



Efectis France
Espace Technologique
Bâtiment Apollo
Route de l'Orme des Merisiers
F-91193 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80

RAPPORT D'ÉTUDE

Référence : 18-001351b-ACH
Affaire : SA-18-002298

COMPLEMENT D'ETUDE DE STABILITE AU FEU ET DE MODE DE RUINE D'UN ENTREPOT SITUE A LA CHAPELLE D'ARMENTIERES (CELLULES C ET D)

Rapport d'étude

Client demandeur DOMOTI S.A.S
Référence et date de commande Bon pour accord du 13 juin 2018
Projet Cellules C et D

Date : 13 juillet 2018
Indice de révision : B
Nombre de pages : 55

Auteur(s) :
Audrey CHAMPON

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	13/07/2018	Version initiale
B	13/07/2018	Modification de l'arrêté de référence

SOMMAIRE

1. Introduction.....	5
2. Documents de référence	5
2.1. Documents fournis par le client	5
2.2. Documents règlementaires	5
2.3. Documents fournis par Efectis France	5
2.4. Autres	6
3. Description du bâtiment.....	6
3.1. Description générale.....	6
3.2. Description des cellule C et D	6
3.3. Compartimentage	7
4. Exigences réglementaires et méthodologie.....	8
4.1. Exigences réglementaires	8
4.2. Méthodologie	9
5. Hypothèses générales.....	10
5.1. Hypothèses concernant les sollicitations thermique réelles appliquées	10
5.1.1. Sollicitations thermiques dans la cellule C	10
5.1.2. Sollicitations thermiques dans la cellule D	12
5.2. Hypothèses de calcul thermiques et thermomécaniques.....	13
5.2.1. Calculs de transfert thermique.....	13
5.2.2. Calculs thermo-mécaniques	13
5.3. Caractéristiques des matériaux.....	13
5.4. Géométrie générale des bâtiments	15
5.5. Assemblages et conditions d'appuis	15
5.5.1. Caractéristiques des assemblages.....	15
5.5.2. Longueurs de flambement considérées	15
5.6. Conditions de chargement et combinaisons d'actions	16
6. Vérification des exigences prescriptives sous feu normalisé.....	17
6.1. Détermination de la profondeur de carbonisation	17
6.2. Vérification de la charpente bois	17
6.2.1. Vérification des pannes	17
6.2.2. Vérification des poutres	18
6.3. Vérification des poteaux en acier	18
6.3.1. Poteaux de la cellule C	18
6.3.1.1. Poteaux de rive (Côté façade)	18
6.3.1.2. Poteaux centraux.....	20
6.3.2. Poteaux de la cellule D.....	20
6.3.2.1. Poteaux de rive (Côté façade)	20
6.3.2.2. Poteaux centraux.....	22
6.4. Synthèse des résultats	23
7. Préconisations d'Efectis France pour le respect des exigences	24
7.1. Préconisations qualitatives.....	24
7.1.1. Poteaux de rive (côté mur coupe-feu) – cellules C et D.....	24
7.1.2. Poteaux de rive (supports de pannes) – cellules C et D	24
7.2. Solutions proposées pour vérifier le critère de stabilité R15.....	25

7.2.1.Poutres en bois lamellé-collé.....	25
7.2.2.Poteaux métalliques	25
8. Vérification des exigences sur le mode de ruine de la structure	26
8.1.Méthodologie	26
8.2.Etude de la cellule C.....	27
8.2.1.Echauffement des éléments de structure	27
8.2.2.Scénario n°1	28
8.2.3.Scénario n°2	30
8.3.Etude de la cellule D.....	32
8.3.1.Echauffement des éléments de structure	32
8.3.2.Scénario n°1	33
8.3.3.Scénario n°2	35
8.3.4.Scénario n°3	38
8.3.1.Scénario n°4	41
8.3.1.Scénario n°5	43
8.4.Synthèse des résultats	45
9. Récapitulatif des mesures a mettre en place.....	46
10. Note sur les cellules F et G (étude initiale)	48
11. Conclusions	49
ANNEXE A Sollicitations thermiques dans la cellule D.....	50
A.1 Incendie au rez-de-chaussée de la mezzanine	50
A.2 Incendie au-dessus de la mezzanine (R+1)	51
A.3 Incendie en dehors de la mezzanine (stockage de masse).....	53

1. INTRODUCTION

Efectis France a réalisé en 2017 une étude de mode de ruine sur un entrepôt exploité par la société DOMOTI à La Chapelle d'Armentières (59). Ce dernier est composé de 7 cellules de stockage. L'étude réalisée concernait alors les cellules A, B, E, F et G.

L'étude présentée dans ce rapport concerne le comportement au feu des cellules de stockage C et D. La structure de ces cellules doit respecter les exigences de l'arrêté du 11 avril 2017, à savoir :

- Exigences prescriptives sous feu normalisé : durée de stabilité R15 de la structure porteuse du bâtiment ;
- Exigences portant sur le mode de ruine de la structure : non ruine de la structure vers l'extérieur, non ruine en chaîne de la structure.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [1] Rapport de reconnaissance de structure STO-16-142.1, fourni par Structureo
- [2] Plan DWG : « plan des existants »
- [3] Plan de stockage
- [4] Photos du ramasse-panne dans la cellule D, envoyés par M. PRAGNERE le 22/06/2018
- [5] Dimensions du poteau de rive dans la cellule D, envoyées par M. PRAGNERE le 22/06/2018
- [6] Photos du mur coupe-feu séparant les bureaux de la zone de stockage dans la cellule D, envoyés par M. PRAGNERE le 02/07/2018

2.2. DOCUMENTS REGLEMENTAIRES

- [7] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- [8] NF EN 1990 et Annexe Nationale : « Eurocode 0 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures », mars 2003 et NF EN 1990/NA Décembre 2011.
- [9] NF EN 1991-1-1 et Annexe Nationale « Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments », Mars 2003 et NF P06-111-2 Juin 2004
- [10] NF EN 1991-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-2 : Actions sur les structures exposées au feu » Juillet 2003 et NF EN 1991-1-2/NA Février 2007
- [11] NF EN 1993-1-1 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 : Calcul des structures en acier– Partie 1.1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », Octobre 2005 et NF EN 1993-1-1/NA (31 Août 2013)
- [12] NF EN 1993-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 : Calcul des structures en acier– Partie 1.2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Novembre 2005 et NF EN 1993-1-2/NA (Octobre 2007)
- [13] NF EN 1995-1-1/A1/A2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments», Novembre 2005 et NF EN 1995-1-1/NA (Mai 2010)
- [14] NF EN 1995-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.2 : Généralités – Calcul des structures au feu», Septembre 2005 et NF EN 1995-1-2/NA (Avril 2007)
- [15] NF EN 338 : Bois de structure – classes de résistance, Juillet 2016.
- [16] NF EN 14080 : Structures en bois – Bois lamellé-collé et bois massifs reconstitués – Exigences, Août 2013.

2.3. DOCUMENTS FOURNIS PAR EFECTIS FRANCE

- [17] Photos prises lors de la visite sur site par M. Zouhairi Bernoussi, le 05/10/2016.
- [18] Photos prises lors de la visite sur site par Mme. Audrey Champon, le 30/05/2018.

[19] Dimensions des éléments de structure (poteaux/poutres) des cellules C et D, mesurées lors de la visite sur site par Mme. Audrey Champon, le 30/05/2018.

[20] Rapport d'étude n°16-003398b-ABO-ACH-PLO, datant du 27/03/2017.

[21] Note technique n°17-000563b-KMO, datant du 12/06/2017.

2.4. AUTRES

[22] User's Manual for SAFIR 2011: A computer program for analysis of structures subjected to fire. F.M. Franssen, University of Liège.

[23] Précis de bâtiment – Afnor – Nathan - 2012

3. DESCRIPTION DU BATIMENT

3.1. DESCRIPTION GENERALE

L'entrepôt étudié est divisé en plusieurs cellules nommées de A à G, dont la disposition est présentée sur la figure suivante. Les cellules A à D ont une surface totale de l'ordre de 6 700 m², la cellule E a une surface de l'ordre de 3 700 m² et les cellules F et G ont une surface de 5 000 m².

Dans le cadre de ce complément d'étude, seules les cellules C et D sont étudiées. En effet, les cellules A, B, E, F et G ont fait l'objet de l'étude initiale présentée dans le rapport 16-003398b-ABO-ACH-PLO.

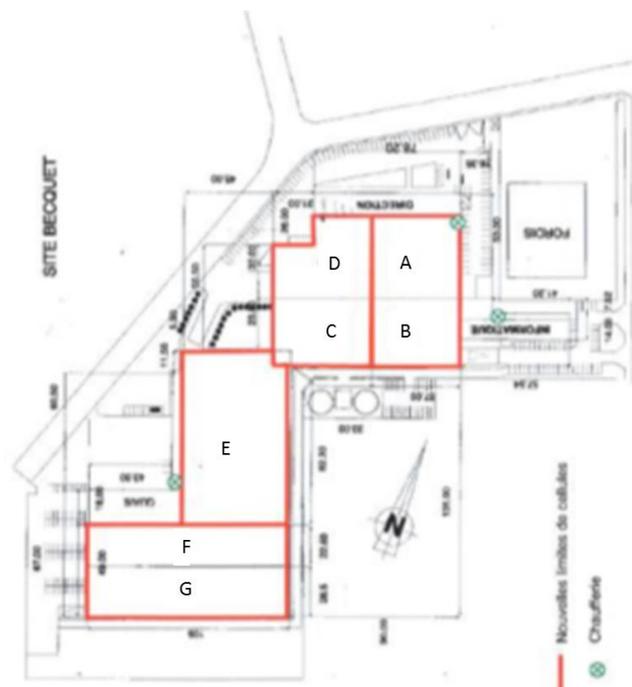


Figure 3-1 : Disposition des cellules dans l'entrepôt DOMOTI.

Les différentes cellules sont constituées d'une structure mixte en acier et bois (lamellé-collé et massif). Les cellules sont ainsi composées de portiques à une ou plusieurs travées avec des poteaux métalliques et des poutres principales en bois lamellé-collé.

La toiture est constituée de bacs aciers, ainsi que de laine de roche et d'une étanchéité bitumineuse.

3.2. DESCRIPTION DES CELLULE C ET D

La Figure 3-1 permet de situer les cellules C et D au sein de l'ensemble des autres bâtiments.

La structure des cellules C et D est réalisée à partir de portiques à deux travées de 21,4m de portée, avec un entraxe de 5,25m.

Les poutres principales sont réalisées en bois lamellé-collé à hauteur variable. D'après les mesures réalisées lors de la visite sur site du 30/05/2018, les dimensions de ces poutres sont telles que présentées sur la figure ci-dessous (h : hauteur / b : largeur de la poutre).

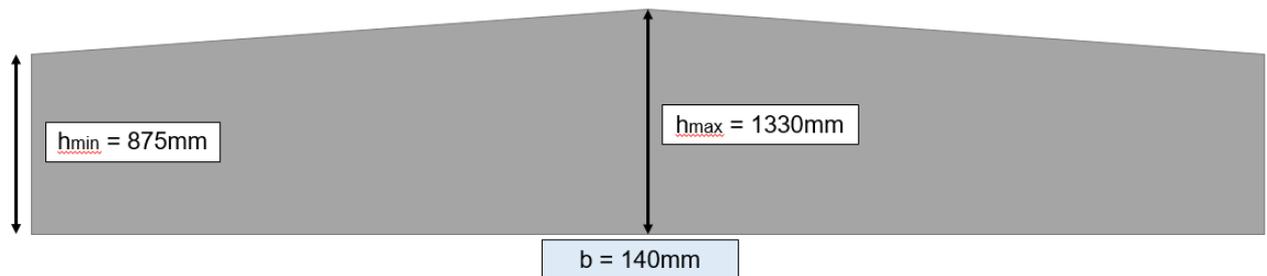


Figure 3-2 : Dimensions des poutres principales en bois lamellé-collé

Sur ces poutres principales reposent des pannes, espacées tous les mètres environ. Suite à un examen visuel, il est supposé que les dimensions de ces pannes sont identiques à celles des cellules A et B, qui sont adjacentes aux cellules C et D. Ces dimensions sont présentées sur la figure ci-dessous :



Figure 3-3 : Caractéristiques des pannes

Les poteaux centraux et de rive sont métalliques. Le tableau ci-après donne le détail des mesures réalisées lors de la visite sur site du 30/05/2018.

		h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)
Cellule C	Poteaux de rive	196	200	10	10
	Poteaux centraux	190	198	10	10
Cellule D	Poteaux de rive	196	200	10	10
	Poteaux centraux	190	198	10	10

Tableau 3-1 : Dimensions des poteaux métalliques

D'après le rapport de reconnaissance de Structureo [1], les poteaux des cellules A, B, E, F et G sont réalisés à partir de profilés laminés à chaud standard. Compte tenu de la précision des mesures réalisées, et dans un souci de simplification et de cohérence avec les relevés de Structureo, on considère dans ce complément d'étude que les poteaux sont réalisés à partir de profilés HEA 200, qui est le profilé standard le plus proche des mesures réalisées sur site.

3.3. COMPARTIMENTAGE

Le bâtiment présente un compartimentage entre les cellules. Celui-ci est composé soit de panneaux de grande longueur en béton cellulaire disposés horizontalement (type Siporex - épaisseur de 15 cm et d'une largeur de 60 cm), soit de blocs de parpaing (d'une épaisseur de 20 cm). Ce compartimentage a un rôle de mur coupe-feu de type REI 120. Ainsi, lorsqu'un feu se déclare dans l'une des cellules, les cellules adjacentes sont protégées pendant 120 minutes avant que le feu se propage.

Les cellules C et D sont respectivement adjacentes aux cellules B et A, dont elles sont séparées par un mur coupe-feu 2h.

En ce qui concerne les cellules C et B, des poteaux se trouvent de part et d'autre du mur coupe-feu. Les structures de chaque cellule sont donc indépendantes.

Concernant les cellules D et A, on trouve des poteaux sur un seul côté du mur coupe-feu, dans la cellule D. Les poutres principales de la cellule A sont traversantes. Le poteau commun supporte donc les poutres des cellules D et A.

En outre, il est à noter que la cellule D comprend une zone dédiée aux bureaux. Cette zone est séparée de la zone de stockage par un mur coupe-feu 2h.

La position des murs coupe-feu dans les cellules C et D est rappelée sur la figure ci-dessous :

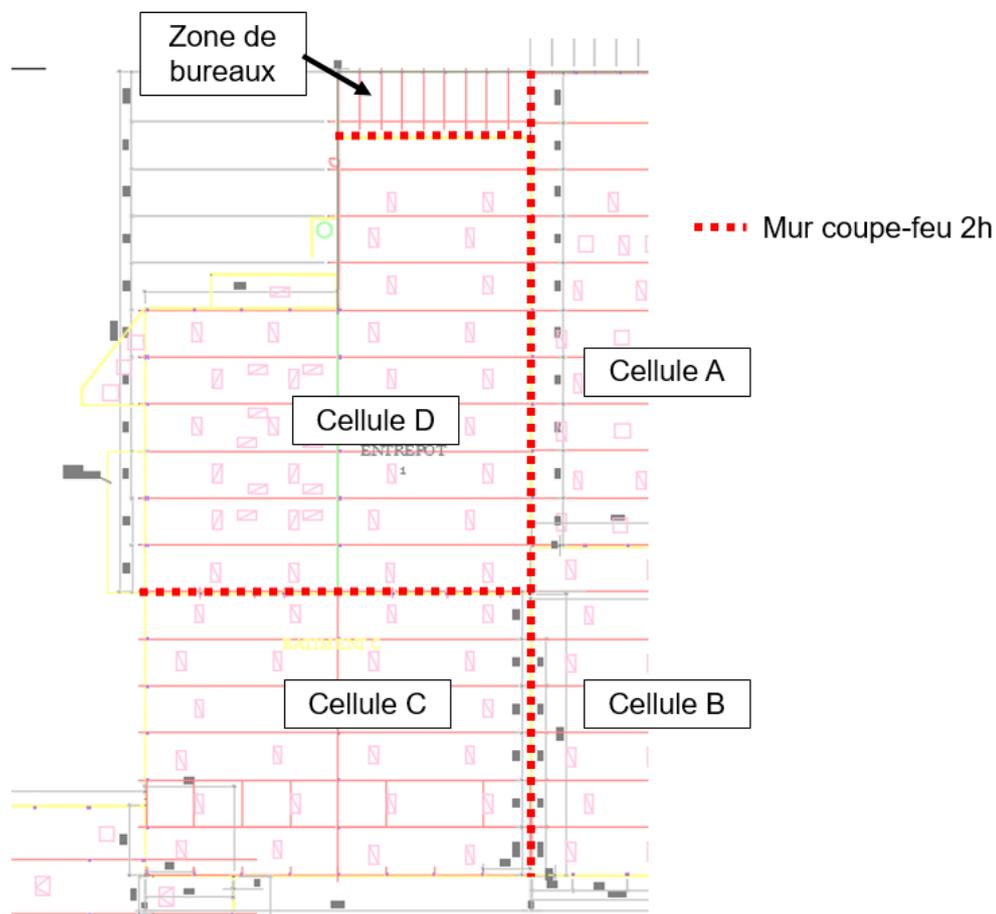


Figure 3-4 : Position des murs coupe-feu dans les cellules C et D

4. EXIGENCES REGLEMENTAIRES ET METHODOLOGIE

4.1. EXIGENCES REGLEMENTAIRES

L'objectif de l'étude de comportement au feu de la structure est de vérifier si les exigences de l'arrêté du 11 Avril 2017, portant sur la stabilité sous feu conventionnel et le mode de ruine de la structure de l'entrepôt, sont satisfaites :

- Structure R15 car le bâtiment est doté d'un dispositif de sprinklage ;
- Non ruine en chaîne de la structure porteuse ;
- Non ruine vers l'extérieur de la structure.

4.2. METHODOLOGIE

La vérification du critère de tenue au feu réglementaire pendant 15 minutes (R15) doit être réalisée en prenant en considération l'action thermique ISO834 correspondant au feu normalisé. Il s'agit d'une montée en température prédéfinie telle que présentée à la figure suivante permettant d'établir une classification des performances. Dans ce cas, la résistance au feu des éléments est établie par une analyse « élément par élément » à l'aide des méthodes simplifiées définies dans l'Eurocode 3 Partie 1-2 [12] pour les éléments métalliques et l'Eurocode 5 Partie 1-2 [14] pour les éléments en bois.

