (plafond CLT)

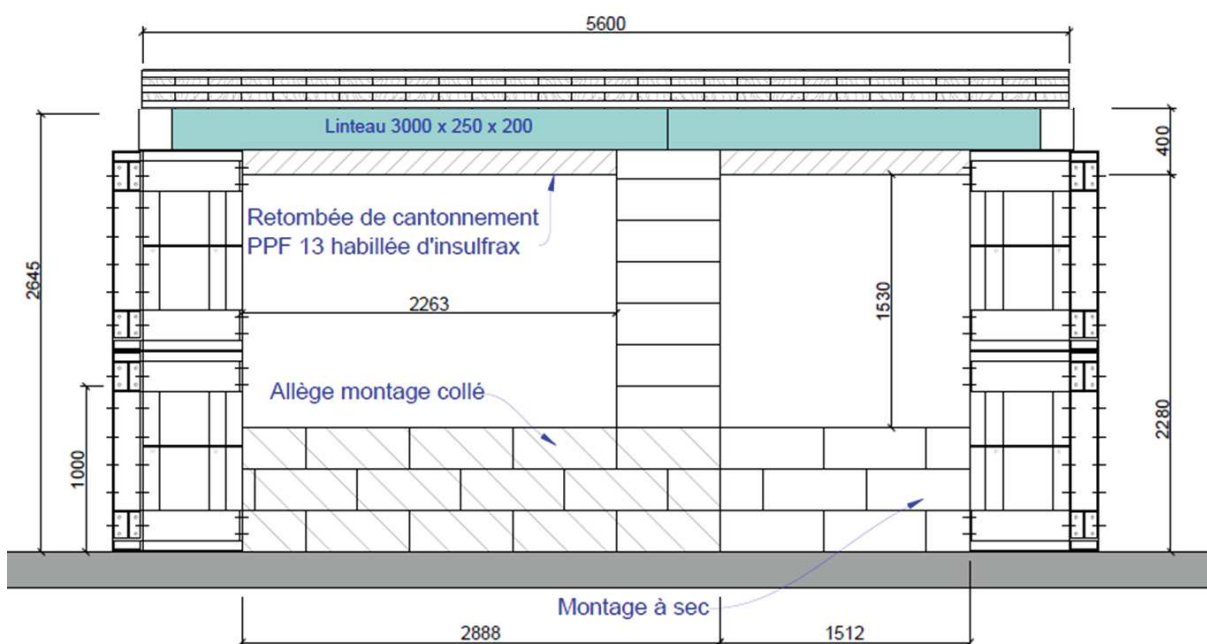


Figure A-15 : Élévation Sud de la cellule d'essai pour les essais 2 et 4 (plafond CLT)

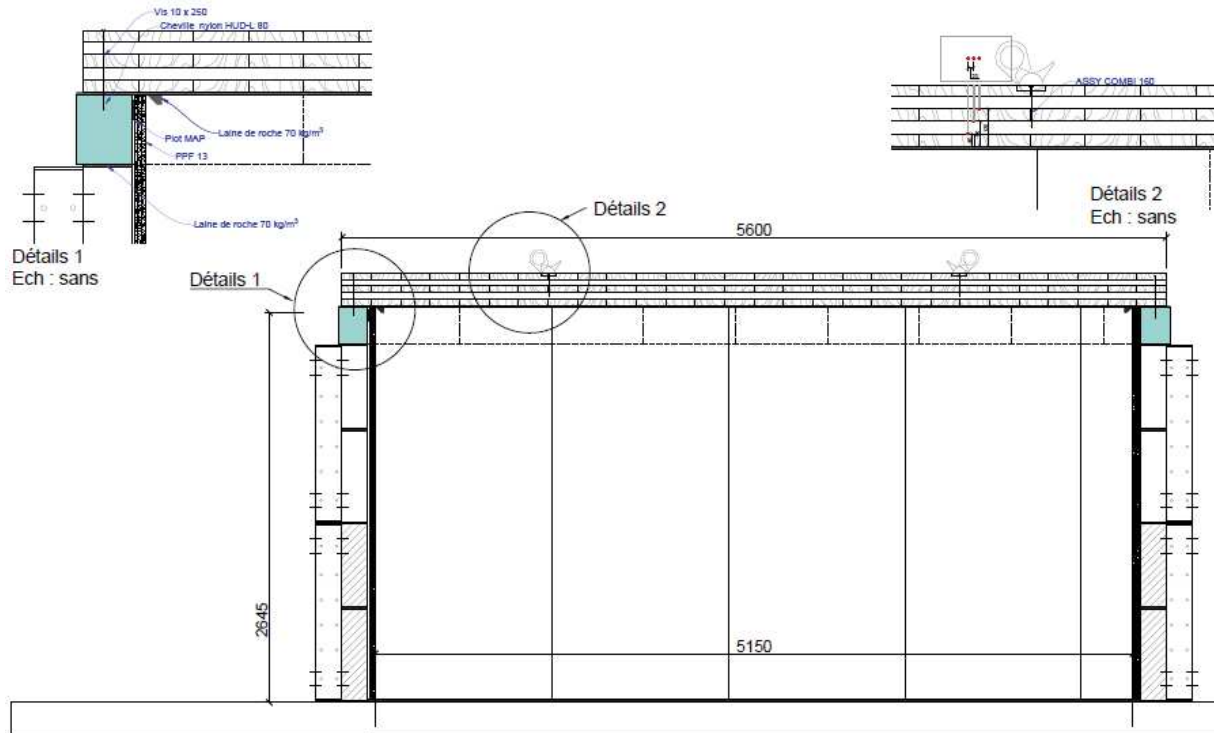


Figure A-16 : Coupe AA de la cellule d'essai pour les essais 2 et 4 (plafond CLT)

A.4 CONFIGURATION AVEC POTEAU/POUTRES LC

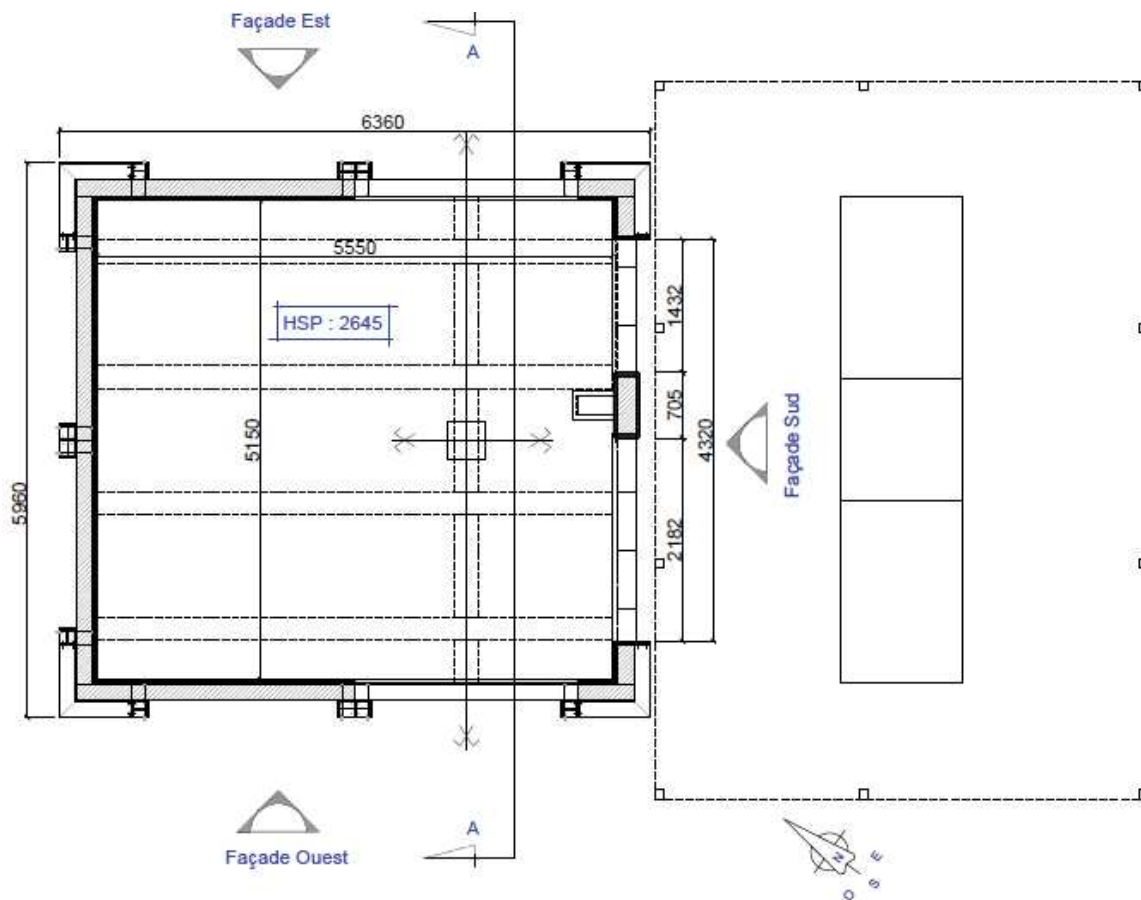


Figure A-17 : Vue en plan de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC)