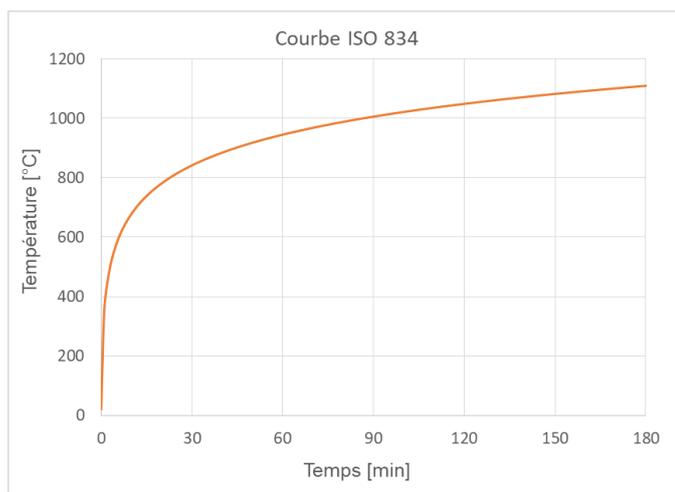


Figure 4-1 : Courbe normalisée ISO 834.

Concernant les exigences liés au mode de ruine de la structure (non effondrement en chaîne, vers l'extérieur etc...), il convient, autant que possible, de tenir compte du développement du feu reflétant la réalité des foyers d'incendie pouvant se développer au regard de la configuration du bâtiment et du stockage. Ces exigences sont donc examinées sous une action thermique de feu « réel ». L'analyse du comportement au feu de la structure est ensuite réalisée par l'intermédiaire de calculs aux éléments finis. L'intérêt de cette approche réside dans la prise en compte de la configuration réelle des éléments, que ce soit au niveau du foyer ou en ce qui concerne la structure du bâtiment.

Cette méthode se compose de 3 étapes :

- Un calcul de développement du feu à l'intérieur du volume étudié. Ce calcul permet, sur la base de formules empiriques et/ou de modélisations numériques de déterminer le développement de l'incendie et de disposer des agressions thermiques pouvant solliciter les éléments structuraux au regard de leur positionnement par rapport au foyer initial.
- Un calcul de transfert thermique intégrant l'ensemble des propriétés géométriques de la section de l'élément analysé. La sollicitation thermique est appliquée à l'ensemble des faces exposées pendant toute la durée du feu.
- Un calcul mécanique, appliqué à un modèle numérique filaire qui intègre l'ensemble des contraintes d'appuis, de chargement et d'échauffement au cours du temps, déterminé à l'étape précédente, de l'élément analysé.

L'outil de calcul utilisé est le logiciel SAFIR [22]. Ce code, basé sur la méthode des éléments finis des structures à barres, intègre les lois de comportement au feu définies dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [12] et l'Eurocode 5 Partie 1-2 [14]. Le modèle de résolution du logiciel inclut les non-linéarités géométriques (grands déplacements, effet du second ordre) et détecte également les phénomènes d'instabilité.

5. HYPOTHESES GENERALES

5.1. HYPOTHESES CONCERNANT LES SOLLICITATIONS THERMIQUE REELLES APPLIQUEES

Le développement de l'incendie dans les cellules A, B, E, F et G a été étudié lors de l'étude initiale, présentée dans le rapport n°16-003398b-ABO-ACH-PLO [20]. Les volumes et le stockage étant très proches des autres cellules, les résultats obtenus lors de l'étude initiale sont utilisés pour l'étude des cellules C et D.

Remarque : le détail des hypothèses prises en compte dans le calcul du développement du feu est présenté dans le rapport de l'étude initiale n°16-003398b-ABO-ACH-PLO.

5.1.1. Sollicitations thermiques dans la cellule C

Le stockage dans la cellule C est disposé en étagères de grande hauteur, comme le montre la figure suivante. Ce type de stockage est similaire au stockage disposé dans la cellule B.



(a)



(b)

Figure 5-1 : Photo du stockage dans les cellules B (a) et C (b)

Les résultats de propagation de l'incendie et d'évolution de la température déterminés pour la cellule B sont utilisés afin d'étudier la structure de la cellule C.

Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la température au niveau des éléments de structure en fonction du temps.

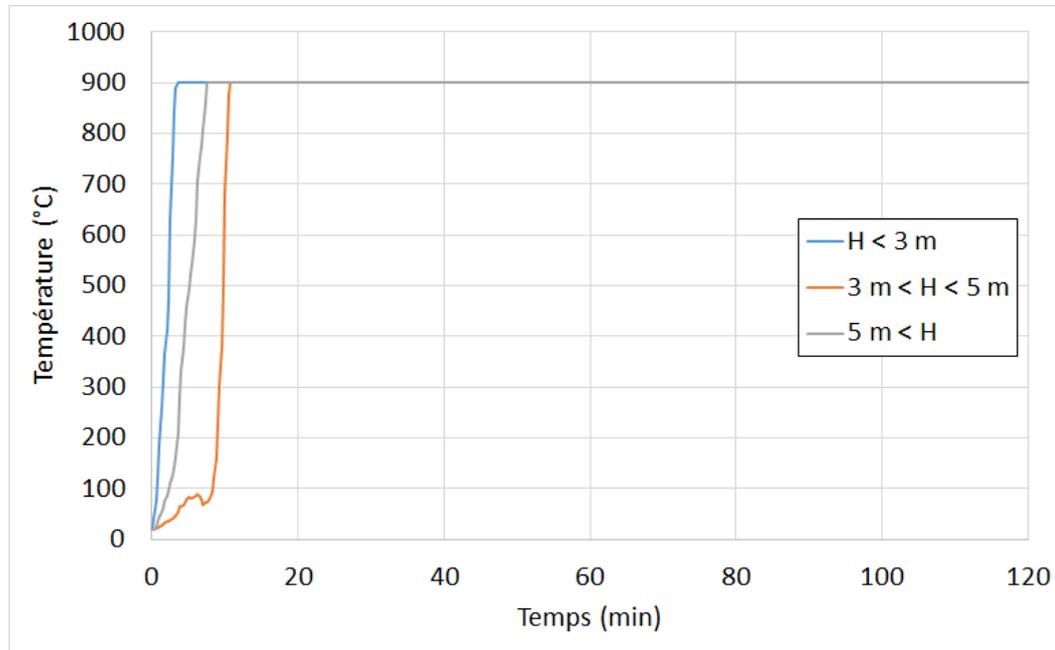


Figure 5-2 : Évolution de la température selon la hauteur pour le poteau proche du départ de feu dans la cellule C

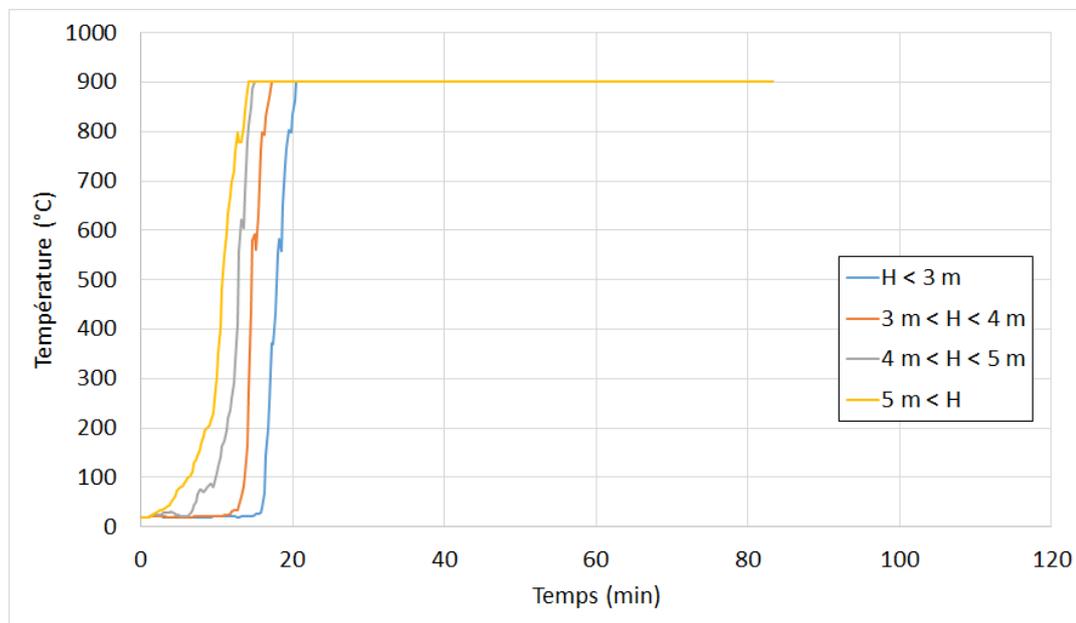


Figure 5-3 : Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux de part et d'autre du départ de feu dans la cellule C

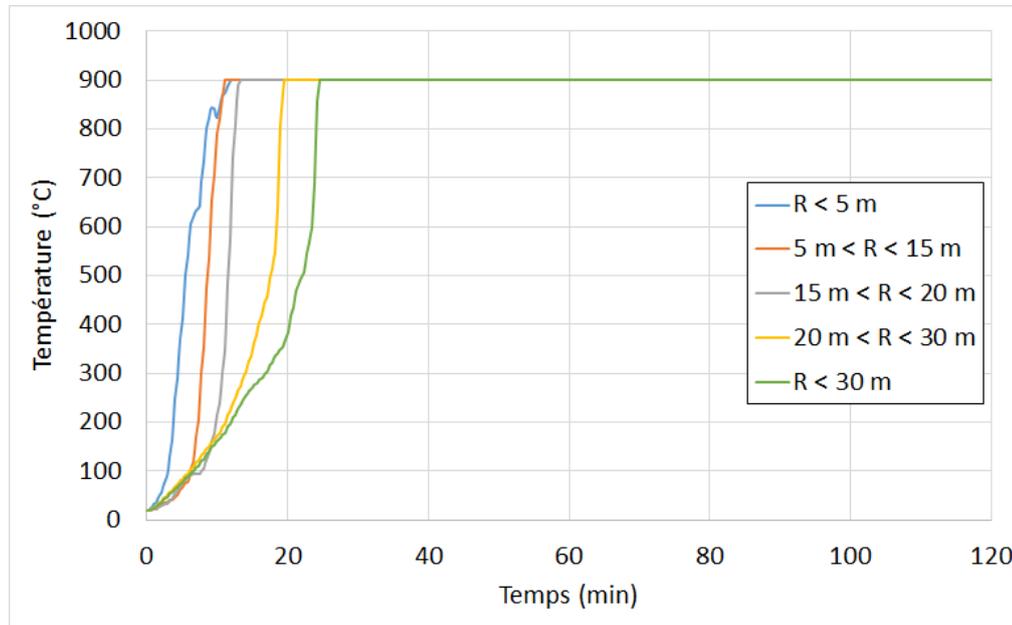


Figure 5-4 : Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement vis-à-vis du foyer dans la cellule C

5.1.2. Sollicitations thermiques dans la cellule D

Une partie de la zone de stockage dans la cellule D est occupée par une mezzanine en R+1. Dans le reste de la cellule, le stockage est disposé en masse. Cette configuration est similaire à celle de la cellule E, qui comprend plusieurs mezzanines ainsi que des zones de stockage en masse.



Figure 5-5 : Photo du stockage dans la cellule D

Ainsi, les résultats de propagation de l'incendie et d'évolution de la température déterminés pour la cellule E sont utilisés afin d'étudier la structure de la cellule D. Plusieurs scénarios sont considérés, au rez-de-chaussée et à l'étage de la mezzanine, ainsi qu'au niveau du stockage en masse.

Les courbes d'évolution de la température sont présentées en ANNEXE.

5.2. HYPOTHESES DE CALCUL THERMIQUES ET THERMOMECHANIQUES

5.2.1. Calculs de transfert thermique

La réponse thermique des éléments de structure en acier et en bois est déterminée à l'aide du logiciel de calcul de transfert thermique SAFIR [22] utilisant la méthode de calcul avancée par éléments finis. Ainsi, des modèles représentant la section transversale de chaque élément ont été développés lors de l'étude.

Dans le cadre de la vérification du degré R15 de la structure, les éléments de structure sont étudiés en considérant l'action thermique normalisée ISO834 (dit feu conventionnel). De ce fait, les coefficients d'échange utilisés pour les matériaux sont les suivants, conformément aux prescriptions de l'Eurocode 1 (NF EN 1991-1-2) [10]:

- Émissivité : 0,7 (acier) ou 0,8 (bois)
- Coefficient de convection en face exposée : 25 W/m²/K
- Coefficient de convection en face non-exposée : 4 W/m²/K

Dans le cadre de l'étude du mode de ruine, les éléments de structure sont étudiés sous un feu réel. Dans ce cas, les coefficients d'échange utilisés pour les matériaux sont les suivants, conformément aux prescriptions de l'Eurocode 1 (NF EN 1991-1-2) [10]:

- Émissivité : 0,7 (acier) ou 0,8 (bois)
- Coefficient de convection en face exposée : 35 W/m²/K
- Coefficient de convection en face non-exposée : 4 W/m²/K

5.2.2. Calculs thermo-mécaniques

À partir des champs de température dans les éléments de structure définis à la phase précédente, le comportement au feu de la structure est étudié.

Dans le cas de la justification de la performance R15, les méthodes simplifiées des Eurocodes sont utilisées. Dans le cas de l'examen des exigences relatives au mode de ruine de la structure on utilise des modèles de calcul avancé (logiciel de calcul thermomécanique SAFIR [22]). Ainsi, le mode de ruine de la structure sous feu réel est déterminé pour différents scénarios de départ de feu.

5.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

En l'absence de données concernant les matériaux utilisés, on considère que le bois lamellé-collé utilisé pour les poutres est de type GL24h, le bois massif utilisé pour les pannes est de type C24 et la nuance des profilés métalliques utilisés S235. Les propriétés à froid retenues pour l'étude sont celles de la norme NF EN 338 [15] pour le bois massif et celles de la norme NF EN 14080 [16] pour le bois lamellé-collé, présentées sur les deux figures suivantes.

	Classe	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriétés de résistance en N/mm²													
Flexion	$f_{m,0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriétés de rigidité en kN/mm²													
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Module de cisaillement moyen	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Masse volumique en kg/m³													
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Figure 5-6 : Caractéristiques des bois massifs selon la norme NF EN 338

Propriété	Symbole	Classe de résistance du bois lamellé-collé						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Résistance à la flexion	$f_{m,0,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Résistance à la traction	$f_{t,0,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
	$f_{t,90,k}$	0,5						
Résistance à la compression	$f_{c,0,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,k}$	2,5						
Résistance au cisaillement (cisaillement et torsion)	$f_{v,k}$	3,5						
Résistance au cisaillement roulant	$f_{r,k}$	1,2						
Module d'élasticité	$E_{0,0, moyen}$	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,0,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,0, moyen}$	300						
	$E_{90,0,05}$	250						
Module de cisaillement	$G_{0,0, moyen}$	650						
	$G_{0,0,05}$	540						
Module de cisaillement roulant	$G_{r,0, moyen}$	65						
	$G_{r,0,05}$	54						
Masse volumique	$\rho_{0,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{0, moyen}$	370	410	420	445	460	480	490

Figure 5-7 : Propriétés des bois lamellé-collé selon la norme NF EN 14080

Les propriétés thermiques et mécaniques de l'acier et du bois à hautes températures sont issues respectivement de la partie 1-2 de l'Eurocode 3 [12] et de la partie 1-2 de l'Eurocode 5 [14].

La valeur de calcul de la résistance du bois lamellé-collé en situation de feu peut être obtenue à partir de la section 2 de l'Eurocode 5, partie 1-2 [14]:

- $k_{mod,fi} = 1$;
- $Y_{M,fi} = 1$;
- $f_k = 24 \text{ N/mm}^2$
- $k_{fi} = 1,15$

On obtient donc $f_{d,fi} = 27,6 \text{ N/mm}^2$.

La valeur de calcul de la résistance du bois massif en situation de feu peut être obtenue à partir de la section 2 de l'Eurocode 5, partie 1-2 [14]:

- $k_{mod,fi} = 1$;
- $Y_{M,fi} = 1$;
- $f_k = 24 \text{ N/mm}^2$;
- $k_{fi} = 1,25$.

On obtient donc $f_{d,fi} = 30,0 \text{ N/mm}^2$.

D'après les normes NF EN 14080 [16] et NF EN 338 [15], la masse volumique considérée est la suivante :

- Bois lamellé-collé de type GL24h : $\rho_{mean} = 385 \text{ kg/m}^3$;
- Bois massif de type C24 : $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$.

De même, l'hypothèse est faite que l'acier utilisé pour les poteaux et les poutres de la structure est de type S235. Les caractéristiques à froid de ce matériau sont les suivantes :

- Module de Young $E_s = 210 \text{ GPa}$;
- Coefficient de Poisson $\nu = 0,3$;
- Masse volumique $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- Limite élastique $f_y = 235 \text{ MPa}$.

5.4. GEOMETRIE GENERALE DES BATIMENTS

Les hypothèses de calcul concernant la géométrie globale, le positionnement des éléments ainsi que la section des éléments sont issues des données du plan des existants fournis par la société Structureo [2].

5.5. ASSEMBLAGES ET CONDITIONS D'APPUIS

5.5.1. Caractéristiques des assemblages

Les poteaux sont considérés encastrés en pied et articulés en tête. Cet encastrement en pied assure donc la stabilité horizontale du bâtiment. Par le biais d'un examen visuel, on considère que les assemblages poteaux-poutres dans les cellules C et D sont similaires à ceux des autres cellules, présentés dans le relevé de structure fourni par la société Structureo [1]. Ces assemblages sont donc réalisés à partir des éléments suivants :

- Une platine soudée au poteau ;
- Une cale en bois ;
- Pour chaque poutre reprise par l'assemblage, deux plats de 6mm, soudés à la platine et vissés et écroués à la poutre.

La figure suivante présente un exemple d'assemblage poteau-poutre. Cet assemblage n'assure aucun encastrement des poutres sur les poteaux (éléments articulés entre eux).

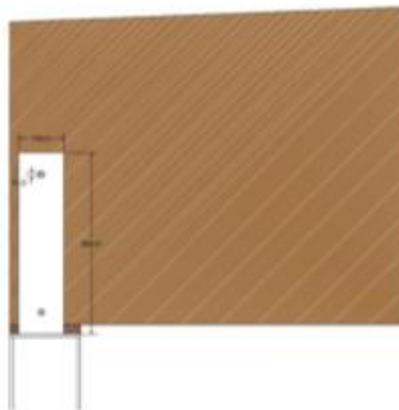


Figure 5-8 : Exemple d'assemblage poteau-poutre

Les boulons utilisés dans les autres cellules ont un diamètre de 12 mm. Ne disposant pas de données sur les caractéristiques mécaniques des boulons utilisés dans les assemblages, on considère la classe de boulons de résistance minimale de 3.6, dont la résistance ultime à la traction $f_{ub} = 300$ MPa.

5.5.2. Longueurs de flambement considérées

La structure de la cellule C, comme expliqué au §3.3, est indépendante de la structure de la cellule B adjacente. En effet, on trouve des poteaux de chaque côté du mur coupe-feu séparant les deux cellules.

Ainsi, si l'on considère que l'ensemble des 3 poteaux d'un portique est chauffé uniformément sous feu conventionnel, il n'existe pas d'élément rigide permettant d'assurer leur blocage en tête. De fait, la longueur de flambement retenue pour l'étude des poteaux de la cellule C est égale à $L_f = 2 \times L_o$, avec L_o la longueur réelle du poteau (poteau encasté en pied et libre en tête).

La structure de la cellule D, en revanche, est continue avec celle de la cellule A. En effet, un seul poteau, situé contre le mur coupe-feu, supporte la structure des deux cellules.

Lorsqu'on considère que la structure de la cellule D est uniformément chauffée sous feu conventionnel, la structure de la cellule A reste froide (séparation des cellules par un mur coupe-feu). Ainsi, le portique à trois travées de la cellule A apporte une rigidité suffisante au portique de la cellule D pour considérer que les poteaux de la cellule D sont bloqués en tête. A ce titre, la longueur de flambement retenue pour l'étude des poteaux de la cellule D est égale à $L_f = 0,7 \times L_o$, avec L_o la longueur réelle du poteau (poteau encasté en pied et bloqué en tête).

5.6. CONDITIONS DE CHARGEMENT ET COMBINAISONS D'ACTIONS

Les charges considérées pour l'étude sont les suivantes :

- Charges permanentes :
 - o Le poids propre des éléments est calculé à partir de leur masse volumique détaillée au paragraphe §5.3.
 - o Complexe de toiture (bac acier + isolation + étanchéité) [23]: 0,30 kN/m².
- Charges climatiques (calculées selon l'Eurocode) :
 - o Neige : S = 36 daN/m²;
 - o Vent : q_p = 72 daN/m².
- Charges d'exploitation :
 - o Conformément à l'Eurocode 0 [8], aucune charge d'exploitation n'a été considérée en toiture en situation d'incendie.

La charge appliquée en situation d'incendie est déterminée conformément à l'Eurocode 0 [8], qui définit la combinaison de charge à appliquer dans le cas d'un bâtiment à usage de stockage comme étant la plus défavorable parmi les suivantes:

$$\begin{cases} G + 0,2 W \\ G + 0,2 S \end{cases}$$

Où :

- G est la valeur caractéristique des charges permanentes ;
- W est la valeur caractéristique des charges de vent ;
- S est la valeur caractéristique des charges de neige.

6. VERIFICATION DES EXIGENCES PRESCRIPTIVES SOUS FEU NORMALISE

6.1. DETERMINATION DE LA PROFONDEUR DE CARBONISATION

La section efficace de la poutre exposée au feu conventionnel peut être calculée à partir de l'Eurocode 5 partie 1-2 [14] :

- Pour les éléments en bois lamellé-collé :
 - o La valeur de calcul de la vitesse de combustion fictive pour une carbonisation tenant compte de l'effet des arrondis en coin notée β_n est de 0,7 mm/min ;
 - o $k_0 = 0,75$ pour un temps d'exposition au feu de 15 minutes ;
 - o $d_0 = 7$ mm.

La profondeur de carbonisation efficace d_{ef} à prendre en compte après 15 minutes d'exposition au feu normalisé pour le bois lamellé-collé est déterminée selon l'expression suivante :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 = \beta_n \times t + k_0 \times d_0 = 0,7 \times 15 + 0,75 \times 7 = 15,75 \text{ mm}$$

- Pour les éléments en bois massif :
 - o La valeur de calcul de la vitesse de combustion fictive pour une carbonisation tenant compte de l'effet des arrondis en coin notée β_n est de 0,8 mm/min ;
 - o $k_0 = 0,75$ pour un temps d'exposition au feu de 15 minutes ;
 - o $d_0 = 7$ mm.

La profondeur de carbonisation efficace d_{ef} à prendre en compte après 15 minutes d'exposition au feu normalisé pour le bois massif est déterminée selon l'expression suivante :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 = \beta_n \times t + k_0 \times d_0 = 0,8 \times 15 + 0,75 \times 7 = 17,25 \text{ mm}$$

6.2. VERIFICATION DE LA CHARPENTE BOIS

6.2.1. Vérification des pannes

La charge appliquée pour la vérification des pannes est de 41,2 daN/ml.

t [min]	b [mm]	h [mm]	l [m]	M _y max [N.m]	σ_{crit} [N/mm ²] [EC5 §6.3.3 (2) 6.32]	λ_{relm} [EC5 §6.3.3 (2) 6.30]	k _{crit} [EC5 §6.3.3 (4) 6.34]	Résistance des sections	Stabilité des éléments
								Taux de travail selon EC5 §6.1.6 (1) 6.11	Taux de travail selon EC5 §6.3.3 (3) 6.33
0	57	165	5,25	1415	24,1	1,0	0,8	0,18	0,22
15	22,5	130,5	5,25	1415	4,7	2,3	0,2	0,74	3,74

Tableau 6-1 : Vérification de la résistance R15 des pannes

Après 15 minutes d'exposition au feu normalisé, les pannes présentent une rupture par déversement. **L'exigence de stabilité R15 n'est donc pas satisfaite.**

6.2.2. Vérification des poutres

La charge appliquée pour la vérification des poutres est de 270,7 daN/ml.

t [min]	b [mm]	h [mm]	l [m]	My max [N.m]	σ_{Mcrit} [N/mm ²] [EC5 §6.3.3 (2) 6.32]	λ_{relm} [EC5 §6.3.3 (2) 6.30]	k _{crit} [EC5 §6.3.3 (4) 6.34]	Résistance des sections	Stabilité des éléments
								Taux de travail selon EC5 §6.1.6 (1) 6.11	Taux de travail selon EC5 §6.3.3 (3) 6.33
0	140	1330	21,4	154962	5,73	2,05	0,24	0,14	0,56
15	108,5	1298,5	21,4	154962	3,52	2,61	0,15	0,19	1,25

Tableau 6-2 : Vérification de la résistance R15 des poutres

Les poutres présentent un risque de déversement avant 15 minutes dans le cas d'une exposition au feu normalisé. **L'exigence de stabilité R15 n'est donc pas satisfaite.** Il est à noter que dans le cas où un élément permettrait d'assurer le blocage des poutres vis-à-vis du phénomène de déversement, ces poutres seraient R15.

6.3. VERIFICATION DES POTEAUX EN ACIER

6.3.1. Poteaux de la cellule C

Conformément à ce qui a été décrit dans le paragraphe §4, pour les poteaux métalliques, une vérification de la résistance mécanique est réalisée est à l'aide des méthodes de calcul de l'Eurocode 3 Partie 1-2 [12].

6.3.1.1. Poteaux de rive (Côté façade)

Le poteau de rive présente les caractéristiques de calcul suivantes :

Caractéristiques du poteau	
Section :	HEA 200
Facteur de massiveté : [Am/V] =	135 m ⁻¹
Température à 15 min : T(t=15 min) =	690 °C
Hauteur : l =	7,30 m
Sollicitation de l'élément :	Flexion-compression

Tableau 6-3 : Caractéristiques du poteau de rive

La combinaison la plus défavorable pour l'étude du poteau de rive, parmi celles définies au paragraphe §5.6, est : G + 0,2 W. Les charges appliquées sont donc les suivantes :

- N_{Ed,fi} = 32,3 kN.
- M_{ed,fi} = 6,5 kN/ml

Données		
θ_a	690	°C
$I_{y,fi}$	14.6	m
$I_{z,fi}$	14.6	m
$\bar{\lambda}_{LT}$	0.060	/
Résultats		
Γ_{TOTAL}	2.72	stabilité non satisfaite
Γ_N	1.96	/
$\Gamma_{N,LT}$	1.96	/
Γ_{My}	0.25	/
$\Gamma_{My,LT}$	0.27	/
Γ_{Mz}	0.00	/
α	0.65	/
λ_1	93.90	/
λ_y	176.3	/
$\bar{\lambda}_y$	1.88	/
$\bar{\lambda}_{y,\theta}$	2.46	/
$\phi_{y,\theta}$	4.32	/
$\chi_{y,fi}$	0.13	/
λ_z	293.1	/
$\bar{\lambda}_z$	3.12	/
$\bar{\lambda}_{z,\theta}$	4.09	/
$\phi_{z,\theta}$	10.19	/
$\chi_{z,fi}$	0.05	/
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	0.08	/
$\phi_{LT,\theta,com}$	0.53	/
ψ_{LT}	1.00	/
ψ_y	1.00	/
ψ_z	1.00	/
β_{MLT}	1.10	/
β_{My}	1.10	/
β_{Mz}	1.10	/
μ_{LT}	0.52	/
H_y	-3.26	/
H_z	-6.38	/
$k_{i,LT}$	0.90	/
k_y	3.00	/
k_z	3.00	/
$\chi_{min,fi}$	0.05	/
$\chi_{LT,fi}$	0.95	/
$k_{y,\theta}$	0.25	/
$k_{E,\theta}$	0.15	/
$k_{y,\theta,com}$	0.25	/
$k_{E,\theta,com}$	0.15	/

Figure 6-1 : Vérification de la résistance R15 du poteau de rive

Le poteau de rive n'est pas à même de résister 15 minutes sous feu conventionnel puisque le taux de travail à chaud du poteau Γ_{TOTAL} est supérieur à 1. **L'exigence de stabilité R15 n'est donc pas satisfaite.**

6.3.1.2. Poteaux centraux

Le poteau central présente les caractéristiques de calcul suivantes :

Caractéristiques du poteau	
Section :	HEA 200
Facteur de massiveté : $[Am/V]$ =	135 m ⁻¹
Température à 15 min : $T(t=15 \text{ min})$ =	690 °C
Hauteur : l =	7,30 m
Sollicitation de l'élément :	Compression

Tableau 6-4 : Caractéristiques du poteau central

La combinaison la plus défavorable pour l'étude du poteau central, parmi celles définies au paragraphe §5.6, est : $G + 0,2 W$. Les charges appliquées sont donc les suivantes :

- $N_{Ed,fi} = 61,2 \text{ kN}$.

Données		
θ_a	690	°C
$I_{y,fi}$	14.60	m
$I_{z,fi}$	14.60	m
Résultats		
$N_{b,fi,\theta,Rd}$	16.5	kN
α	0.65	/
λ_1	93.90	/
λ_y	176.3	/
$\bar{\lambda}_y$	1.88	/
$\bar{\lambda}_{y,0}$	2.46	/
$\phi_{y,0}$	4.32	/
$\chi_{y,fi}$	0.13	/
λ_z	293.1	/
$\bar{\lambda}_z$	3.12	/
$\bar{\lambda}_{z,0}$	4.09	/
$\phi_{z,0}$	10.19	/
$\chi_{z,fi}$	0.05	/
$\chi_{min,fi}$	0.05	/
$k_{y,0}$	0.25	/
$k_{E,0}$	0.15	/

Figure 6-2 : Vérification de la résistance R15 du poteau central

Le poteau central n'est pas à même de résister 15 minutes sous feu conventionnel puisque $N_{b,fi,\theta,Rd}$ est inférieur à $N_{Ed,fi}$. **L'exigence de stabilité R15 n'est donc pas satisfaite.**

6.3.2. Poteaux de la cellule D

6.3.2.1. Poteaux de rive (Côté façade)

Le poteau de rive présente les caractéristiques de calcul suivantes :

Caractéristiques du poteau	
Section :	HEA 200
Facteur de massiveté : $[Am/V]$ =	135 m ⁻¹
Température à 15 min : $T(t=15 \text{ min})$ =	690 °C
Hauteur : l =	7,30 m
Sollicitation de l'élément :	Flexion-compression

Tableau 6-5 : Caractéristiques du poteau de rive

La combinaison la plus défavorable pour l'étude du poteau de rive, parmi celles définies au paragraphe §5.6, est : G + 0,2 W. Les charges appliquées sont donc les suivantes :

- $N_{Ed,fi} = 32,3$ kN.
- $Med,fi = 6,5$ kN/ml

Données		
θ_a	690	°C
$I_{y,fi}$	5.1	m
$I_{z,fi}$	5.1	m
$\bar{\lambda}_{LT}$	0.060	/
Résultats		
Γ_{TOTAL}	0.67	stabilité satisfaite
Γ_N	0.34	/
$\Gamma_{N,LT}$	0.34	/
Γ_{My}	0.25	/
$\Gamma_{My,LT}$	0.27	/
Γ_{Mz}	0.00	/
α	0.65	/
λ_1	93.90	/
λ_y	61.7	/
$\bar{\lambda}_y$	0.66	/
$\bar{\lambda}_{y,0}$	0.86	/
$\phi_{y,0}$	1.15	/
$\chi_{y,fi}$	0.52	/
λ_z	102.6	/
$\bar{\lambda}_z$	1.09	/
$\bar{\lambda}_{z,0}$	1.43	/
$\phi_{z,0}$	1.99	/
$\chi_{z,fi}$	0.30	/
$\bar{\lambda}_{LT,0,com}$	0.08	/
$\phi_{LT,0,com}$	0.53	/
ψ_{LT}	1.00	/
ψ_y	1.00	/
ψ_z	1.00	/
β_{MLT}	1.10	/
β_{My}	1.10	/
β_{Mz}	1.10	/
μ_{LT}	0.09	/
μ_y	-1.64	/
μ_z	-1.91	/
k_{LT}	1.00	/
k_y	1.31	/
k_z	1.65	/
$\chi_{min,fi}$	0.30	/
$\chi_{LT,fi}$	0.95	/
$k_{y,0}$	0.25	/
$k_{E,0}$	0.15	/
$k_{y,0,com}$	0.25	/
$k_{E,0,com}$	0.15	/

Figure 6-3 : Vérification de la résistance R15 du poteau de rive

Le poteau de rive est à même de résister 15 minutes sous feu conventionnel puisque le taux de travail à chaud du poteau Γ_{TOTAL} est inférieur à 1. **L'exigence de stabilité R15 est donc satisfaite.**

6.3.2.2. Poteaux centraux

Le poteau central présente les caractéristiques de calcul suivantes :

Caractéristiques du poteau	
Section :	HEA 200
Facteur de massiveté : $[Am/V]$ =	135 m ⁻¹
Température à 15 min : $T(t=15 \text{ min})$ =	690 °C
Hauteur : l =	7,30 m
Sollicitation de l'élément :	Compression

Tableau 6-6 : Caractéristiques du poteau central

La combinaison la plus défavorable pour l'étude du poteau central, parmi celles définies au paragraphe §5.6, est : $G + 0,2 W$. Les charges appliquées sont donc les suivantes :

- $N_{Ed,fi} = 61,2 \text{ kN}$.

Données		
θ_a	690	°C
$I_{y,fi}$	5.11	m
$I_{z,fi}$	5.11	m
Résultats		
$N_{b,fi,\theta,Rd}$	95.3	kN
α	0.65	/
λ_1	93.90	/
λ_y	61.7	/
$\bar{\lambda}_y$	0.66	/
$\bar{\lambda}_{y,\theta}$	0.86	/
$\phi_{y,\theta}$	1.15	/
$\chi_{y,fi}$	0.52	/
λ_z	102.6	/
$\bar{\lambda}_z$	1.09	/
$\bar{\lambda}_{z,\theta}$	1.43	/
$\phi_{z,\theta}$	1.99	/
$\chi_{z,fi}$	0.30	/
$\chi_{min,fi}$	0.30	/
$k_{y,\theta}$	0.25	/
$k_{E,\theta}$	0.15	/

Figure 6-4 : Vérification de la résistance R15 du poteau central

Le poteau central est à même de résister 15 minutes sous feu conventionnel puisque $N_{b,fi,\theta,Rd}$ est supérieur à $N_{Ed,fi}$. **L'exigence de stabilité R15 est donc satisfaite.**

6.4. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus sur l'analyse de stabilité sous feu conventionnel des cellules C et D.

		Exigence de stabilité prescriptive sous feu conventionnel R15	
		Cellule C	Cellule D
Poutres en bois lamellé-collé		Non stable	
Pannes en bois massif		Non stable	
Poteaux métalliques	Poteaux de rive (côté façade)	Non stable	R15
	Poteaux centraux	Non stable	R15
	Poteaux de rive (côté mur CF)	Protection à mettre en place selon préconisations qualitatives (§0)	
	Poteaux de rive (support de pannes)		

Tableau 6-7 : Synthèse des résultats sur l'exigence de stabilité R15

7. PRECONISATIONS D'EFFECTIS FRANCE POUR LE RESPECT DES EXIGENCES

7.1. PRECONISATIONS QUALITATIVES

Compte tenu du schéma structural dans les cellules C et D, certaines préconisations peuvent être faites de façon qualitative dans un but de simplification. Ces préconisations sont faites en s'appuyant sur l'expérience d'Efectis France en matière d'étude de stabilité et de mode de ruine.

Remarque : Il est à noter que les préconisations énoncées ci-dessous sont considérées comme respectées et mises en œuvre pour les calculs réalisés ensuite dans le cadre de l'étude du mode de ruine.

7.1.1. Poteaux de rive (côté mur coupe-feu) – cellules C et D

Comme expliqué au §3.3, les cellules C et D sont respectivement séparées des cellules B et A par des murs coupe-feu 2h. Les poteaux du portique en rive de la cellule sont disposés contre ces murs.

La ruine des poteaux de rive pourrait remettre en cause l'intégrité des murs coupe-feu. A ce titre, la mise en place d'une protection thermique est nécessaire sur ces poteaux. Cette protection pourra être réalisée à partir de peinture intumescente ou de flocage. Elle doit assurer une durée de tenue au feu des poteaux égale à celle du mur coupe-feu soit 120 minutes (R120).

7.1.2. Poteaux de rive (supports de pannes) – cellules C et D

Certains poteaux situés en rive des cellules C et D ne font pas partie des portiques principaux et servent de support aux ramasses-pannes, qui permettent eux-mêmes de reprendre les pannes.



Figure 7-1 : Photo du poteau de rive dans la cellule D

Ces poteaux ne sont pas bloqués en tête. A ce titre, leur longueur de flambement est égale à $L_f = 2 \times L_0$, avec L_0 la longueur réelle du poteau. Ces poteaux peuvent donc être assimilés aux poteaux de rive (côté façade) de la cellule C, étudiés au §6.

Or, les résultats présentés au §0 montrent que ces derniers ne sont pas stables pendant 15 minutes sous feu conventionnel. A ce titre, il est préconisé la mise en place d'une protection thermique sur les poteaux de rive supports de pannes afin d'assurer leur stabilité pendant 120 minutes (R120). La protection mise en place pourra être réalisée en peinture intumescente ou par flocage.