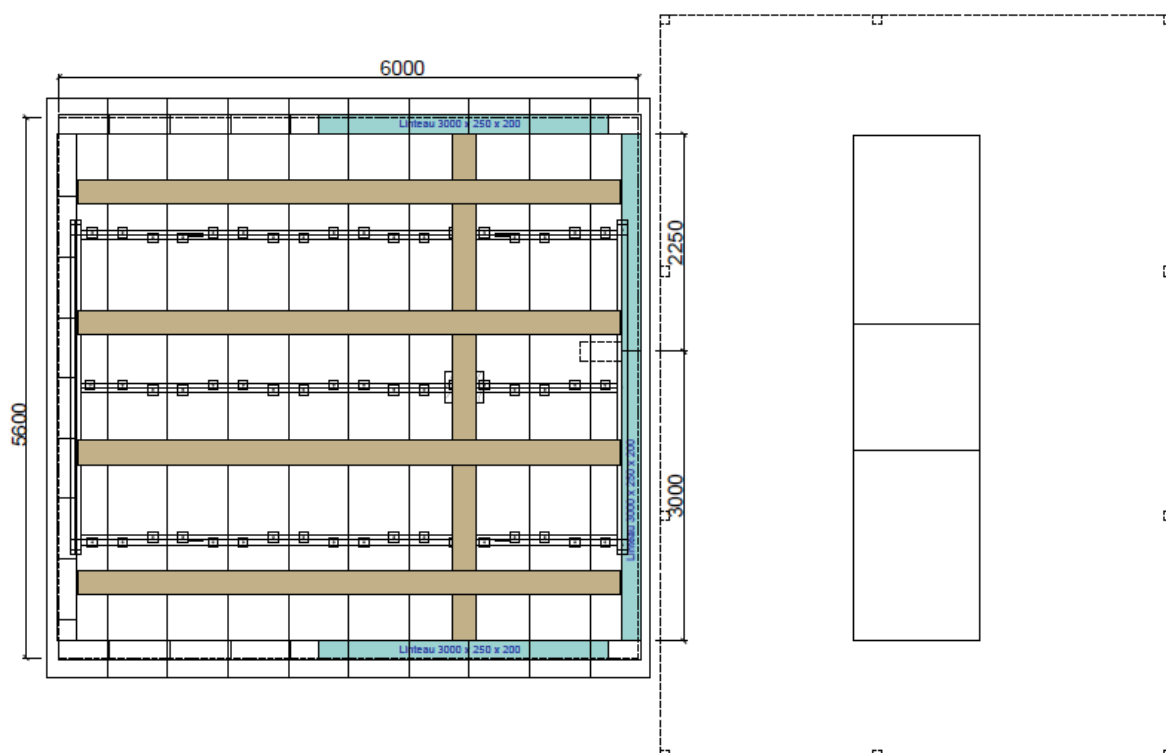


Figure A-18 : Vue de dessus de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC)

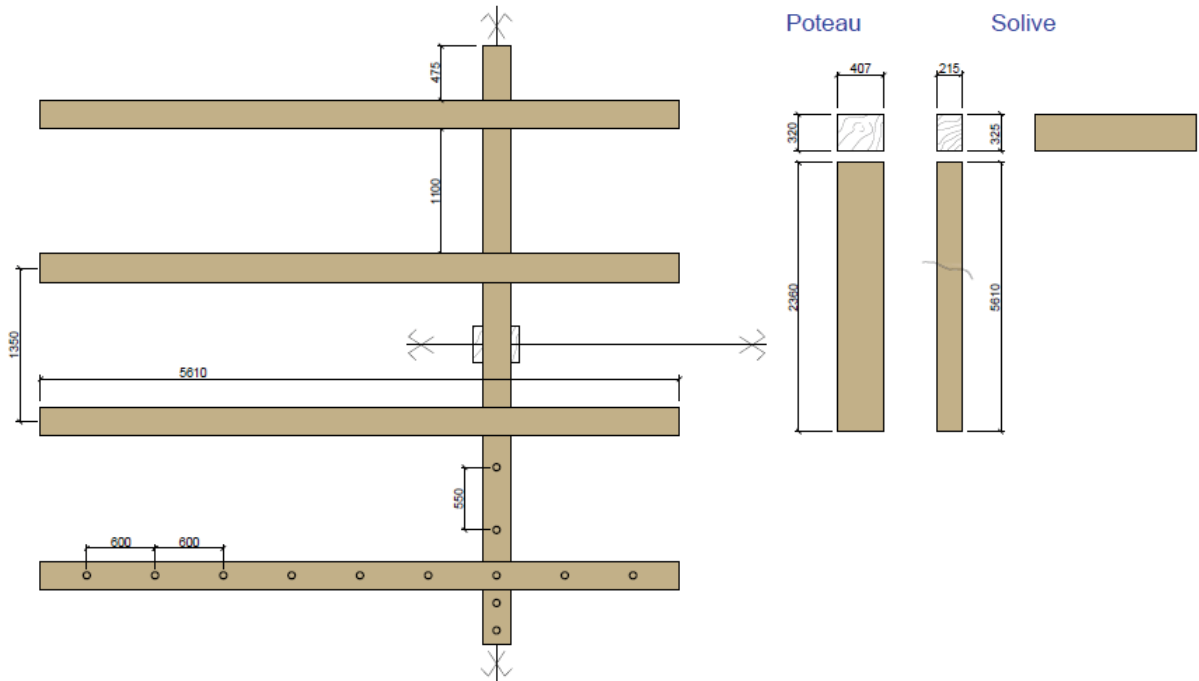


Figure A-19 : Détail de la structure bois de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC)

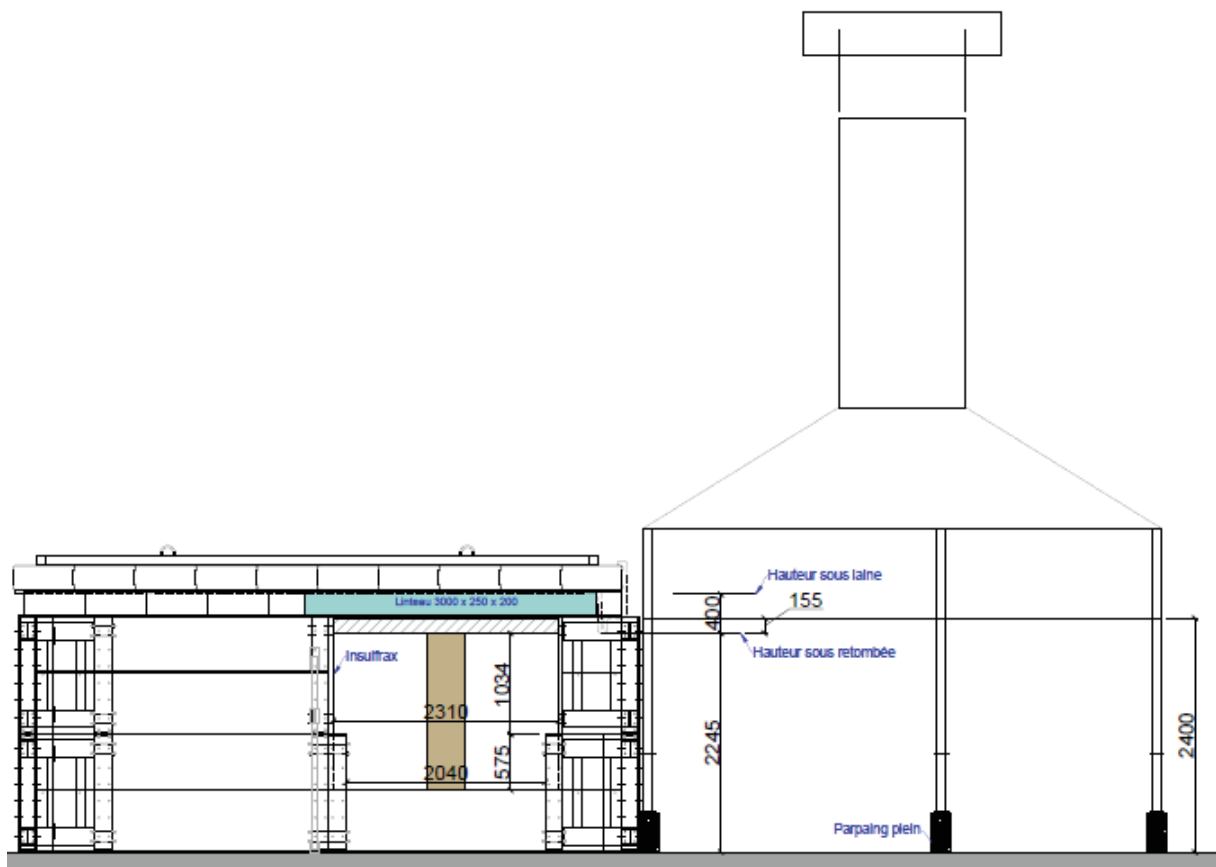


Figure A-20 : Élévation Ouest de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC)

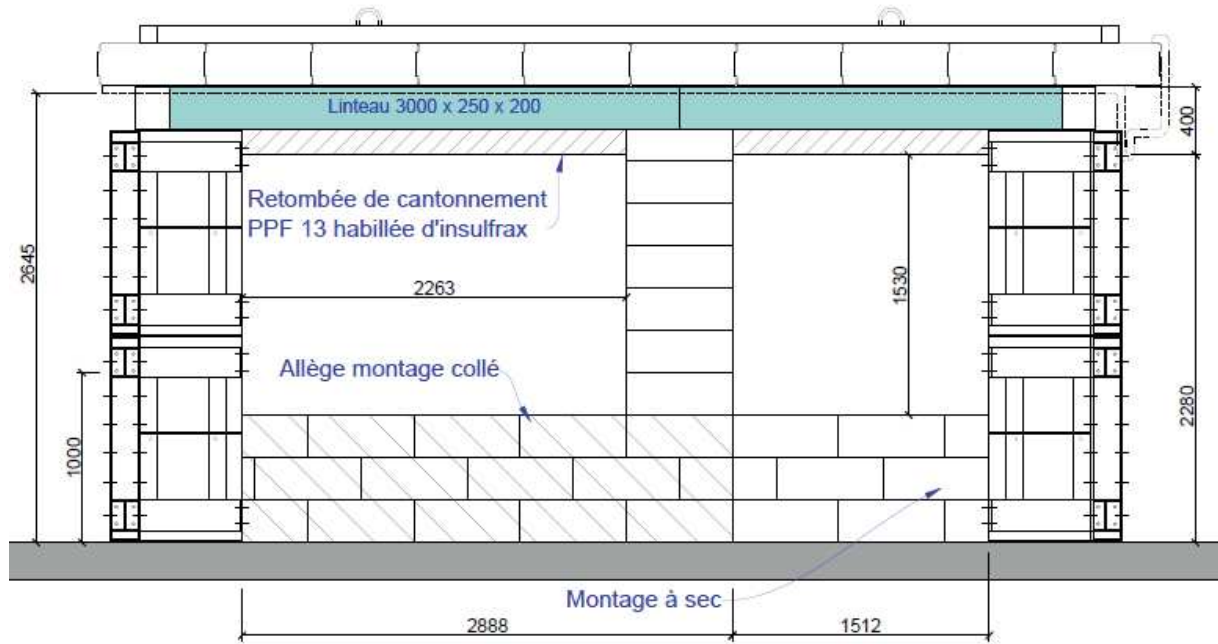


Figure A-21 : Élévation Sud de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC)

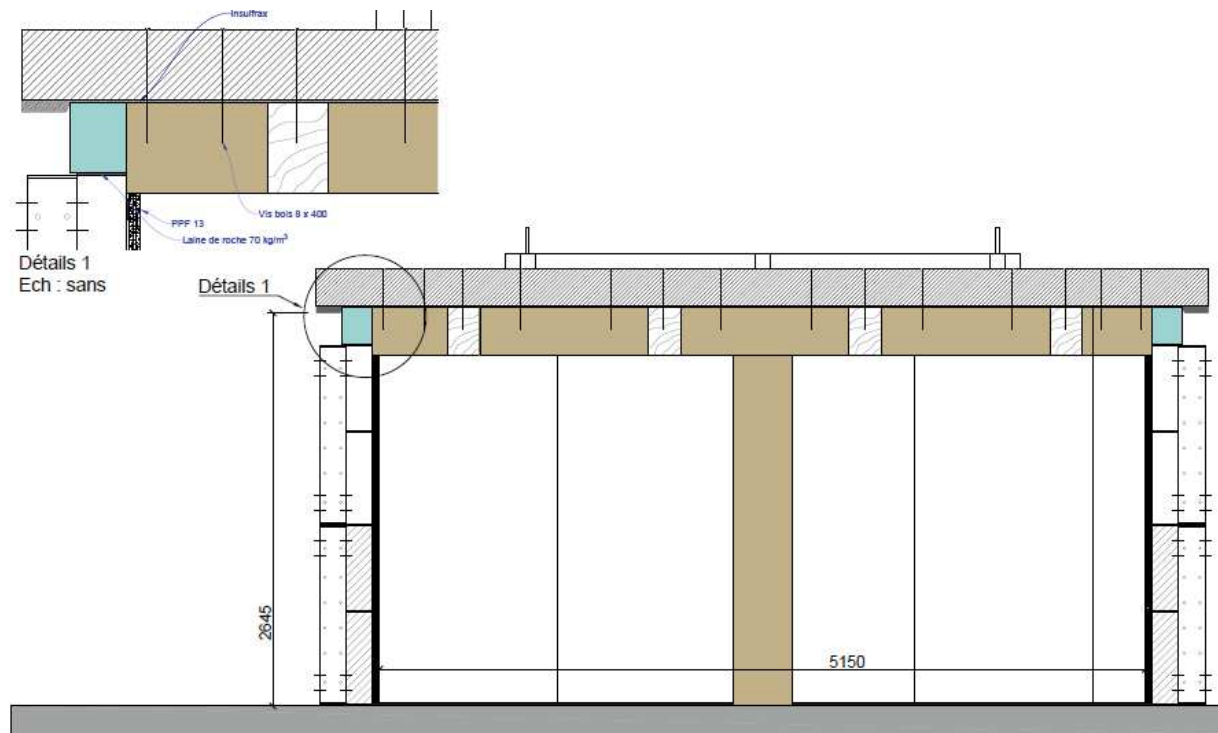


Figure A-22 : Coupe AA de la cellule d'essai pour l'essai 3 (poteau/poutres LC) avec détail