7.2. SOLUTIONS PROPOSEES POUR VERIFIER LE CRITERE DE STABILITE R15

7.2.1. Poutres en bois lamellé-collé

Les résultats présentés au §0 montrent que les poutres en bois lamellé-collé ne vérifient pas le critère de stabilité de la structure sous feu conventionnel pendant 15 minutes. En effet, les résultats montrent que les poutres sont susceptibles de déverser avant 15 minutes.

La solution proposée consiste à mettre en place un blocage transversal à mi- portée de la poutre, au niveau de sa partie comprimée, de façon à empêcher le déversement. Ce blocage peut être réalisé par la mise en œuvre d'une entretoise en bois entre les poutres principale. Le dimensionnement de la section de cette barre anti-déversement est réalisé à partir de la section 9.2.5.2 de l'Eurocode 5, partie 1-2 [14].

Ainsi, Efectis France préconise la mise en place d'une entretoise complémentaire en bois massif à mi- portée des poutres principales, à proximité de leur face supérieure. La section de cette entretoise devra être de 190mm x 190mm au minimum afin qu'elle reste effective pendant au moins 15 minutes sous feu conventionnel.

7.2.2. Poteaux métalliques

Les résultats présentés au §0 montrent que les poteaux métalliques (poteaux de rive et centraux) de la cellule C ne vérifient pas le critère de stabilité de la structure sous feu conventionnel pendant 15 minutes.

Efectis France préconise la mise en place d'une protection thermique sur les faces exposées au feu des poteaux de rive. Cette protection pourra être une peinture intumescente ou un flocage.

La température critique de ce poteau, calculées selon l'Eurocode 3, partie 1-2 [12] est de 578 °C. Ainsi, la protection devra être choisie de façon à ce que la température dans le profilé ne dépasse pas sa température critique après 15 minutes d'exposition au feu conventionnel.

Par ailleurs, la protection mise en place sur les poteaux de rive de la cellule C (côté façade et côté mur coupe-feu), ainsi que le maintien des poutres principales en bois lamellé-collé permettent d'assurer le maintien en tête du poteau central (le contreventement étant assuré par les deux poteaux protégés d'extrémité du portique). A ce titre, on peut alors considérer que le poteau central est bloqué en tête et que sa longueur de flambement est égale à $L_f = 0,7 \times L_o$, avec L_o la longueur réelle du poteau.

Compte tenu de ces éléments, les résultats obtenus pour le poteau central de la cellule D peuvent être extrapolés au poteau central de la cellule C. Ce poteau est donc stable pendant 15 minutes sous feu conventionnel en considérant la mise en place de la protection thermique sur les poteaux de rive et le maintien des poutres principales.

8. VERIFICATION DES EXIGENCES SUR LE MODE DE RUINE DE LA STRUCTURE

8.1. METHODOLOGIE

Les vérifications des exigences sur le mode de ruine des différentes structures étudiées, portent sur l'analyse des déplacements et des efforts des éléments de structure, à savoir les poteaux métalliques et les poutres en bois lamellé collé.

Ces vérifications sont réalisées par le biais de modèles numériques représentant les portiques composés des poteaux métalliques et des poutres en bois. Ces modèles sont réalisés en 3 dimensions de façon à prendre en compte le risque de flambement hors plan des poteaux.

Dans le cas de la cellule C, la structure de la cellule est indépendante de celle de la cellule B adjacente. La structure de la cellule C est donc composée d'un portique à deux travées, comme le montre la figure suivante :

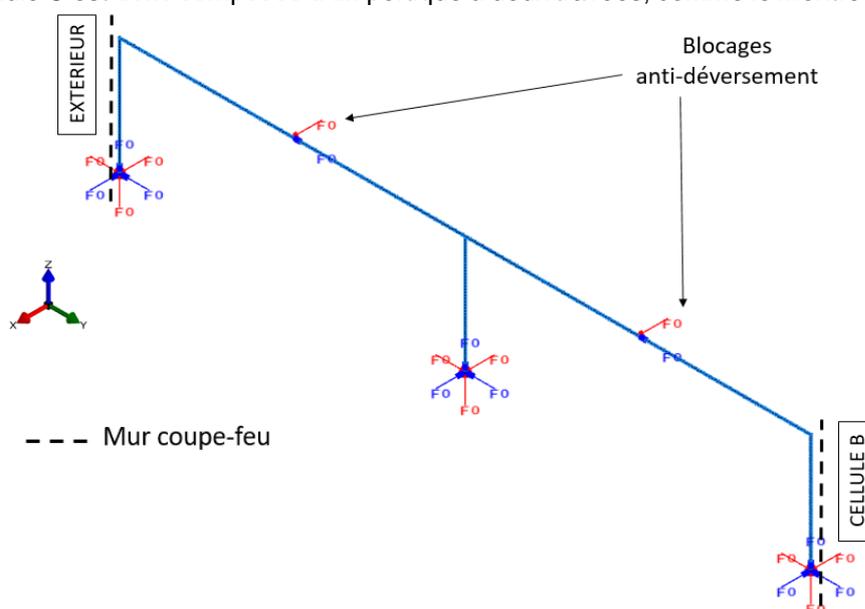


Figure 8-1 : Modèle du portique de la cellule C

Comme expliqué au paragraphe §3.2, la structure de la cellule D n'est pas indépendante de celle de la cellule A. En effet, le poteau situé en rive de la cellule D, contre le mur coupe-feu, est commun aux portiques des deux cellules. Ainsi, le modèle réalisé pour étudier la structure de la cellule D prend en compte également la structure de la cellule A. La figure suivante montre le modèle réalisé pour étudier la structure de la cellule D :

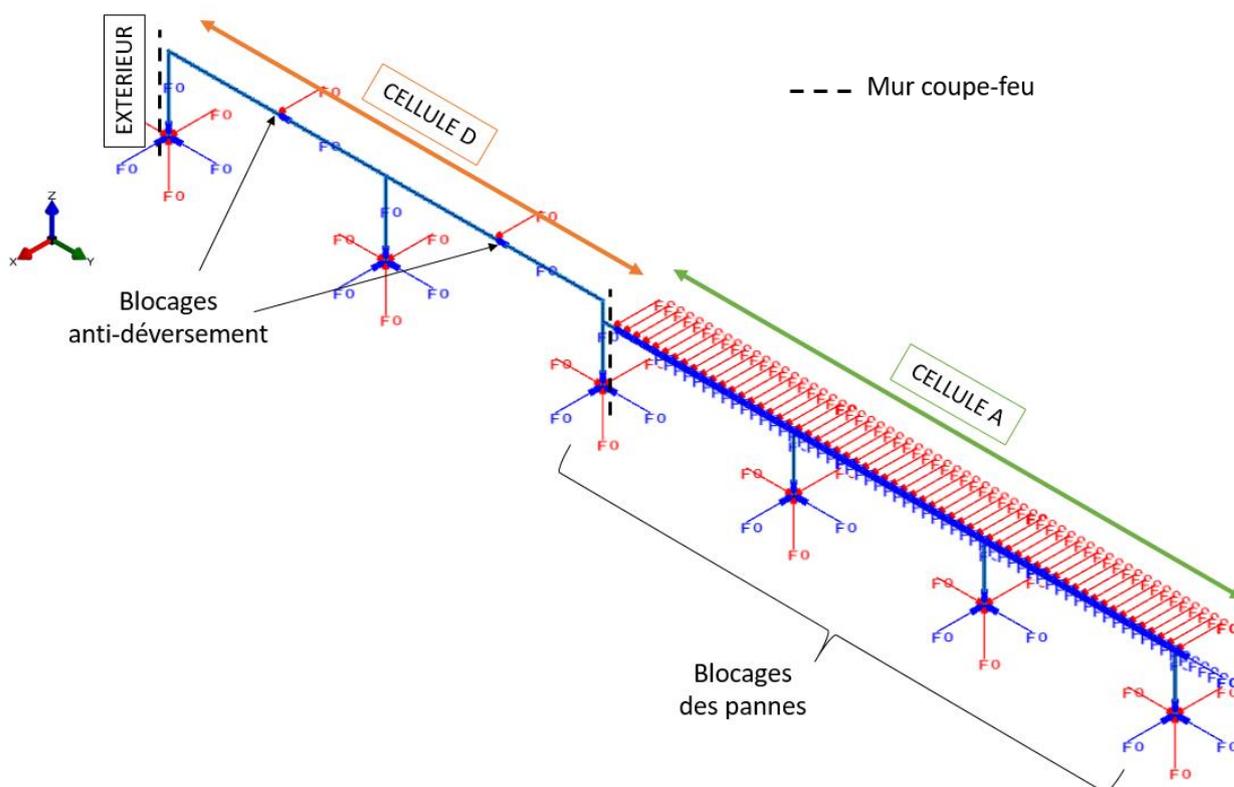


Figure 8-2 : Modèle du portique des cellules D et A

Pour chaque cellule, la structure est étudiée pour plusieurs scénarios de départ de feu, situés au niveau du poteau central ou au niveau des poteaux de rive.

Les modèles réalisés pour étudier la structure sous feu réel tiennent compte des préconisations faites au §0 et au §0. Ainsi, des blocages anti-déversement sont considérés à mi-portée des poutres par l'ajout d'entretoise à mi portée des poutres principales. Le cas échéant, il a également été tenu compte de la protection thermique des poteaux lorsque celle-ci a été préconisée.

8.2. ETUDE DE LA CELLULE C

8.2.1. Echauffement des éléments de structure

Pour chaque scénario étudié, l'échauffement des différents éléments composant le portique est déterminé à partir de calculs de transfert thermiques réalisés avec le logiciel SAFIR [22]. Les sollicitations thermiques appliquée sur les faces exposées au feu des éléments correspondent à celles présentées au §5.1.1.

A titre d'exemple, la figure suivante présente le modèle thermique réalisé pour le poteau central du portique, dans le cas d'un départ de feu en pied du poteau central (scénario n°2) :

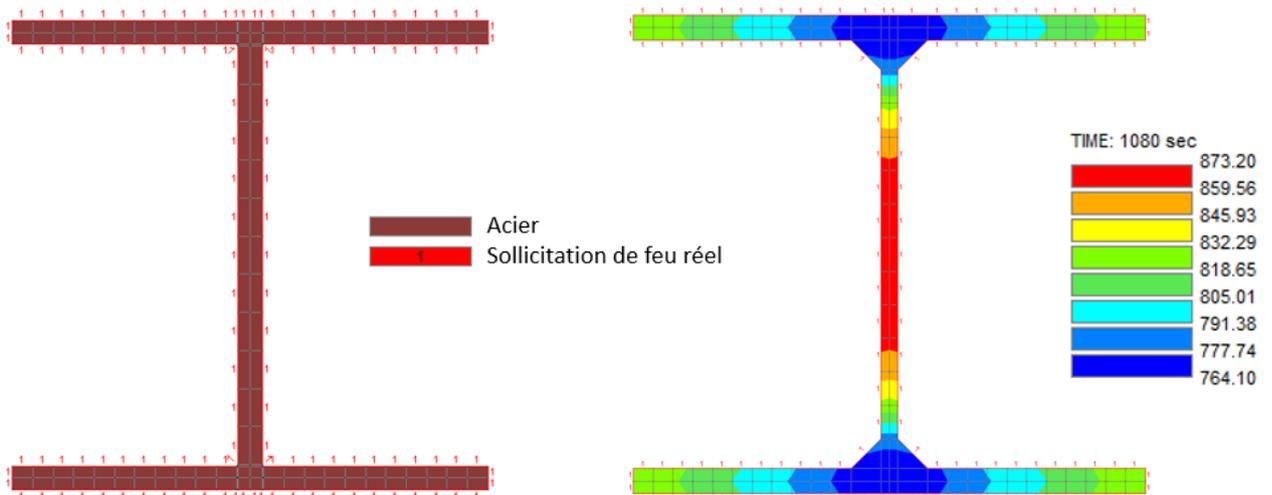


Figure 8-3 : Modèle réalisé pour le poteau central et échauffement à t = 18 minutes.

8.2.2. Scénario n°1

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau de rive, côté façade. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°1 :

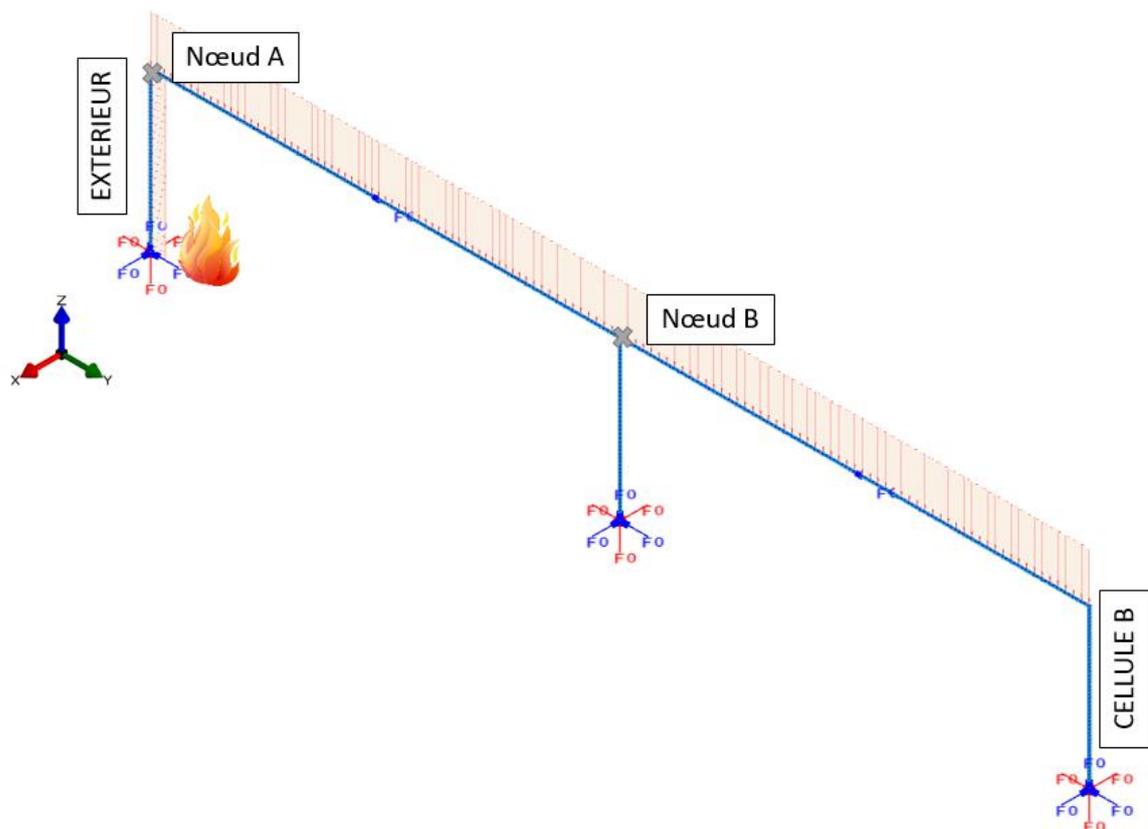


Figure 8-4 : Position du départ de feu pour le scénario n°1

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive, du côté de la façade et du côté de la cellule B, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé par entretoise.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 18$ minutes et 40 secondes :

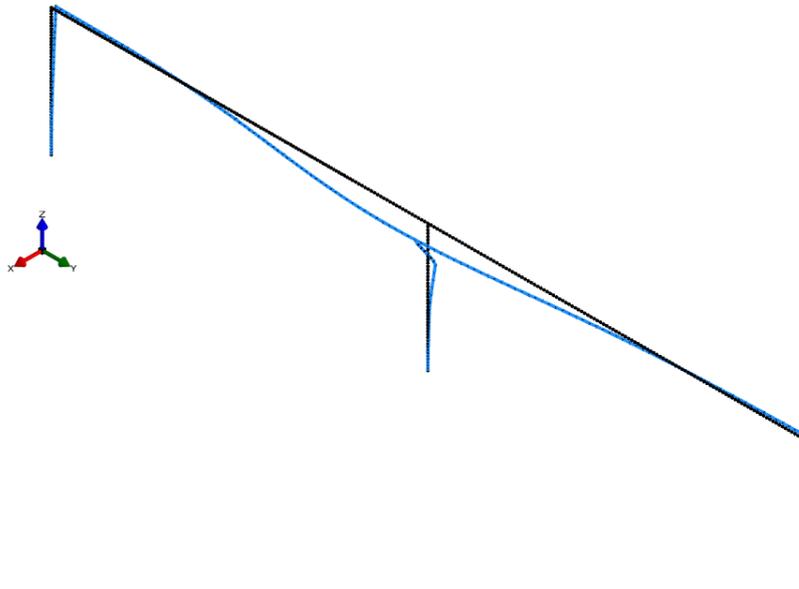


Figure 8-5 : Allure de la déformée du portique à $t = 18$ minutes et 40 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B, selon les axes X et Y :

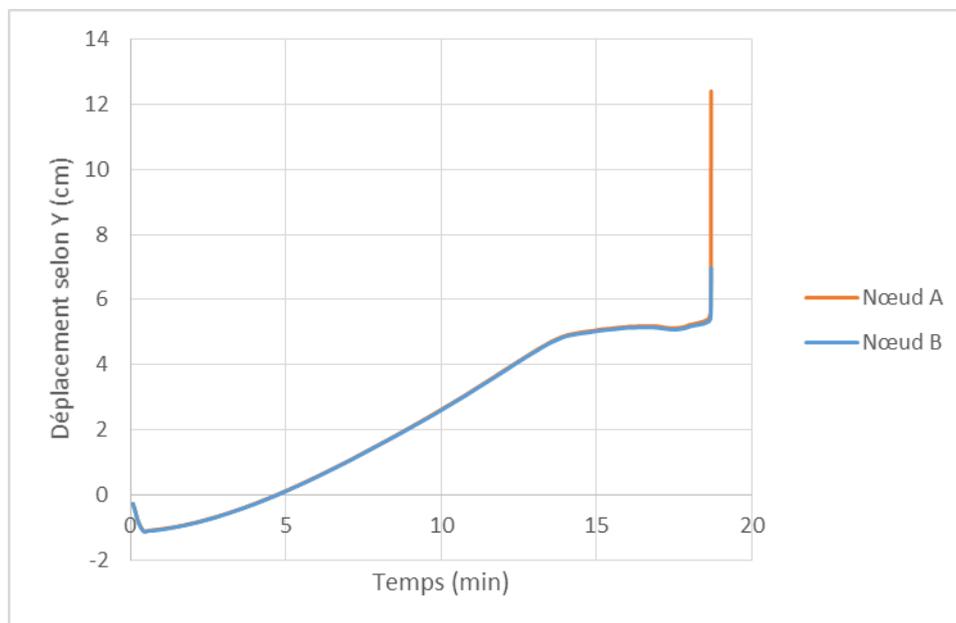


Figure 8-6 : Evolution du déplacement selon Y

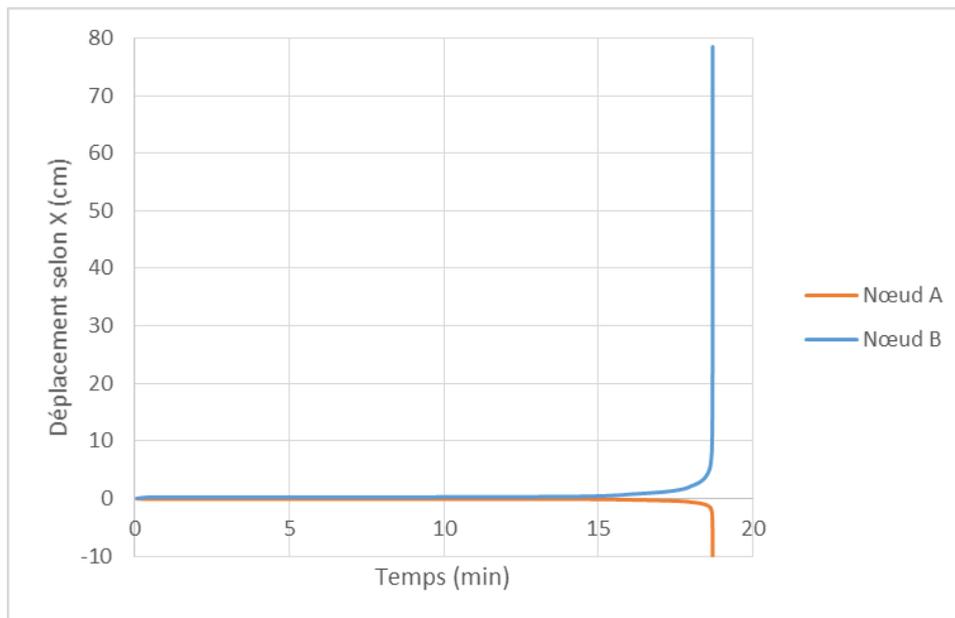


Figure 8-7 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 18 minutes et 40 secondes par flambement du poteau central, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C dans toute la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaîne intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

8.2.3. Scénario n°2

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau central. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°2 :

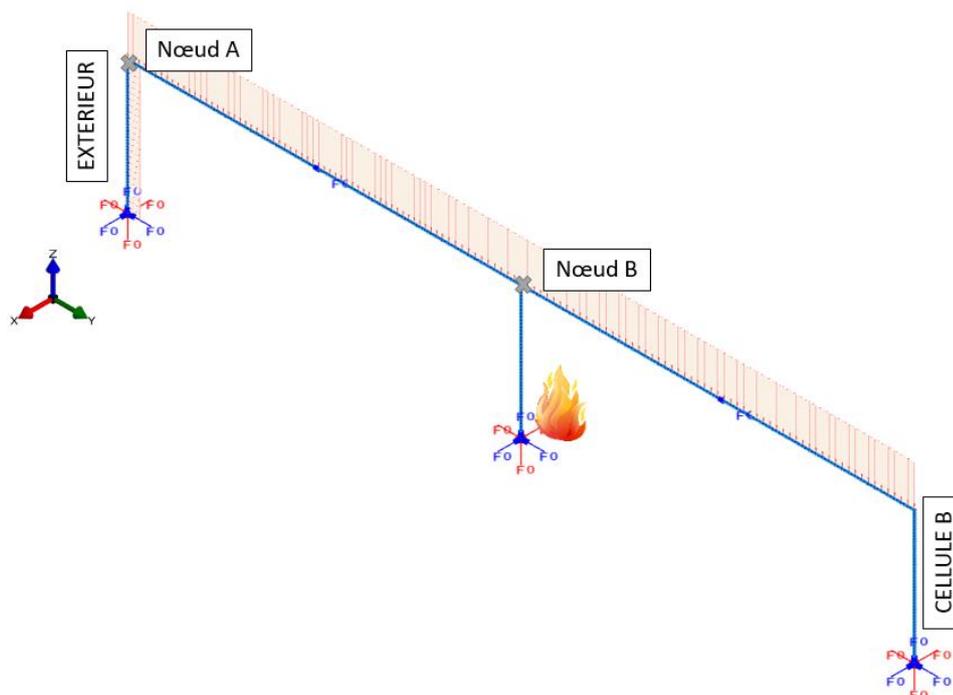


Figure 8-8 : Position du départ de feu pour le scénario n°2

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive, du côté de la façade et du côté de la cellule B, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 17$ minutes et 45 secondes :

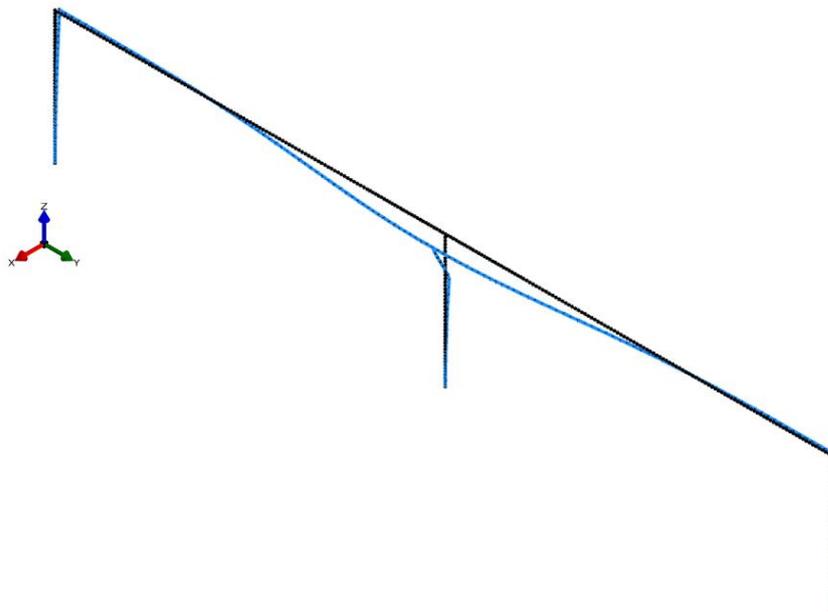


Figure 8-9 : Allure de la déformée du portique à $t = 17$ minutes et 45 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B, selon les axes X et Y :

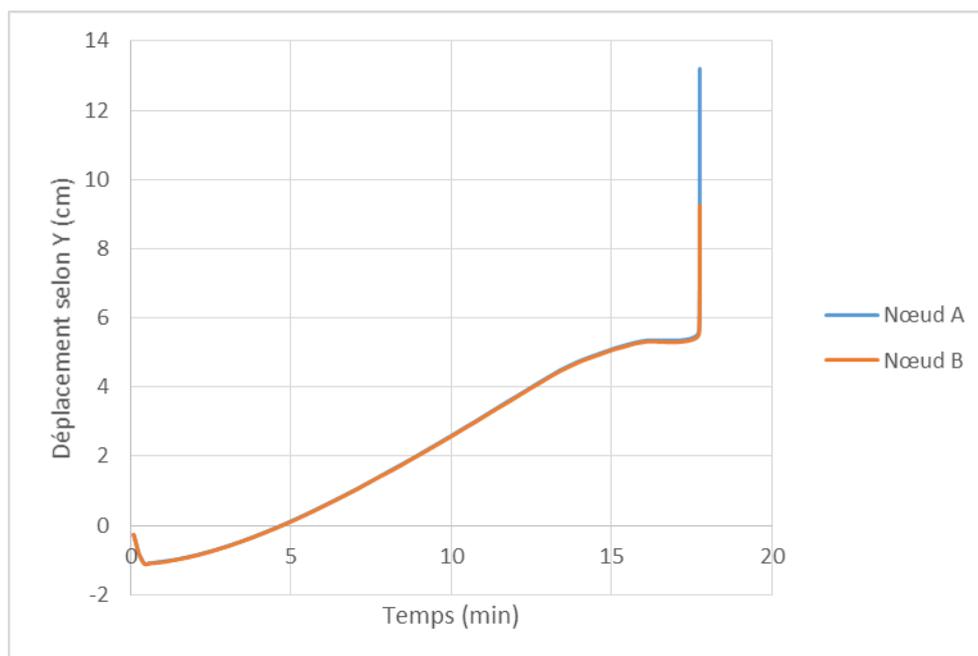


Figure 8-10 : Evolution du déplacement selon Y

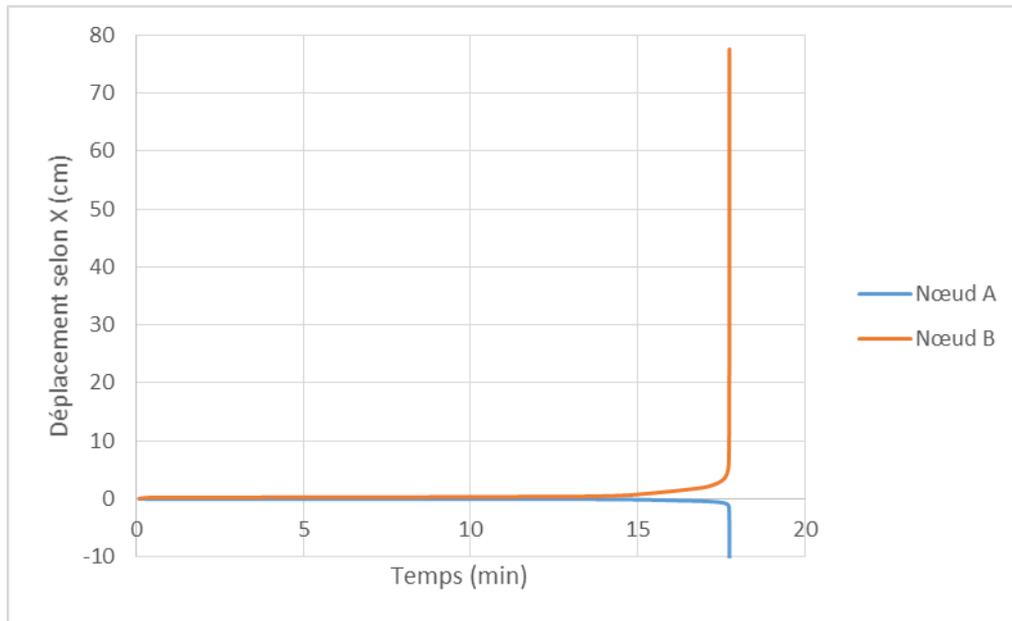


Figure 8-11 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 17 minutes et 45 secondes par flambement du poteau central, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C dans toute la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaîne intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

8.3. ETUDE DE LA CELLULE D

8.3.1. Echauffement des éléments de structure

Pour chaque scénario étudié, l'échauffement des différents éléments composant le portique est déterminé à partir de calculs de transfert thermiques réalisés avec le logiciel SAFIR [22].

Les sollicitations thermiques appliquée sur les faces exposées au feu des éléments correspondent à celles présentées au §5.1.2. Les courbes de températures utilisées sont choisies en fonction de la situation du départ de feu : au rez-de-chaussée de la mezzanine, au 1^{er} étage de la mezzanine ou au niveau du stockage de masse près du mur coupe-feu séparant les cellules D et A.

A titre d'exemple, la figure suivante présente le modèle thermique réalisé pour le poteau central du portique, dans le cas d'un départ de feu au 1^{er} étage de la mezzanine, au niveau du poteau central :

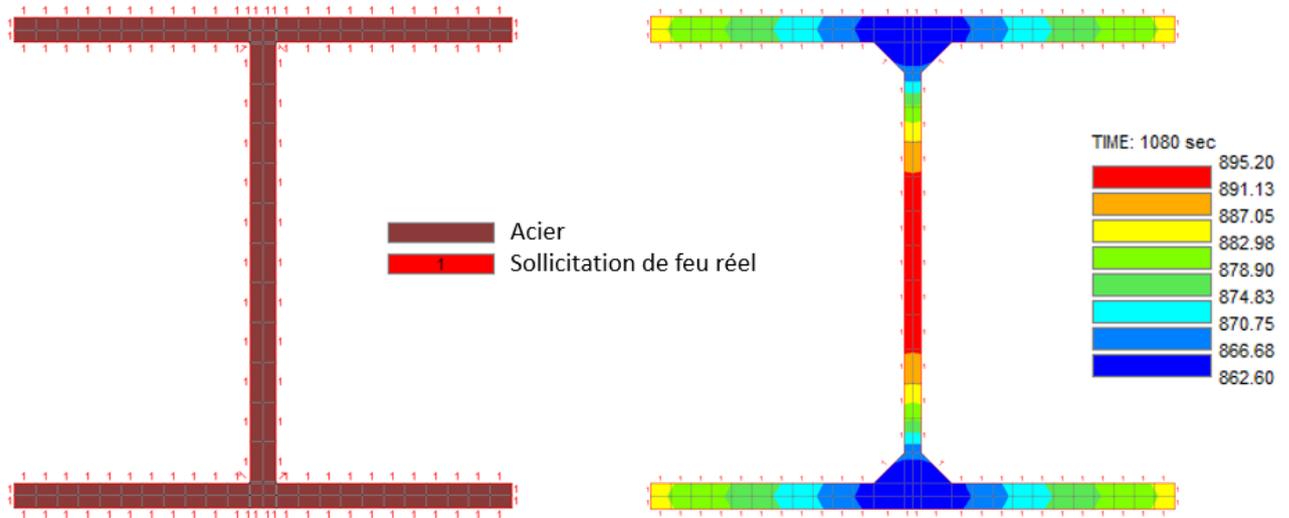


Figure 8-12 : Modèle réalisé pour le poteau central et échauffement à $t = 18$ minutes.

8.3.2. Scénario n°1

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau de rive, côté façade, au rez-de-chaussée de la mezzanine. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°1 :

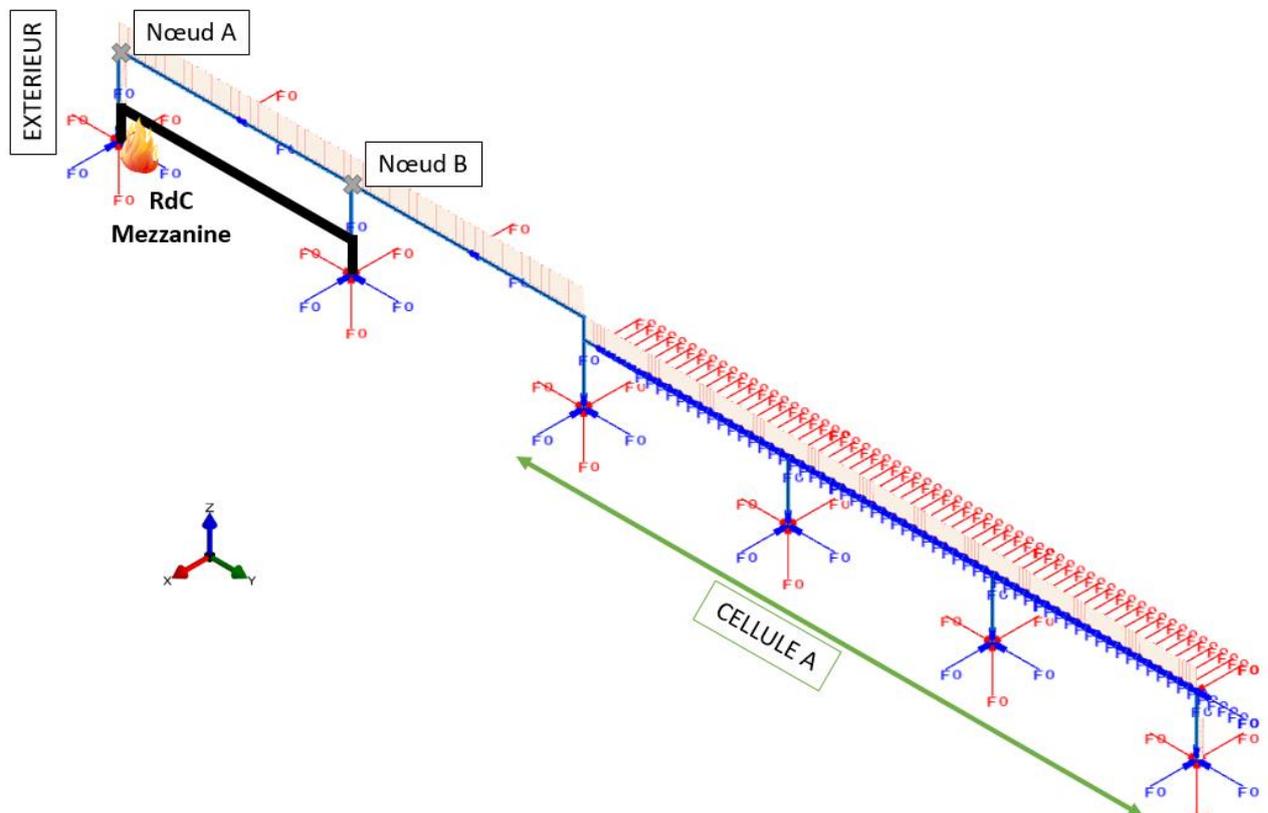


Figure 8-13 : Position du départ de feu pour le scénario n°1

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive du côté de la cellule A, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 18$ minutes et 30 secondes :

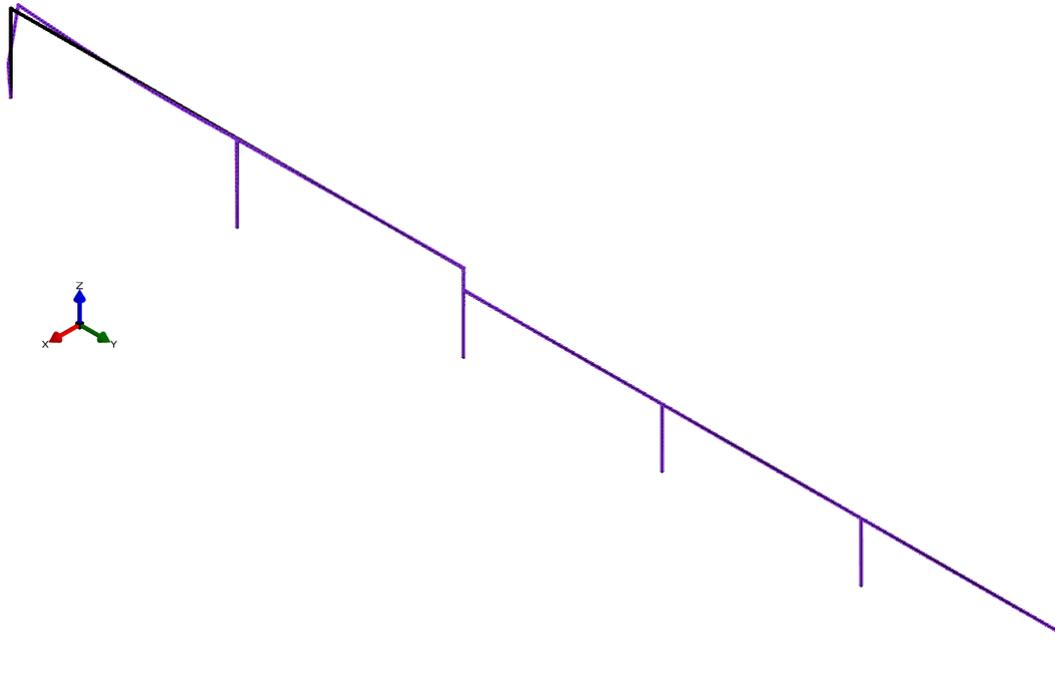


Figure 8-14 : Allure de la déformée du portique à $t = 18$ minutes et 30 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B selon les axes X et Y :