A.5 HOTTE

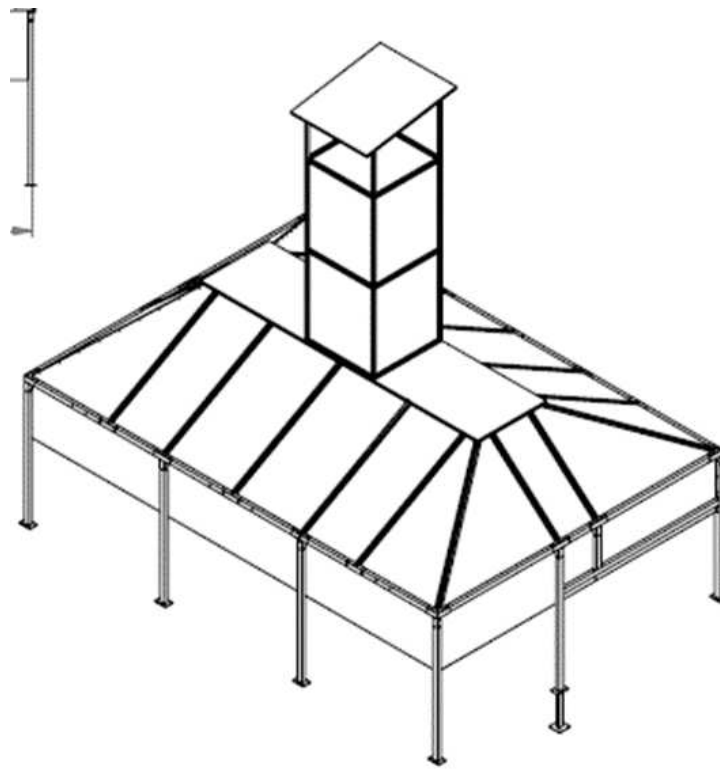


Figure 10-23 : Vue isométrique de la hotte Efectis Saint-Yan

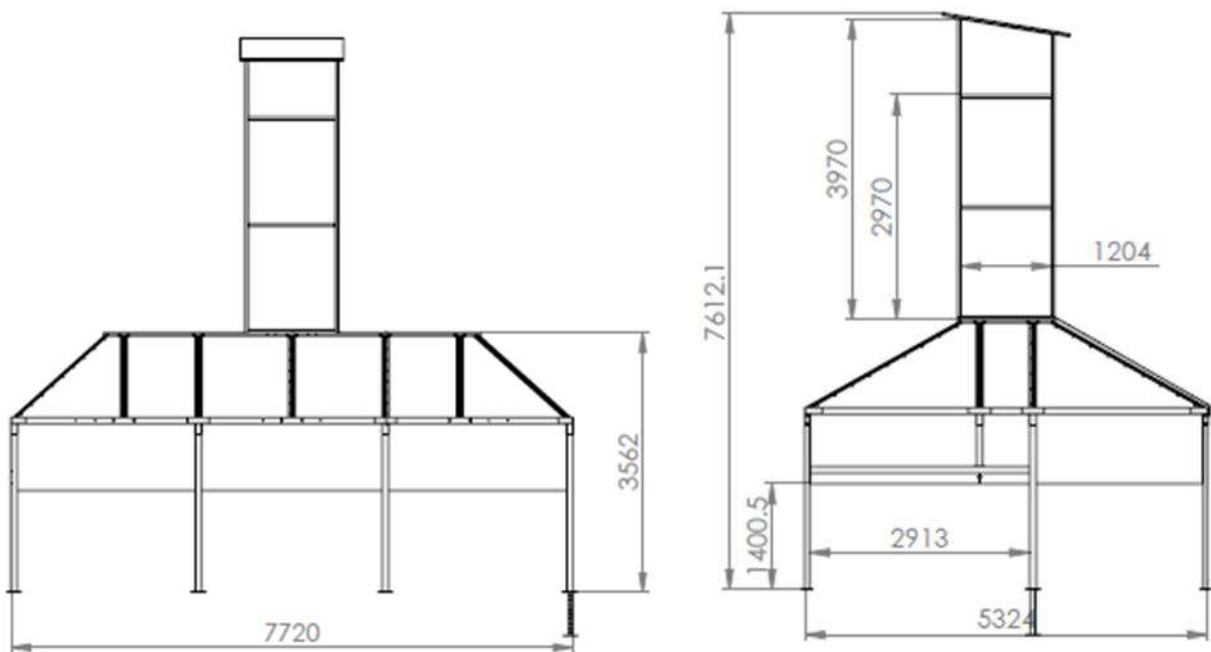


Figure A-24 : Vues en élévation a) longitudinale et b) transversale de la hotte Efectis Saint-Yan

ANNEXE B ILLUSTRATIONS DU MONTAGE DES CONFIGURATIONS

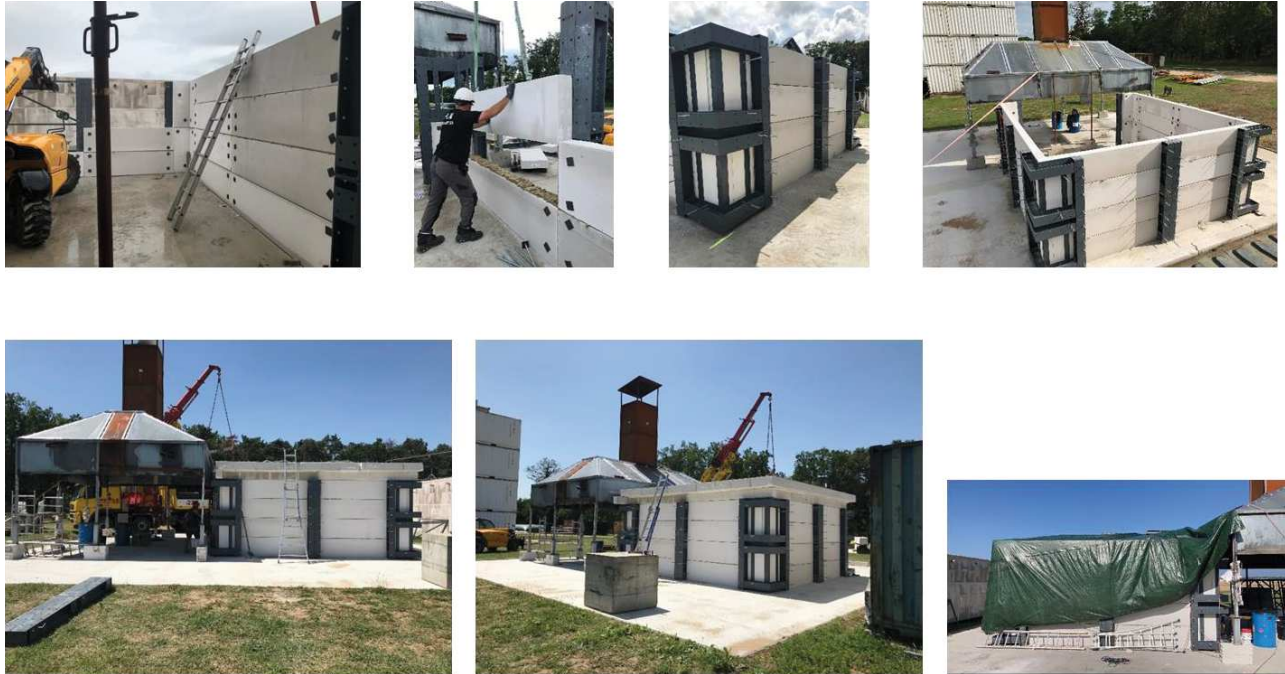


Figure B-25 : Prises de vue pendant la construction de la cellule d'essais



Figure B-26 : Prises de vue pendant la mise en place des panneaux CLT de la paroi pour l'essai 1



Figure B-27 : Prises de vue pendant la mise en place des panneaux CLT du plafond pour l'essai 2



Figure B-28 : Prises de vue pendant la mise en place des poutres LC pour l'essai 3

ANNEXE C PLAN D'INSTRUMENTATION DANS LA CELLULE D'ESSAIS

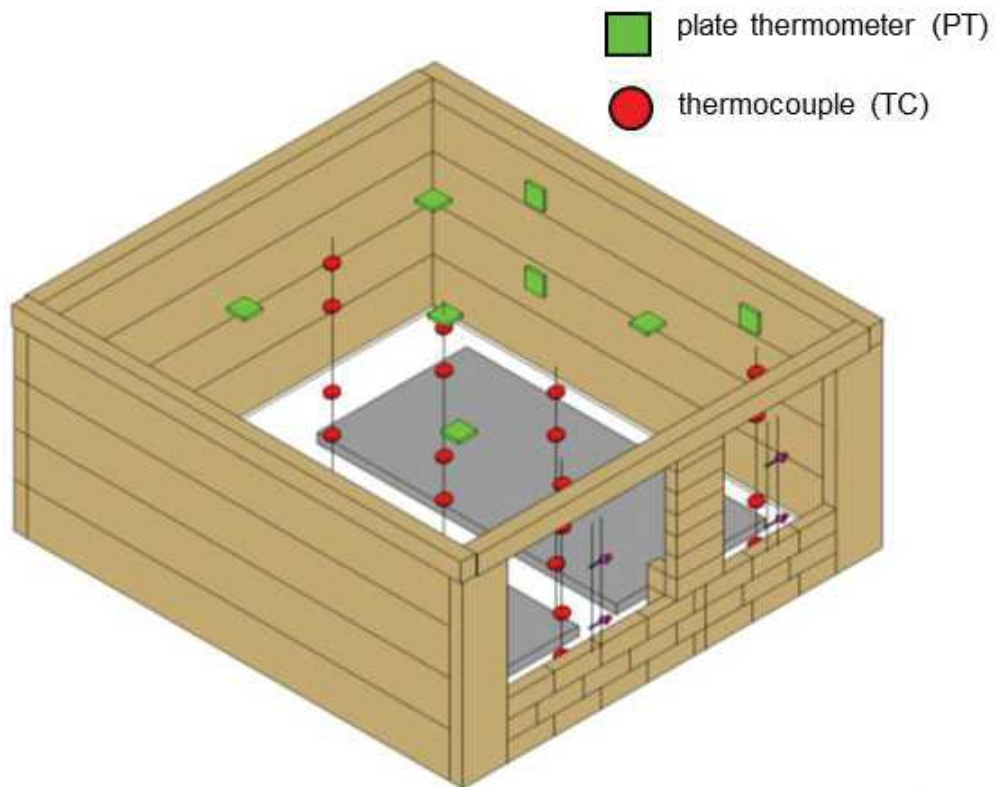


Figure C-29 : Vue globale de la localisation des points de mesure à l'intérieur de la cellule d'essais

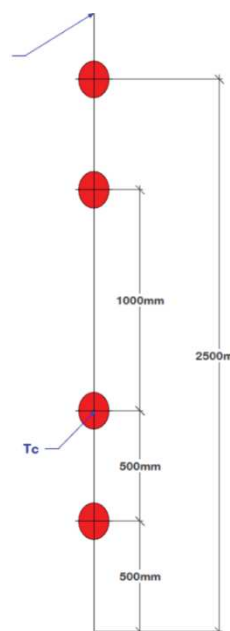


Figure C-30 : Détail d'une ligne verticale de thermocouples

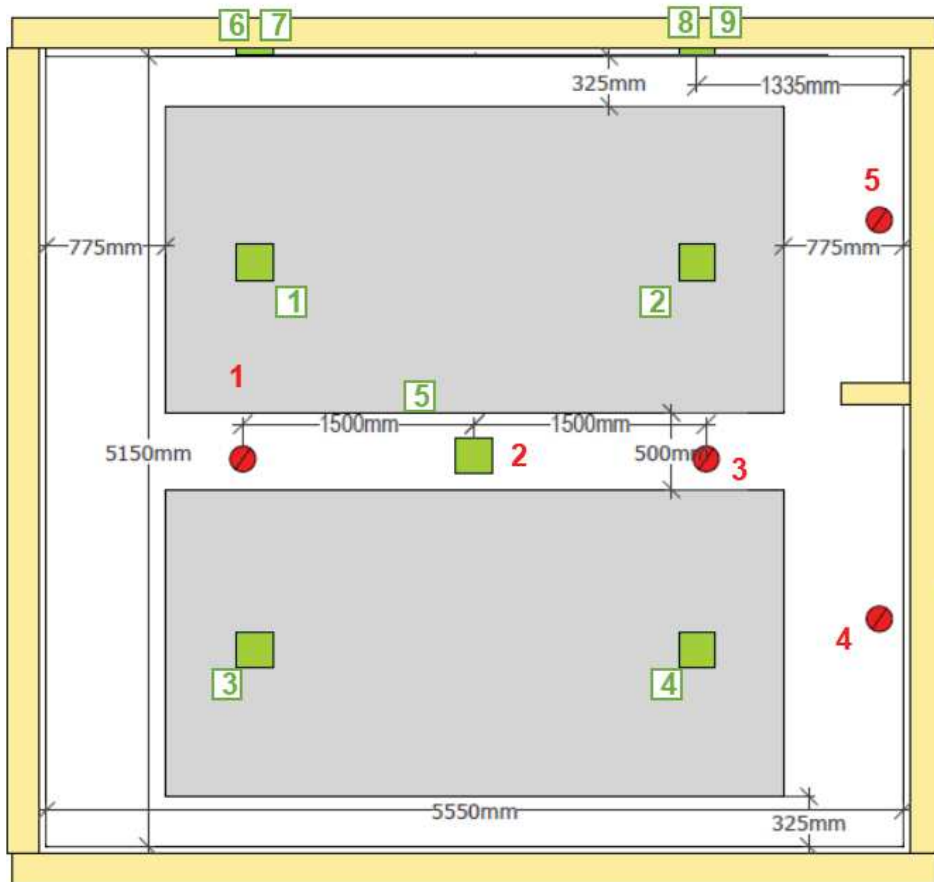


Figure C-31 : Vue de dessus de la localisation des points de mesure à l'intérieur de la cellule d'essais (repérage de la numérotation)

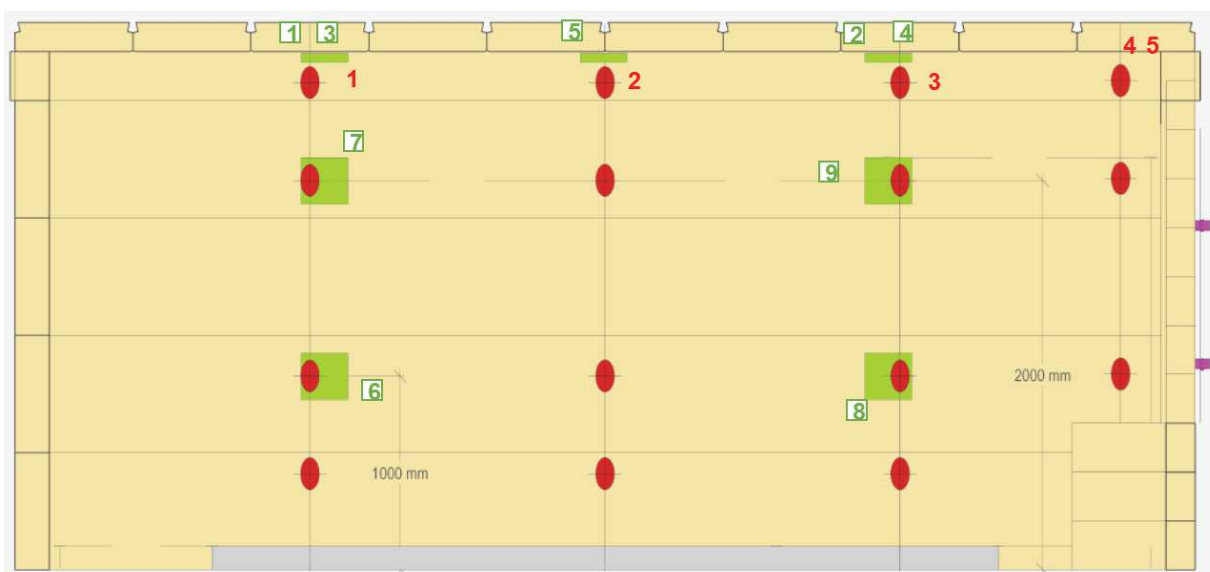


Figure C-32 : Vue en coupe de la localisation des points de mesure à l'intérieur de la cellule d'essais Repérage de la numérotation des lignes de thermocouples (TC) et des plate thermometers (PT)

ANNEXE D DÉTERMINATION DES DÉBITS CALORIFIQUES

D.1 DÉTERMINATION PAR PERTE DE MASSE (PLATEFORME DE PESÉE DANS LA CELLULE D'ESSAIS)

Le débit calorifique issu de la combustion et par conséquent la dégradation thermique d'un combustible hétérogène peut être déterminé en fonction de son débit de pyrolyse et de sa chaleur de combustion comme suit :

$$HRR = \Delta H_c \chi \frac{d}{dt} m_{comb.}$$

où :

- HRR (heat release rate) est le débit calorifique (kW)
- $m_{comb.}$ est la masse du combustible (kg)
- ΔH_c est la chaleur de combustion du combustible (kJ/kg)
- χ est le coefficient de rendement de combustion

Le débit de pyrolyse du foyer peut être estimé à partir de la perte de masse du combustible. Le coefficient de rendement de combustion dépend des conditions de ventilation du foyer.

D.2 DÉTERMINATION PAR CONSOMMATION D'OXYGÈNE (CHEMINÉE DE LA HOTTE CALORIMÉTRIQUE)

Le débit calorifique peut être calculé suivant la méthode de consommation d'oxygène définie par Thornton [17] avec une correction de la valeur par les concentrations en dioxyde et monoxyde de carbone [18][16].selon la formulation suivante :

$$HRR = \left[E\phi - (E_{CO} - E) \frac{1 - \phi X_{CO}^{Ae}}{2 X_{O_2}^{Ae}} \right] \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi(1 - \alpha)} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}^a) X_{O_2}^{Ae}$$

avec

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{Ae} (1 - X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae}) - X_{O_2}^{Ae} (1 - X_{CO_2}^a)}{(1 - X_{O_2}^{Ae} - X_{CO_2}^{Ae} - X_{CO}^{Ae}) X_{O_2}^a}$$

où :

- HRR est le débit calorifique (kW)
- E est le débit de chaleur par unité de masse de l'oxygène (13,1kJ/kg),
- E_{CO} est le débit de chaleur par unité de masse de l'oxygène consommé pour le CO (17,6kJ/kg),
- ϕ est le facteur de déplétion de l'oxygène,
- α est le coefficient d'expansion volumétrique,
- \dot{m}_e est le débit massique des fumées passant dans la cheminée (g/s),
- M_{O_2} est la masse molaire de l'oxygène (28g/mol),
- M_a est la masse molaire de l'air (29g/mol),
- $X_{O_2}^{Ae}$ est la fraction molaire de l'oxygène sortant par la cheminée,
- $X_{CO_2}^{Ae}$ est la fraction molaire du dioxyde de carbone sortant par la cheminée,
- X_{CO}^{Ae} est la fraction molaire du monoxyde de carbone sortant par la cheminée,
- $X_{H_2O}^a$ est la fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air ambiant,
- $X_{O_2}^a$ est la fraction molaire de l'oxygène dans l'air ambiant,
- $X_{CO_2}^a$ est la fraction molaire du dioxyde de carbone dans l'air ambiant air,
- X_{CO}^a est la fraction molaire du monoxyde de carbone dans l'air ambiant.

D.3 DÉTERMINATION PAR FLUX DE CHALEUR CONVECTIF ET RADIATIF AUX OUVERTURES

Le débit calorifique libéré dans un local peut être estimé à partir du flux de chaleur convectif sortant par les ouvertures et de la puissance perdue par rayonnement aux ouvertures [20][21].