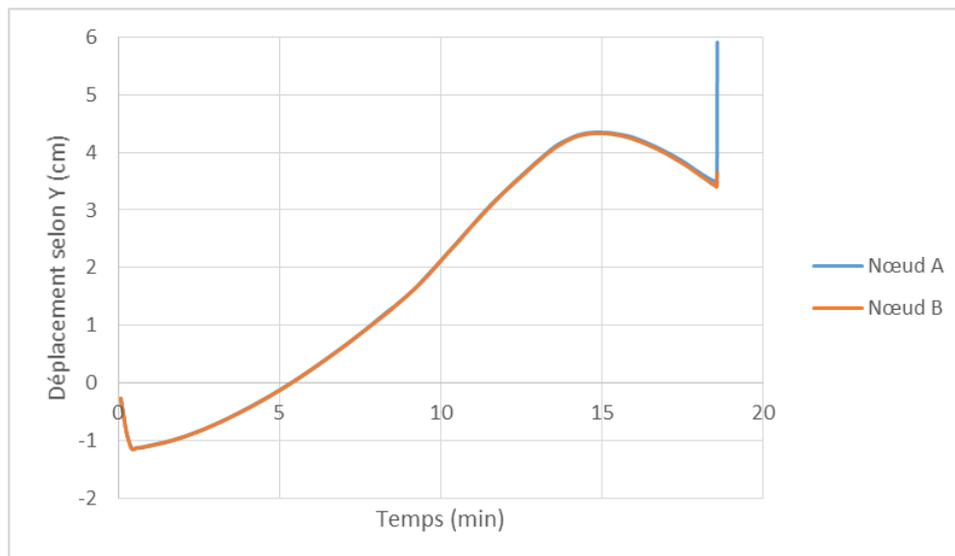


Figure 8-15 : Evolution du déplacement selon Y

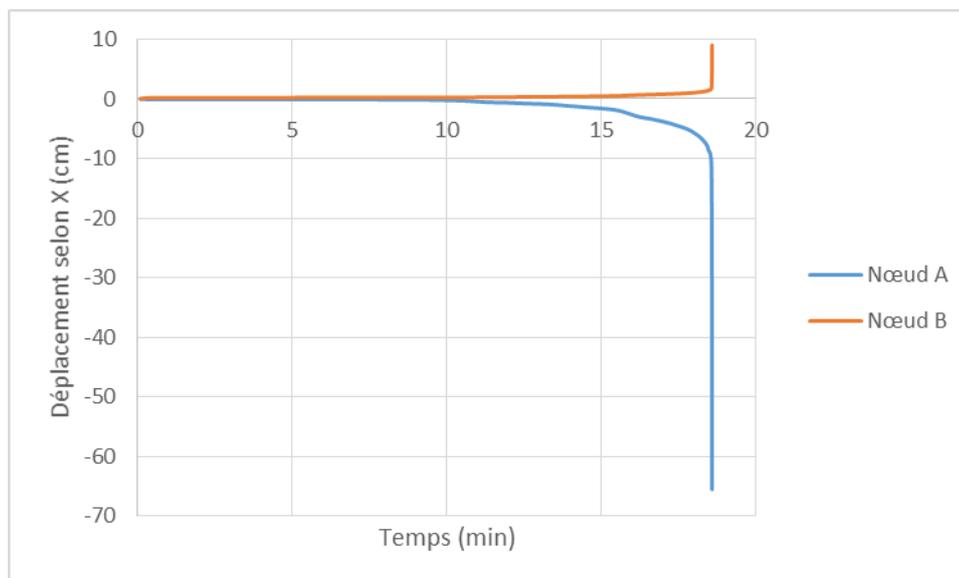


Figure 8-16 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 18 minutes et 30 secondes par flambement du poteau central, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C en partie haute de la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaine intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

8.3.3. Scénario n°2

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau central, au rez-de-chaussée de la mezzanine. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°2 :

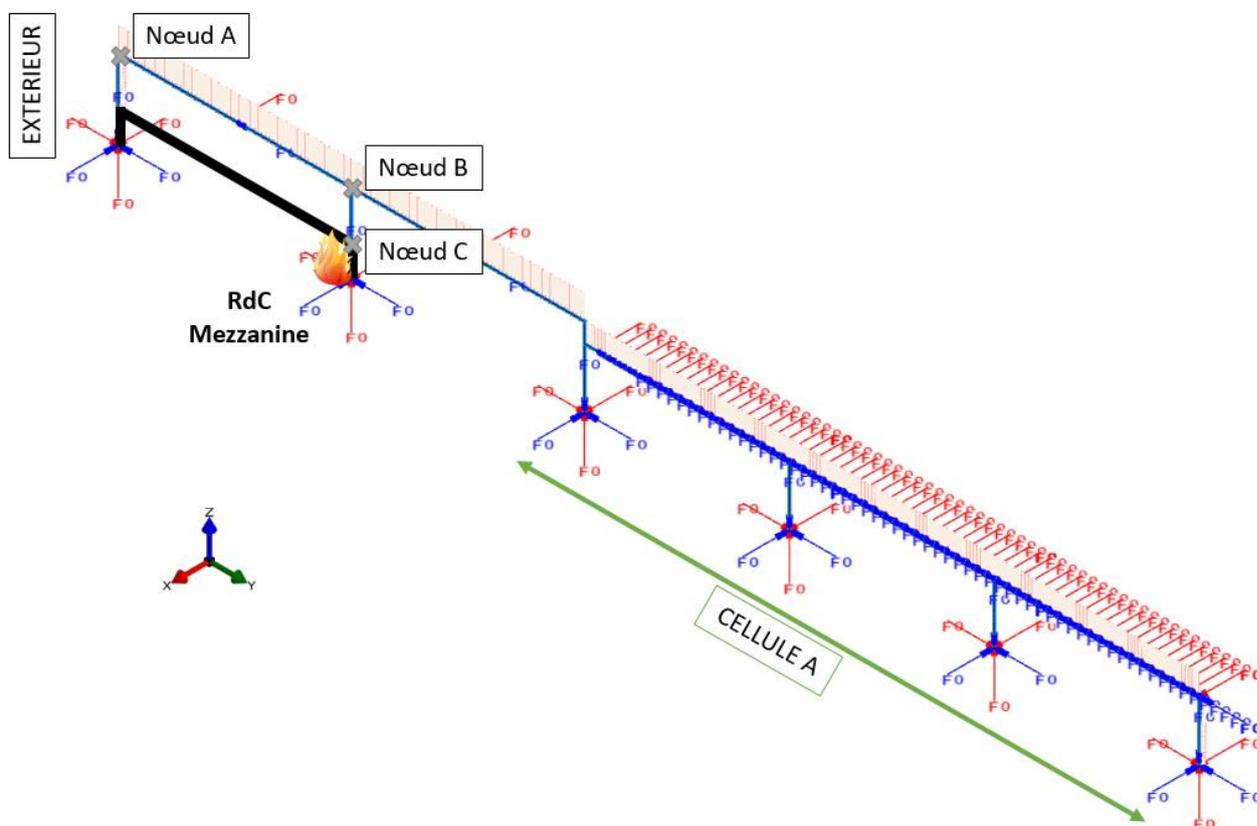


Figure 8-17 : Position du départ de feu pour le scénario n°2

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive du côté de la cellule A, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 17$ minutes et 50 secondes :

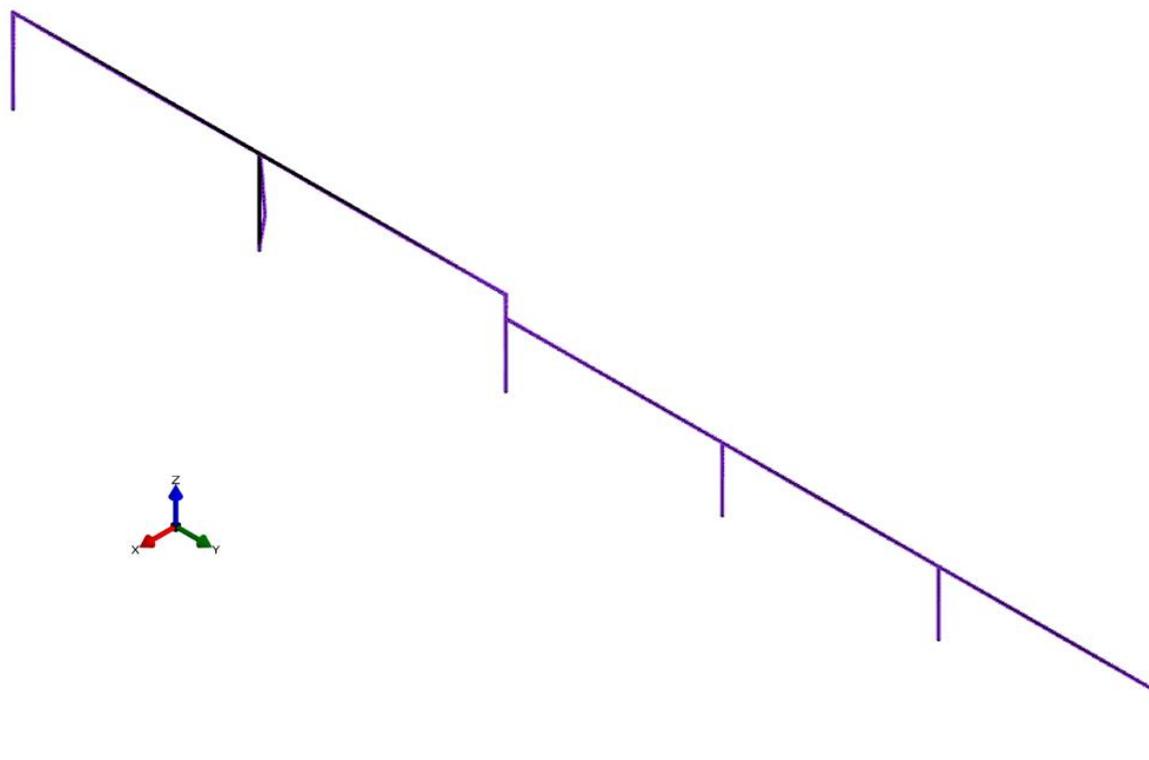


Figure 8-18 : Allure de la déformée du portique à t = 17 minutes et 50 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A, B et C selon les axes X et Y :

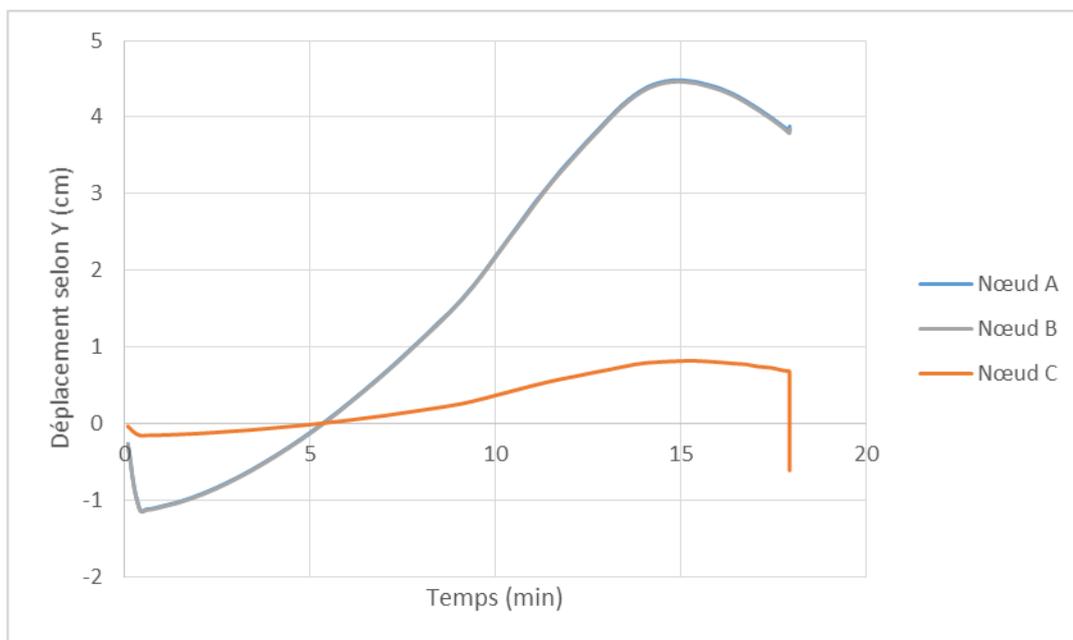


Figure 8-19 : Evolution du déplacement selon Y

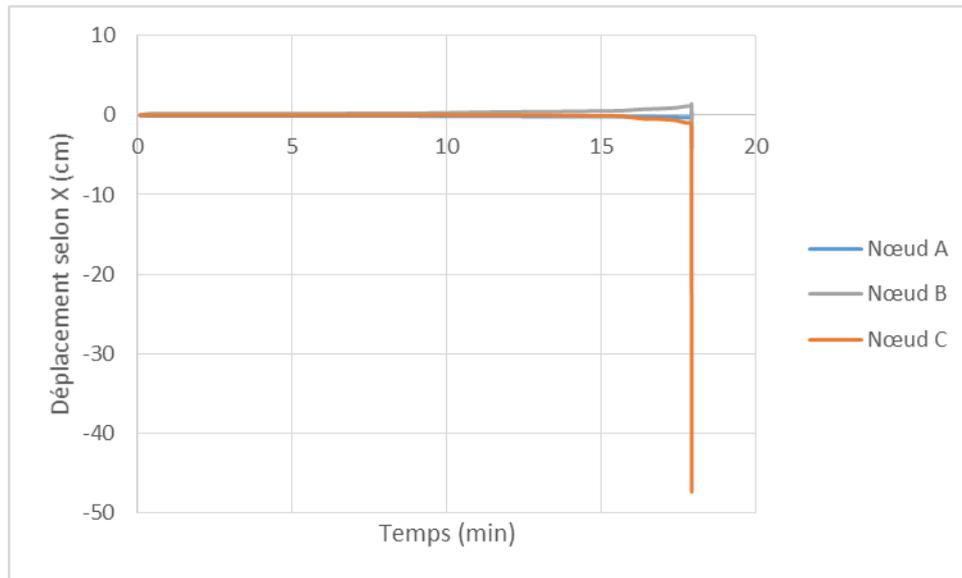


Figure 8-20 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 17 minutes et 50 secondes par flambement du poteau central, comme le met en évidence l'évolution des déplacements au niveau du point C. La ruine du poteau va entraîner la ruine des poutres et des assemblages. **La cinématique de ruine se fait donc vers l'intérieur.**
- La température des gaz est supérieure à 300°C en partie haute de la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaîne intra cellule est respectée.**

8.3.4. Scénario n°3

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau de rive, côté façade, au 1^{er} étage de la mezzanine. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°3 :

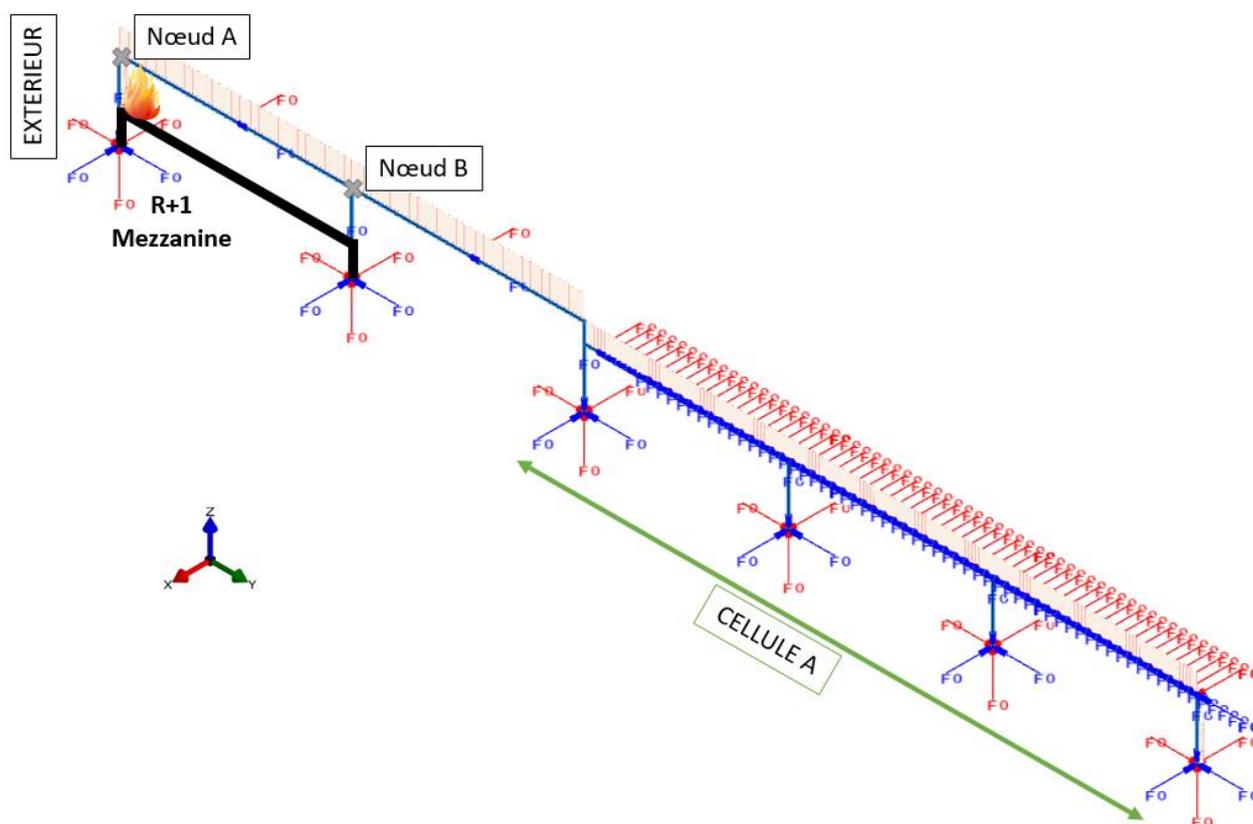


Figure 8-21 : Position du départ de feu pour le scénario n°3

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive du côté de la cellule A, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 17$ minutes et 5 secondes :