Le débit calorifique convectif aux ouvertures s'exprime comme suit :

$$HRR_{conv} = C_p \dot{m}_{ouv} (T_{ouv} - T_{ref})$$

où :

- HRR_{conv} est le débit calorifique (kW),
- C_p est la chaleur spécifique de l'air (1005J/kg/K),
- \dot{m}_{ouv} est le débit massique de gaz chaud sortant par l'ouverture (kg/s),
- T_{ouv} est la température à l'ouverture (K),
- T_{ref} est la température de référence (K),
- C_d est un coefficient expérimental de rendement de l'ouverture (-).

Avec

$$\dot{m}_{ouv} = C_d \int_A \rho V dA$$

Le débit massique peut être évalué simplement à partir de la vitesse et de la température au niveau de l'ouverture en faisant l'hypothèse que le plan neutre de l'écoulement se fait à environ 2/3 de la hauteur [21]. On a ainsi la relation suivante :

$$\dot{m}_{ouv} = C_d \rho_{ouv} V_{ouv} 2/3 A_0$$

où :

- ρ_{ouv} est la masse volumique au point haut de l'ouverture (kg/m³),
- V_{ouv} est la vitesse mesurée au point haut de l'ouverture (m/s),
- A_0 est la surface de l'ouverture (m²),

La masse volumique est déterminée à partir de la mesure de la température en utilisant une loi des gaz parfait. Le coefficient de rendement de l'ouverture reste à déterminer expérimentalement.

Le débit calorifique radiatif aux ouvertures s'exprime comme suit :

$$HRR_{rad} = A_0 \varepsilon_f \sigma (T_{ouv}^4 - T_{ref}^4)$$

où :

- ε_f est le facteur de vue de l'ouverture (1),
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann (5,67 · 10⁻⁸ W/m²/K⁴),
- A_0 est la surface de l'ouverture (m²),

D.4 VÉRIFICATION AVEC L'ESSAI 0 (CALIBRATION)

Pour vérifier l'applicabilité des modes de détermination et notamment s'assurer que la détermination du débit calorifique par les mesures aux ouvertures est possible, on s'appuie sur les résultats des mesures de l'essai 0 où seul un foyer primaire est impliquée (pas de bois structural) et où les trois méthodes de détermination du HRR peuvent être confrontées car qualifiant le même foyer.

Cet essai implique un foyer primaire de 8 bûchers de 633 kg au total. Chaque bûcher est constitué de 22 tasseaux de 800mm de long et 100mm x 100mm de section. Outre deux tasseaux servant de pied, il est composé de 5 couches de 4 tasseaux également espacés.

En se basant sur les équations du SFPE Handbook [16] et des caractéristiques des bûchers de bois, un bûcher de 22 tasseaux conduit à un pic de puissance de 394kW et une durée de 99min de feu. Un essai unitaire de

ce bûcher unitaire de l'ordre de 80kg dans une hotte calorimétrique du laboratoire Efectis permet de confirmer la pertinence de la formulation. Cet essai unitaire permet également de relever que pour brûler 80kg (dont 8kg de cendres et charbon) une énergie de 1321MJ a été libérée, représentant une chaleur de combustion apparente de 16,2MJ/kg. Le rendement de combustion dans des conditions de bonne ventilation est de 92%.

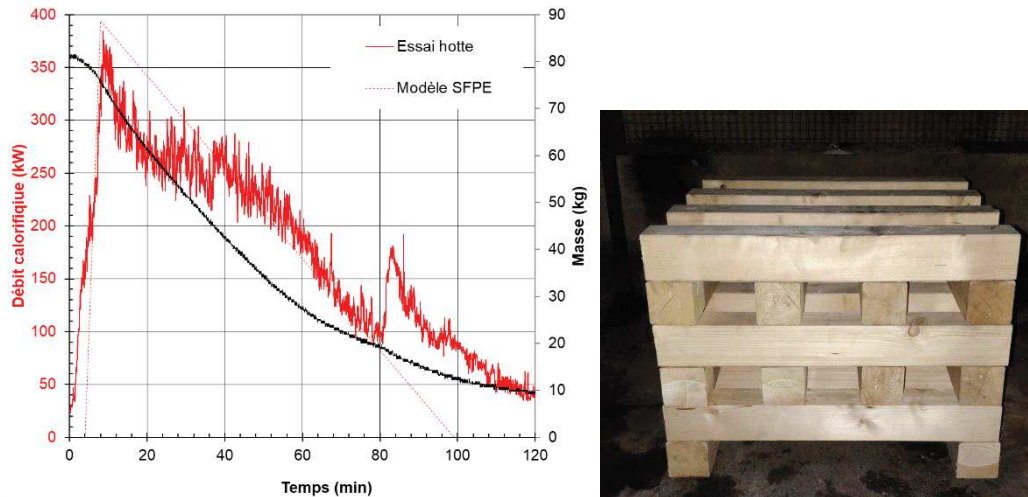


Figure D-33 : Évolution temporelle du débit calorifique et de la perte de masse d'un bûcher unitaire de 22 tasseaux (80kg) – comparaison au modèle SFPE

On peut alors prédire par cette formulation du SFPE Handbook [16] que pour un bûcher de 2000mm de largeur et de profondeur avec 5 niveaux de 8 tasseaux (les 4 bûchers par plateforme de pesée de l'essai 0 étant accolés les uns aux autres), une puissance 1800kW est attendu, soit 3600kW pour le foyer primaire en totalité.

Les différentes méthodes de détermination pour ce foyer primaire sont relativement comparables. Un coefficient expérimental de rendement de l'ouverture de 0,75 est fixé pour la mesure du débit calorifique convectif aux ouvertures. Pour le débit calorifique de perte de masse, une chaleur de combustion apparente de 15,8 MJ/kg a été retenue sur la base du ratio entre l'énergie libérée déterminée par calorimétrie et les 500 kg de bois de bûcher consommé. Le rendement de combustion est donc passé à 90% du fait du compactage des bûchers unitaires.

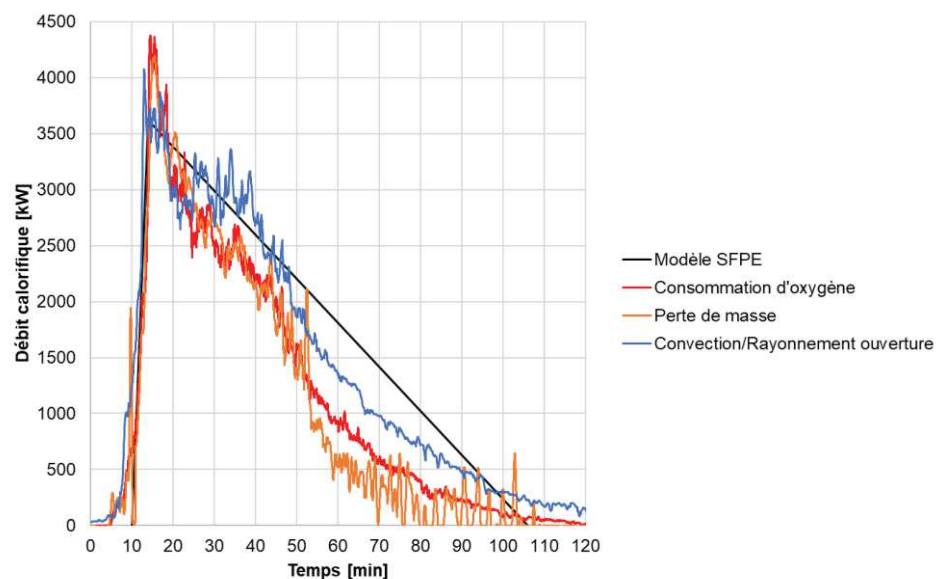


Figure D-34 : Évolution temporelle des débits calorifiques pour l'essai 0 (cf. §3) Comparaison des méthodes expérimentales avec le modèle SFPE [16]

ANNEXE E PHÉNOMÈNES LOCALISÉS D'INCANDESCENCE

E.1 ESSAI 1 – CONFIGURATION PAROI CLT MUF

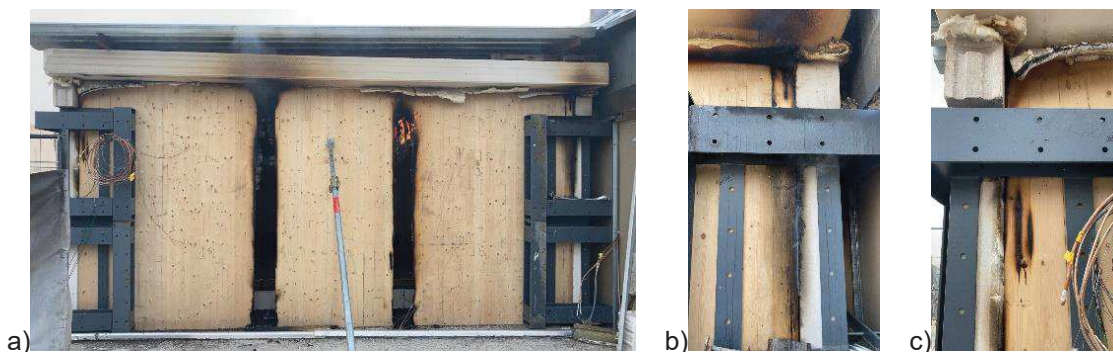


Figure E-35 : Vues extérieures le lendemain de l'Essai 1 (perçement au niveau des feuillures)
 a) générale ; b) détail coin supérieur Nord ; c) détail coin supérieur Sud