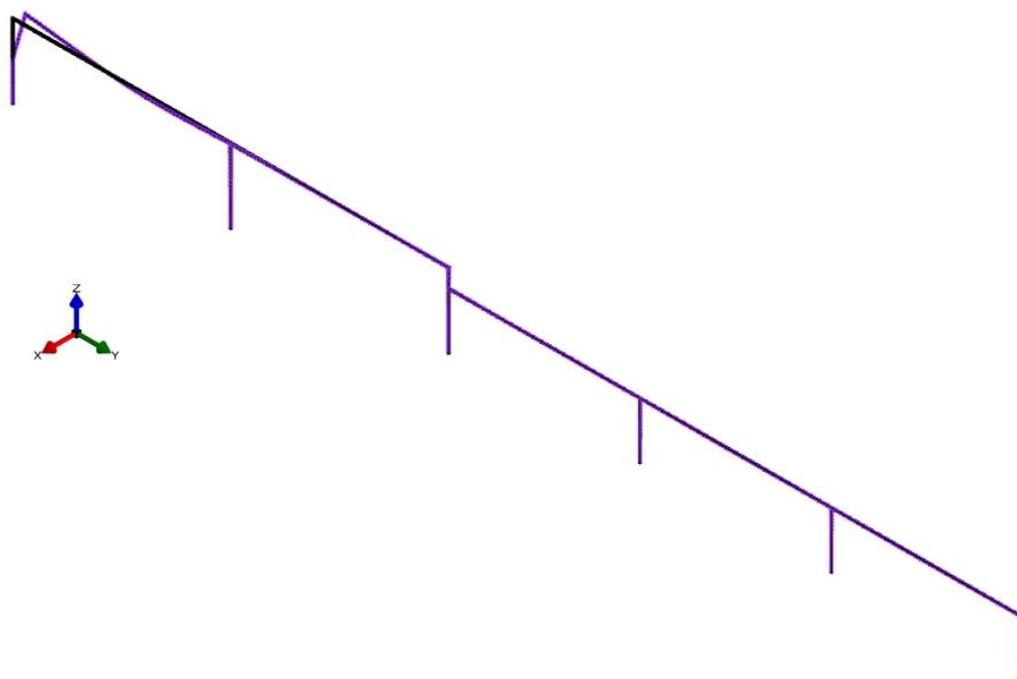


Figure 8-22 : Allure de la déformée du portique à t = 17 minutes et 5 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B selon les axes X et Y :

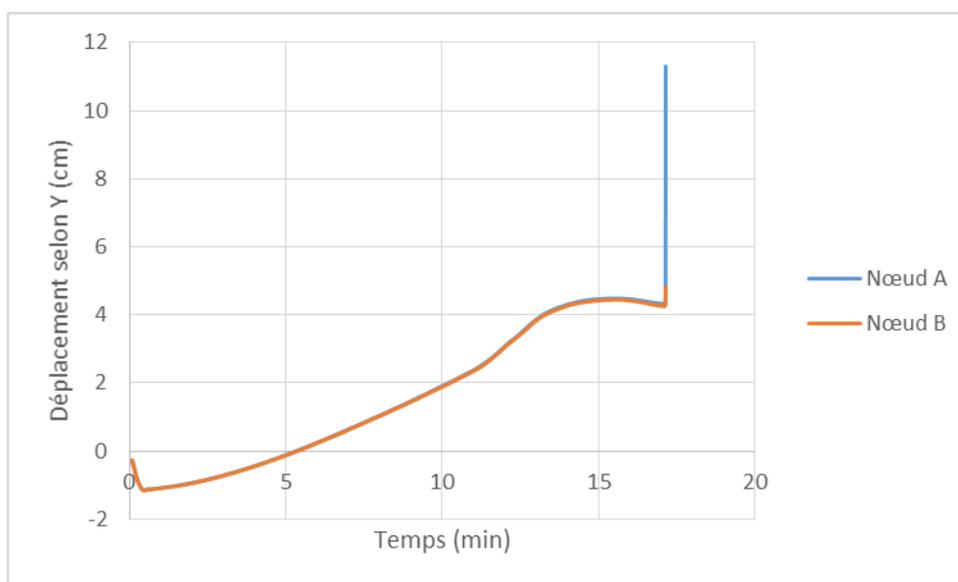


Figure 8-23 : Evolution du déplacement selon Y

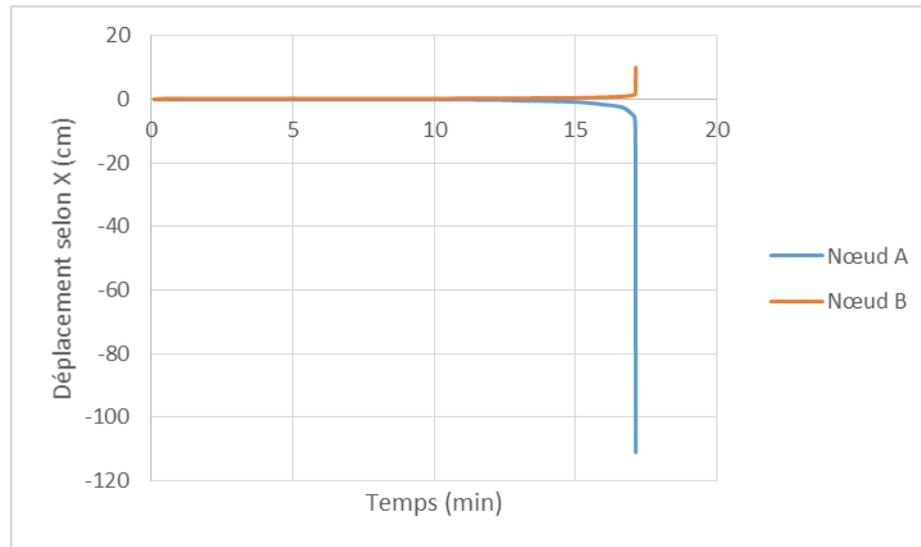


Figure 8-24 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 17 minutes et 5 secondes par flambement du poteau de rive, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C en partie haute de la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaîne intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

8.3.1. Scénario n°4

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau central, au 1^{er} étage. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°4:

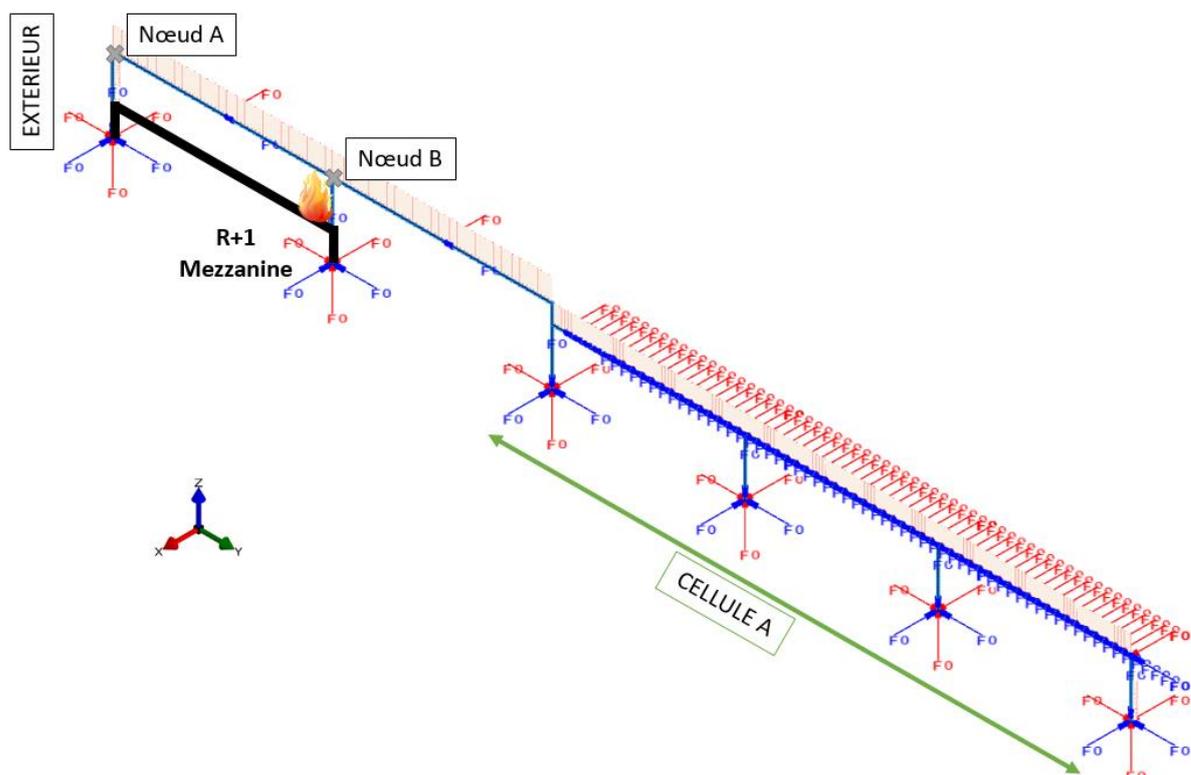


Figure 8-25 : Position du départ de feu pour le scénario n°4

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive du côté de la cellule A, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 14$ minutes et 30 secondes :

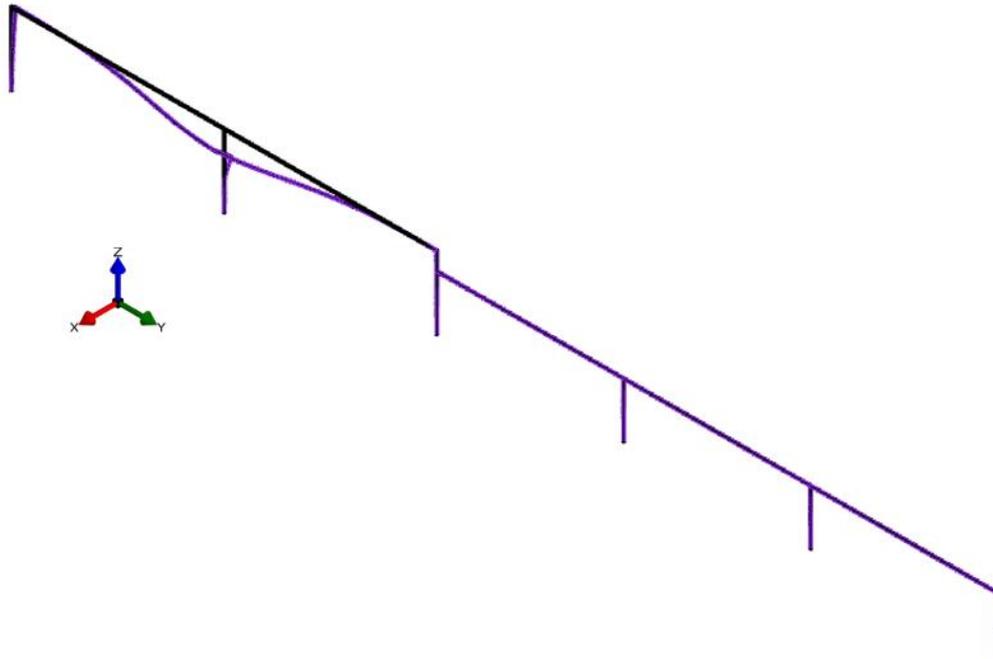


Figure 8-26 : Allure de la déformée du portique à $t = 14$ minutes et 30 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B selon les axes X et Y :

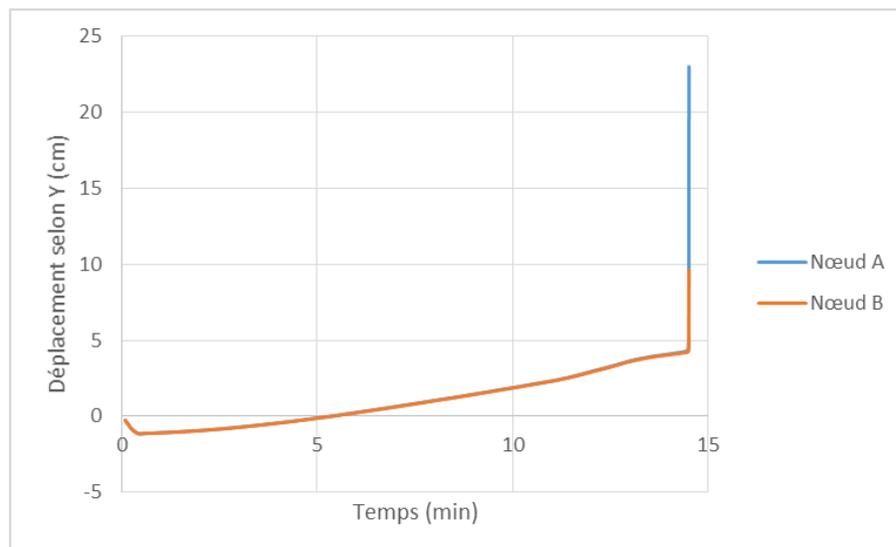


Figure 8-27 : Evolution du déplacement selon Y

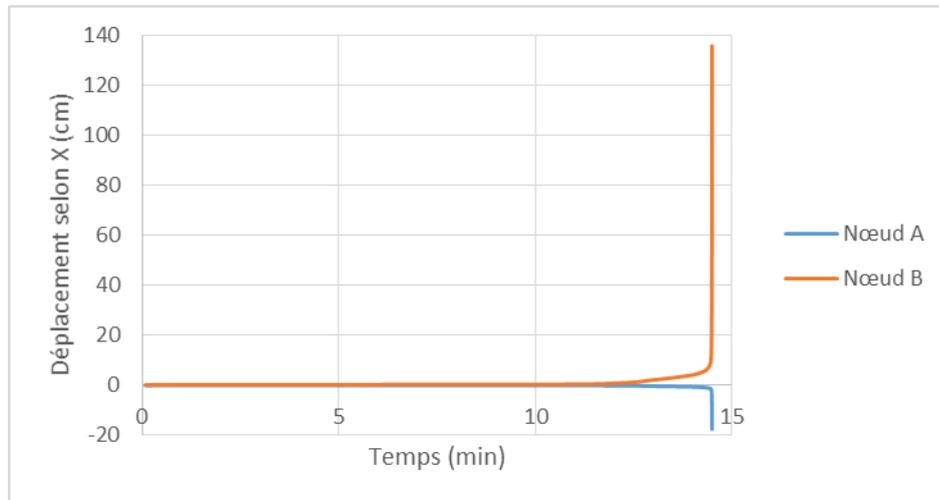


Figure 8-28 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 14 minutes et 30 secondes par flambement du poteau central, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C en partie haute de la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaîne intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

8.3.1. Scénario n°5

Le scénario de départ de feu se situe en pied du poteau de rive, du côté du mur coupe-feu. La figure suivante illustre la position du départ de feu pour le scénario n°5, au rez-de-chaussée de la mezzanine :

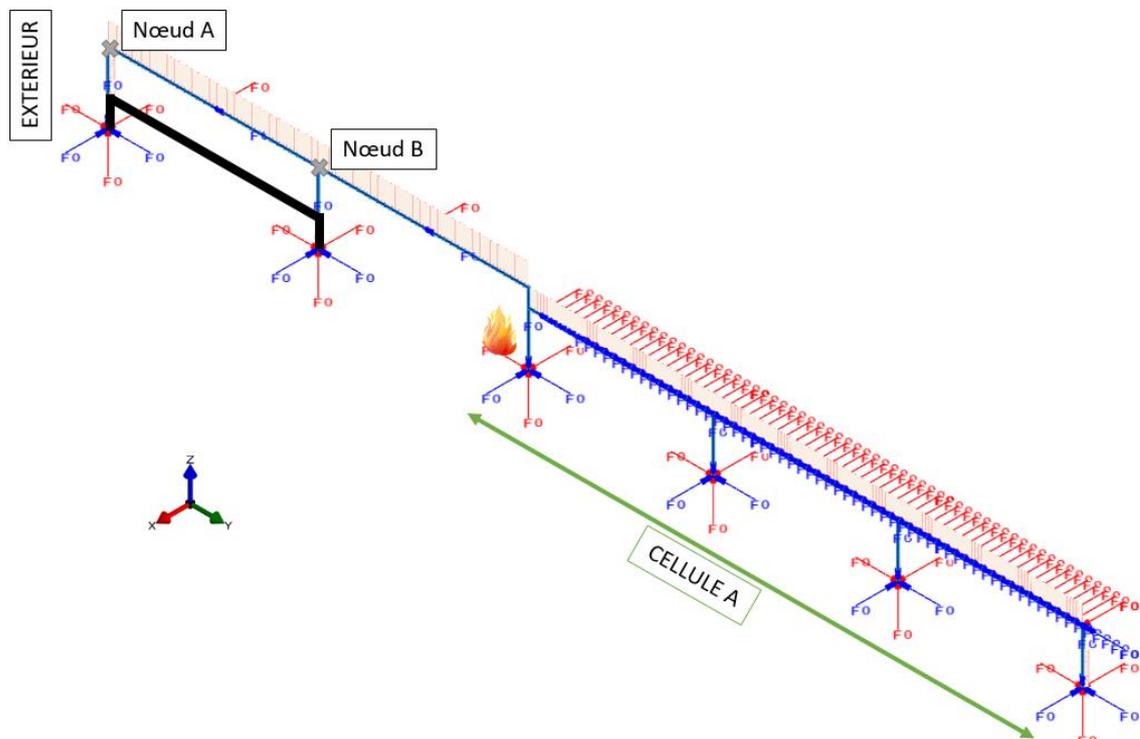


Figure 8-29 : Position du départ de feu pour le scénario n°5

Conformément au §0 et au §0, les poteaux situés en rive du côté de la cellule A, sont considérés comme protégés. De plus, on considère un blocage hors plan à mi- portée des poutres, qui correspond au blocage anti-déversement préconisé.