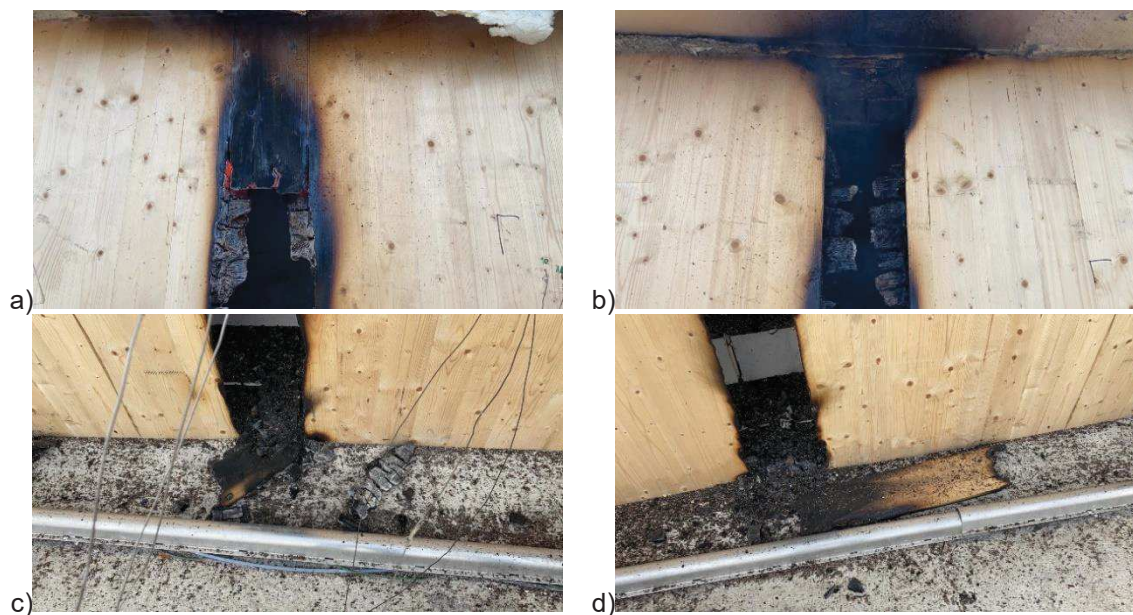
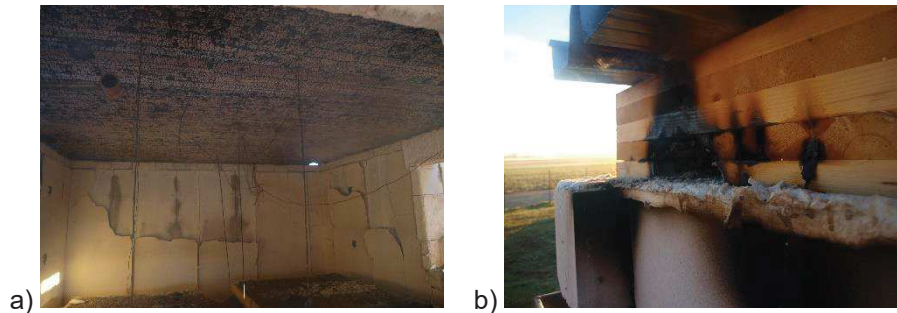


Figure E-36 : Détails extérieurs des percements au niveau des feuillures le lendemain de l'essai 1
 a) Supérieur Sud ; b) Supérieur Nord ; c) inférieur Sud ; d) inférieur Nord ;

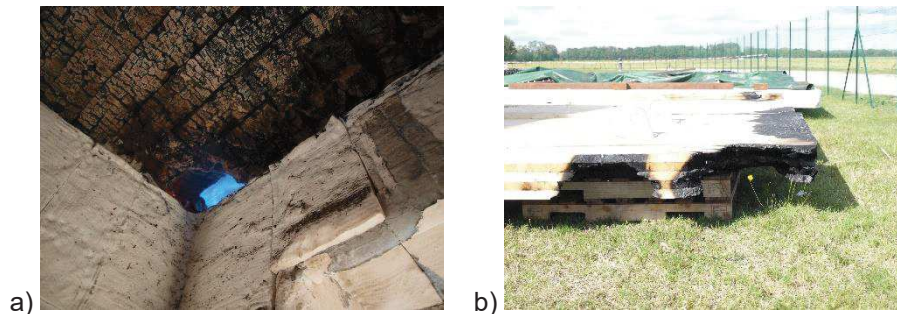


Figure E-37 : Vues intérieures des percements au niveau des feuillures le lendemain de l'essai 1

E.2 ESSAI 2 – CONFIGURATION PLAFOND CLT MUF



**Figure E-38 : Vues du percement du plafond CLT coin Sud-Est le lendemain de l'essai 2
 a) intérieur ; b) extérieur**



**Figure E-39 : Vues du percement du plafond CLT coin Nord-Est le lendemain de l'essai 2
 a) intérieur ; b) extérieur**



**Figure E-40 : Vues extérieures du percement du plafond CLT le lendemain de l'essai 2
 a) au-dessus de l'ouverture Est ; b) feuillures Nord-Est ; c) Coin Nord-Est**

E.3 ESSAI 3 – CONFIGURATION POTEAUX-POUTRES LAMELLÉ-COLLÉ



Figure 10-41 : Non inflammation des gaz sous plafond le soir de l'essai 3 ($t_{fin}+3h$)



Figure E-42 : Vues de l'état des poutres et du poteau en BLC le soir de l'essai 3 ($t_{fin}+3h$)
 a) interface solive/paroi Nord côté Est ; b) interface solive/paroi Nord côté Ouest ; c) interface solives/paroi Sud d) interface entretoise/poteau ; e) et f) détails interface entretoises/solives



Figure E-43 : Vues de l'état des poutres et du poteau en BLC le lendemain de l'essai 3
a) interface entretoise/poteau ; b) interface solives/entretoises ; c) interface solive/paroi Nord

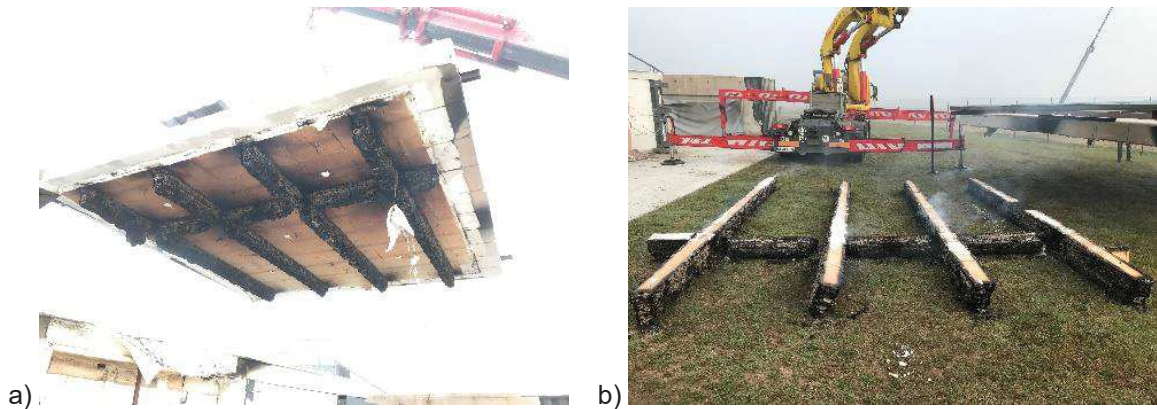


Figure E-44 : Vues de l'état des poutres en BLC le lendemain de l'Essai 3

E.4 ESSAI 4 – CONFIGURATION PLAFOND CLT PU

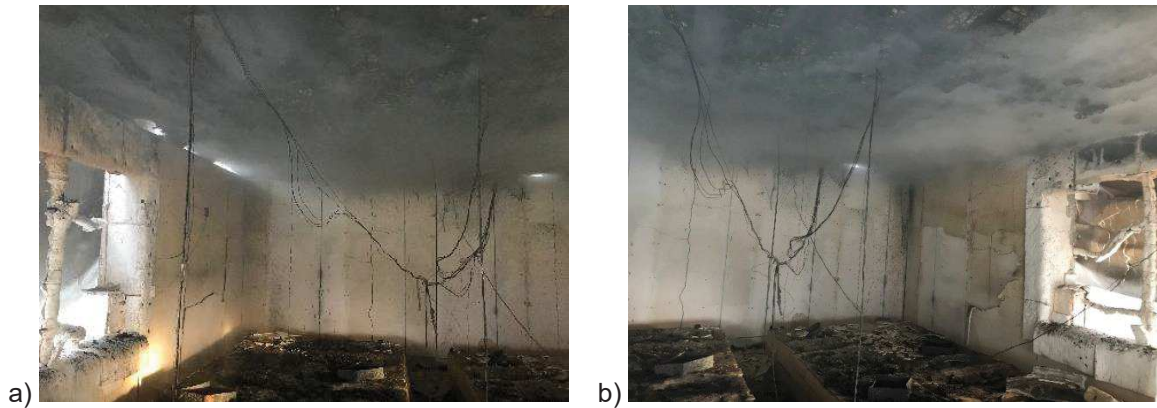


Figure E-45 : Vues intérieures des percements le lendemain de l'Essai 4
a) interface plafond/paroi côtés Ouest et Nord ; b) interface plafond/paroi côtés Nord et Est



Figure E-46 : Vues extérieures des percements le lendemain de l'Essai 4
a) interface plafond/paroi côté Ouest ; b) interface plafond/paroi côté Est



a)

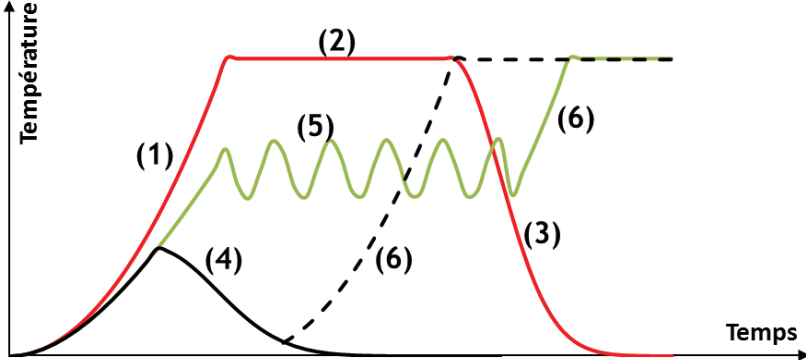


**Figure E-47 : État de la sous-face du plafond CLT le lendemain de l'Essai 4
a) panneau central ; b) panneau Sud ; c) panneau Nord**

ANNEXE F GLOSSAIRE ET DÉFINITION

Consensus mais n'engage que les auteurs

Nom/expression	Définition/ description
Auto-extinction	Arrêt naturel et non provoqué de la combustion du bois avec flammes (combustion vive) ou sans flammes (incandescence)
Auto-inflammation	Inflammation dans laquelle un mélange combustible-comburant porté à une température et une pression suffisantes s'enflamme « spontanément »
Bois Lamellé-Collé	Élément structurel obtenu par l'aboutage et le collage de lamelles de bois dont le fil est généralement parallèle. L'épaisseur des lamelles est limitée, sinon il s'agit de bois massifs reconstitués.
Bois Massif	Matériau cellulosique résineux ou feuillu, utilisé dans la construction bois. En structure, il s'agit de pièces de bois obtenues à partir de grumes ou de pièces de bois plus importantes.
Bois Massif Reconstitué	Élément linéaire reconstitué par collage de lames de bois massif, aboutées ou non au moment de la fabrication (NF EN 14080 :2013)
Carbonisation	Transformation plus ou moins rapide d'une substance organique (bois) en charbon, gaz et goudrons, sous l'effet de la chaleur (<i>en</i> : <i>charring</i>)
CLT ou bois lamellé croisé	Matériau de construction à base de bois, qui se présente sous la forme d'un panneau multicouche de planches croisées à 90° et collées entre elles. Les planches peuvent être aboutées et/ou collées à chant (NF EN 16351) (<i>en</i> : <i>Cross Laminated Timber</i>)
Combustion	Réaction chimique d'oxydoréduction entre un combustible et un comburant (le dioxygène de l'air dans ce cas). C'est une réaction globalement et généralement fortement exothermique, autonome, susceptible de s'accélérer brutalement et d'être accompagnée d'émission de rayonnements. Selon les conditions, le dégagement de chaleur de la réaction de combustion peut conduire à une expansion rapide du milieu réactionnel ou à une forte augmentation de pression.
Délamination	Phénomène de décollement des lamelles de bois d'un BMR, BLC ou CLT lors d'un incendie, pouvant conduire à une inflammation du bois sain exposé.
Développement d'incendie	Cf. Régime de combustion
Embrasement généralisé	Passage brusque à l'état de combustion généralisée en surface de l'ensemble des matériaux combustibles dans un espace fermé. (<i>en</i> : <i>flash-over</i>)
Feu couvant	Combustion lente d'un matériau, sans flamme ni émission visible, et généralement révélée par une élévation de la température ou par émission de fumée. Il se caractérise par la décomposition du matériau considéré, un fort dégagement de fumée et une incandescence locale due à la réaction entre le résidu solide et l'oxygène de l'air (<i>en</i> : <i>smouldering</i>).
Feu sous-ventilé / sous-oxygéné	Cf. Régime de combustion
Incandescence	Mode de combustion du bois, où une réaction très exothermique et sans flamme se produit à la surface du charbon de bois
Pyrolyse	Décomposition thermique irréversible de matières due à une simple élévation de température. Il s'agit du premier stade de transformation thermique après la déshydratation ou le séchage. Elle produit des gaz de pyrolyse inflammables. Elle peut avoir lieu en l'absence d'oxygène.
Régime de combustion	Le combustible et la ventilation (apport en air frais) sont les principaux facteurs contrôlant le développement d'un foyer d'incendie. En milieu confiné, le comportement du feu est relativement complexe. En fonction des combustibles, de leur agencement, de la géométrie et de la ventilation du local, il est possible

Nom/expression	Définition/ description
	<p>d'observer différentes évolutions du feu conduisant chacune à des phénomènes particuliers comme l'illustre la figure ci-après.</p>  <p>Évolution théorique de la température moyenne d'un local en situation d'incendie réel</p> <p>Lorsque le local est suffisamment ventilé ou que la quantité de combustible est faible, on observe une montée en puissance du feu lié à la combustion de proche en proche des éléments inflammables présents dans le local en feu (1). La cinétique de développement du feu est liée à la nature des matériaux enveloppe. On parle alors de <u>feu contrôlé par le combustible</u>.</p> <p>Si tous les combustibles présents sont mis en œuvre, on observe alors une généralisation (2), puis une extinction par épuisement du combustible (3).</p> <p>Dans le cas des locaux avec peu d'ouvrants ou en présence d'un foyer très important, le développement de l'incendie est contrôlé par l'apport d'air frais. La quantité d'oxygène présent dans le local n'est pas suffisante pour que le feu atteigne la phase d'embrassement généralisé. On parle alors de <u>feu sous-ventilé</u>.</p> <p>Plusieurs situations peuvent être observées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La combustion devient très difficile pour une concentration en oxygène inférieure à 12%. On a alors une extinction du foyer (4). • L'air frais à l'extérieur peut aussi être entraîné à l'intérieur par les ouvertures disponibles. Cet apport d'air permet une reprise de la combustion générant une augmentation de la température et donc une dilatation des gaz. La pression dans le local remonte entraînant une expulsion de fumées vers l'extérieur et ainsi l'oxygène disponible. La pression baisse de nouveau et le processus se répète consécutivement, ce qui conduit à une pulsation du feu (5). • Pendant la phase d'auto-extinction ou de pulsation, un apport d'air frais massif et brutal peut conduire à retrouver une situation en apport d'oxygène favorable à la combustion et pouvant créer soit un flash-back ou un flash-over (6).
Retour de flammes	Phénomène dû à la non-stabilisation d'une flamme de pré mélange qui quitte sa position d'équilibre statique apparent (<i>en : flash-back</i>).
Ossature bois	œuvre d'ouvrages ou de parties d'ouvrage de constructions à structure en bois, dont notamment les murs sont réalisés à partir de poteaux et poutres en bois,
LVL ou lamibois	Matériau composite constitué de couches de placage de bois dont les fibres sont principalement orientées dans la même direction (orientation parallèle) (<i>en : Laminated Veneer Lumber</i>)
OSB	Panneau de grandes particules orientées suite à l'assemblage de plusieurs lamelles de bois sous forme de couches successives. Les lamelles sont compressées puis encollées dans le même sens à l'aide d'une résine synthétique et d'une cire (<i>en : Oriented Strand Board</i>)



A D I V B O I S

www.adivbois.org

CODIFAB

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