La figure suivante montre l'allure de la déformée du portique au moment de la ruine du portique, soit à $t = 18$ minutes et 10 secondes :

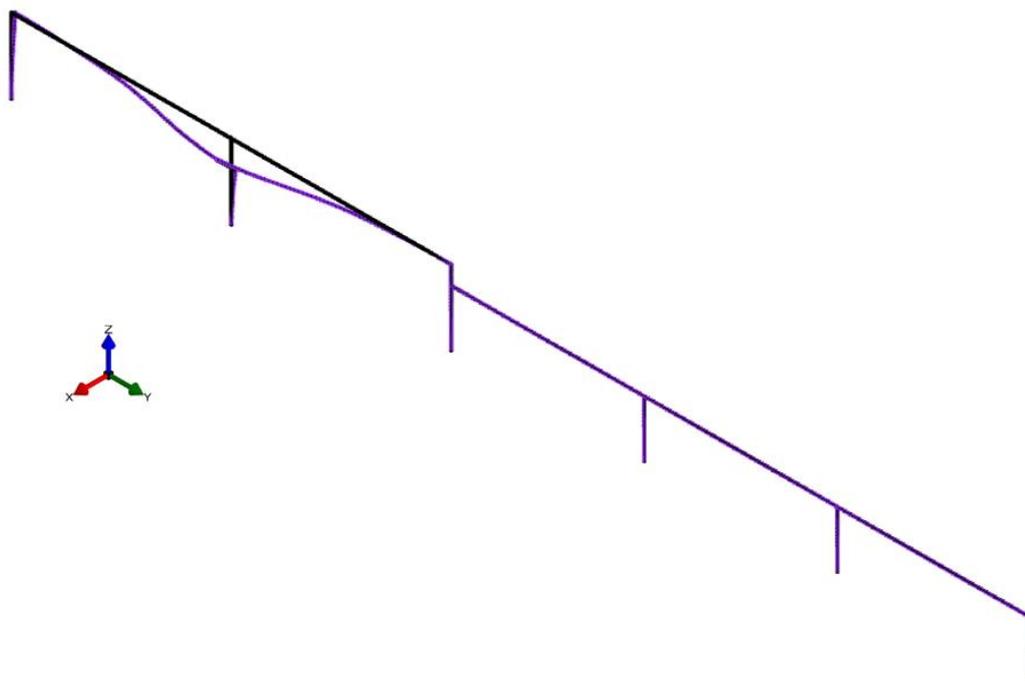


Figure 8-30 : Allure de la déformée du portique à $t = 18$ minutes et 10 secondes

Les figures suivantes présentent l'évolution en fonction du temps des déplacements horizontaux au niveau des nœuds A et B, selon les axes X et Y :

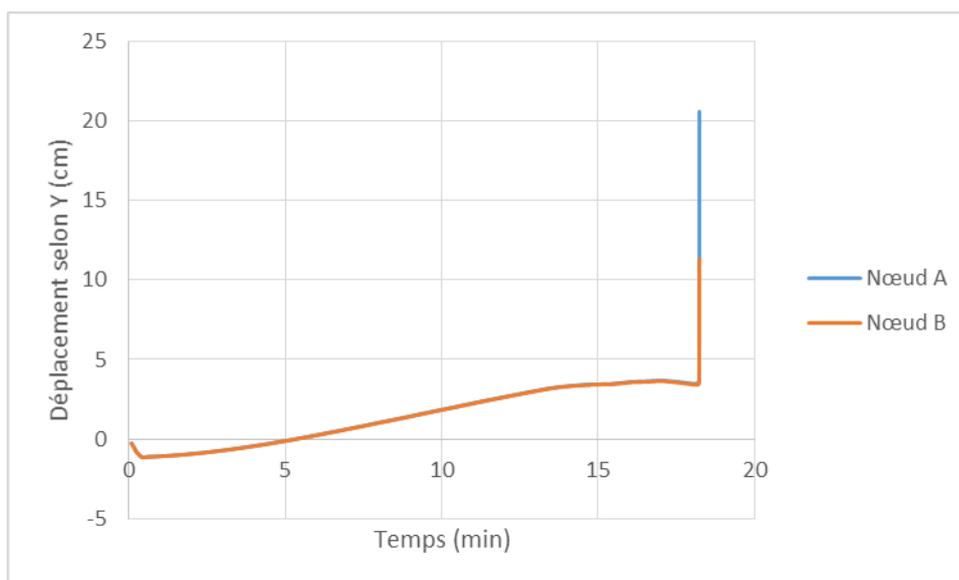


Figure 8-31 : Evolution du déplacement selon Y

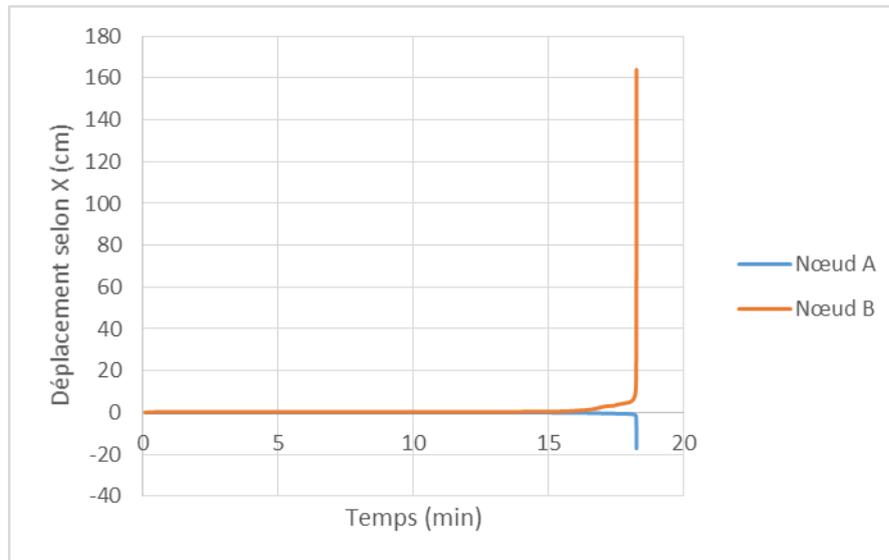


Figure 8-32 : Evolution du déplacement selon X

Les résultats montrent que :

- La structure ruine au bout de 18 minutes et 10 secondes par flambement du poteau central, comme l'illustre l'allure de la déformée. La température des gaz est supérieure à 300°C en partie haute de la cellule au moment de la ruine. **Ainsi, l'exigence de non-ruine en chaine intra cellule est respectée.**
- La structure ruine vers l'intérieur, comme l'illustre l'évolution des déplacements selon l'axe Y. **L'exigence de non-ruine vers l'extérieur est donc respectée.**

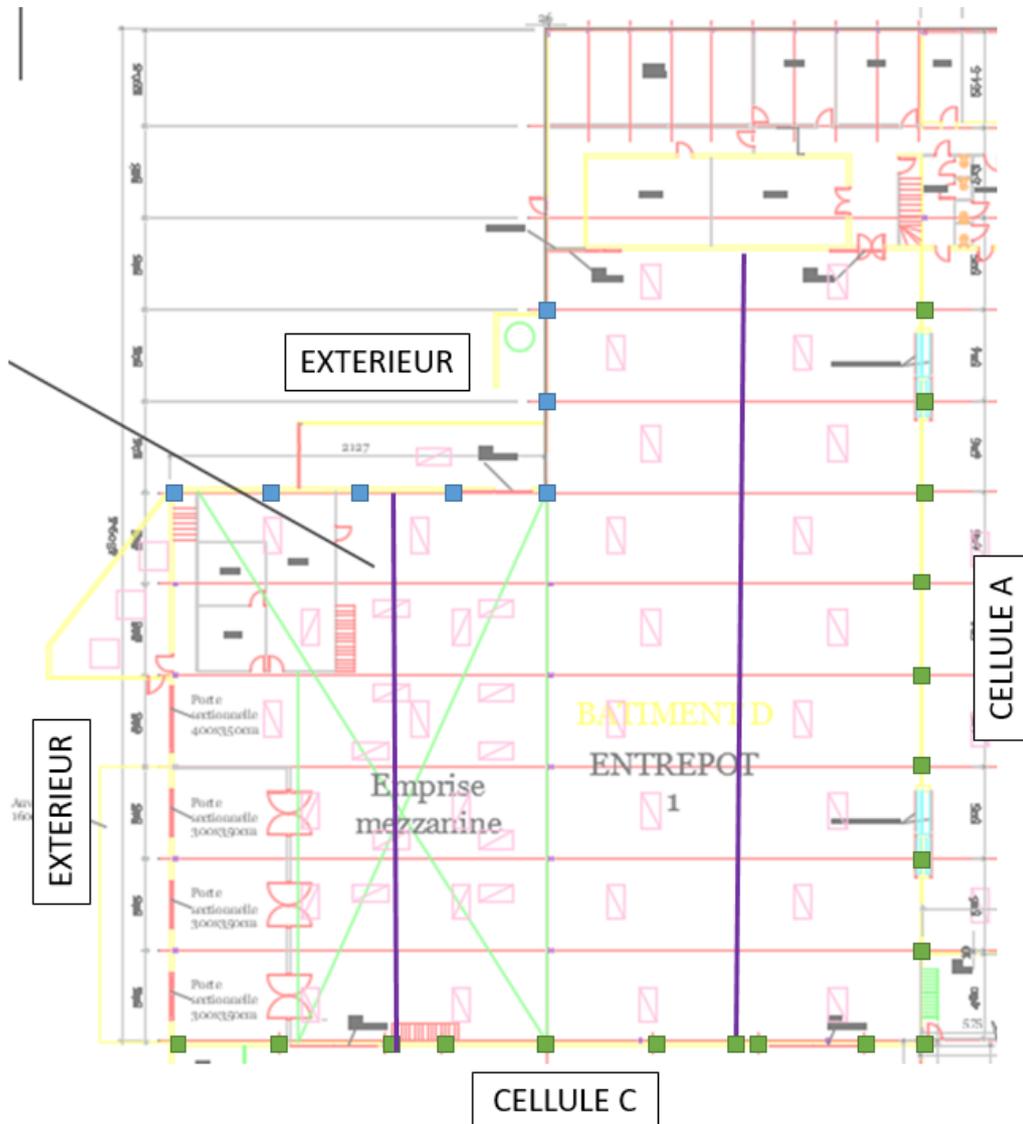
8.4. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus sur l'analyse du comportement au feu de la structure des cellules C et D sous scénarios de feu réel.

Cellule	Scénario	Temps de ruine	Vérification des exigences sur le mode de ruine		
			Non-ruine vers l'extérieur	Non-ruine en chaine inter-cellules	Non-ruine en chaine intra-cellules
C	Scénario n°1	18min 40s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
	Scénario n°2	17min 45s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
D	Scénario n°1	18min 30s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
	Scénario n°2	17min 50s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
	Scénario n°3	17min 5s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
	Scénario n°4	14min 30s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée
	Scénario n°5	18min 10s	Vérifiée	Vérifiée	Vérifiée

Tableau 8-1 : Synthèse des résultats

Remarque : l'étude de comportement au feu de la structure des cellules C et D a été réalisée en prenant en compte les préconisations données au §0 et au §0. Ainsi, les résultats indiqués dans le tableau sont valables uniquement si ces préconisations sont respectées.



- Poteau de rive extérieur : à protéger pendant 15 minutes sous feu conventionnel
- Poteau de rive côté mur coupe-feu : à protéger pendant 2 heures sous feu conventionnel
- Panne anti-déversement à mettre en place à mi-portée de la poutre principale (Section 190mmx190mm – Bois massif C24)

Figure 9-2 : Préconisations pour la cellule D

Remarques : Les entretoises anti-déversement devront être liaisonnées aux parties supérieures des poutres principales (par exemple aux $\frac{3}{4}$ de la hauteur). Elles devront être solidaires « d'un point fixe », formé par un poteau de rive ou un nœud d'une poutre au vent.

10. NOTE SUR LES CELLULES F ET G (ETUDE INITIALE)

Dans le cadre de l'étude initiale, présentée dans le rapport d'étude n°16-003398b-ABO-ACH-PLO [20], des préconisations ont été faites concernant les poutres des cellules F et G. En effet, l'étude de ces poutres sous feu conventionnel avait montré que leur stabilité n'était pas assurée pendant 15 minutes compte tenu du risque de déversement.

Les préconisations faites consistaient en la mise en place d'une protection thermique à base de panneaux en bois sur toutes les poutres des cellules F et G.

Afin de minimiser les coûts de réalisation, une autre solution peut être mise en place sur la base des résultats de la présente étude, qui consiste en la mise en place d'entretoise anti-déversement à mi- portée des poutres des cellules F et G et fixée dans la partie supérieure de ces poutres (par exemple aux $\frac{3}{4}$ supérieure de la poutre). Le dimensionnement de la section de cette barre anti-déversement est réalisé à partir de la section 9.2.5.2 de l'Eurocode 5, partie 1-2 [14].

Ainsi, Efectis France préconise la mise en place d'une entretoise complémentaire en bois massif à mi- portée des poutres principales sur les cellules F et G. La section de cette panne devra être de 160mm x 160mm au minimum, en bois massif C24.

11. CONCLUSIONS

EFFECTIS France a été missionné par la société DOMOTI afin d'analyser le comportement au feu de l'entrepôt de stockage situé à la Chapelle d'Armentières (59). Une première étude a été réalisée en 2017 sur les cellules A, B, E, F et G. Ce rapport présente un complément d'étude portant sur les cellules C et D.

Conformément à l'arrêté du 11 avril 2017 [7], il s'agissait de vérifier les exigences suivantes :

- Exigences prescriptives sous feu normalisé : durée de stabilité R15 de la structure porteuse du bâtiment ;
- Exigences portant sur le mode de ruine de la structure : non ruine de la structure vers l'extérieur, non ruine en chaîne de la structure.

La vérification de la stabilité sous feu conventionnel des éléments porteurs, présentée au §6, a mis en évidence le non-respect de l'exigence prescriptive R15 sur certains de ces éléments.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats obtenus sur l'analyse de stabilité sous feu conventionnel de ces deux cellules, dans leur configuration initiale.

		Exigence de stabilité prescriptive sous feu conventionnel R15	
		Cellule C	Cellule D
Poutres en bois lamellé-collé		Non stable	
Pannes en bois massif		Non stable	
Poteaux métalliques	Poteaux de rive (côté façade)	Non stable	R15
	Poteaux centraux	Non stable	R15
	Poteaux de rive (côté mur CF)	Protection à mettre en place selon préconisations qualitatives (§0)	
	Poteaux de rive (support de pannes)		

Tableau 11-1 : Synthèse des résultats sur l'exigence de stabilité R15.

Afin d'assurer le respect des exigences, des préconisations ont été faites sur la structure des cellules C et D. Ces préconisations consistent en la mise en place d'une protection thermique sur certains poteaux et en l'installation d'une entretoise anti-déversement à mi- portée des poutres principales.

L'étude de mode de ruine, présentée au §8, a mis en évidence le respect des exigences recherchées sur les cellules C et D. Cependant, ces résultats ne sont valables qu'en considérant la mise en place effective des préconisations faites aux paragraphes §0 et §0.

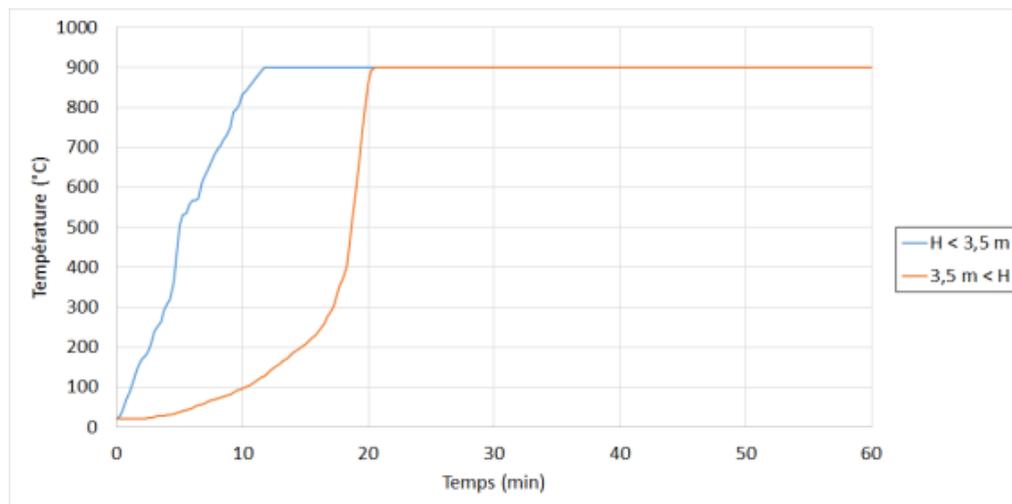
Un récapitulatif des mesures à mettre en place est donné au paragraphe §9.

Par ailleurs, de nouvelles mesures ont été données concernant les cellules F et G. Ces mesures sont une alternative à la mise en place de protection thermique sur les poutres principales, comme cela avait été préconisé lors de l'étude initiale [20].

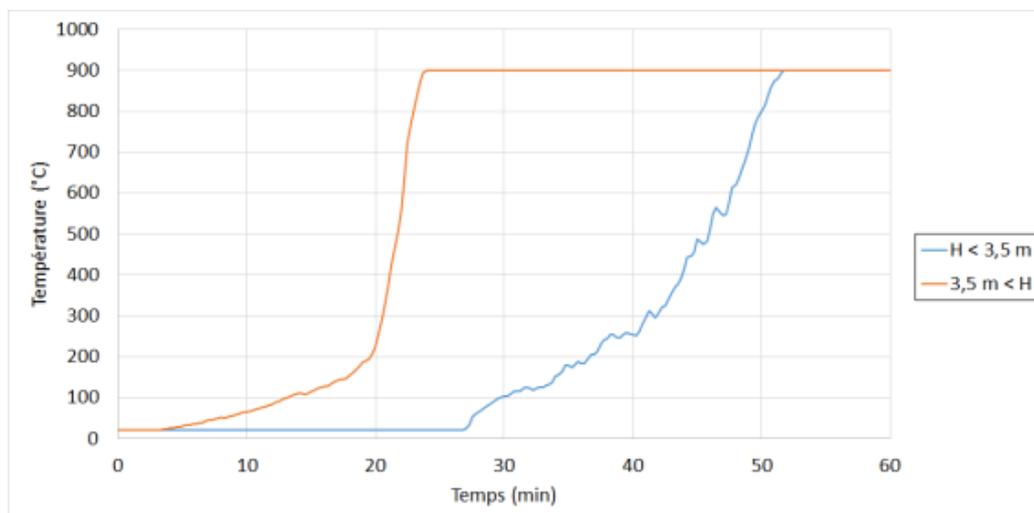
ANNEXE A SOLLICITATIONS THERMIQUES DANS LA CELLULE D

A.1 INCENDIE AU REZ-DE-CHAUSSEE DE LA MEZZANINE

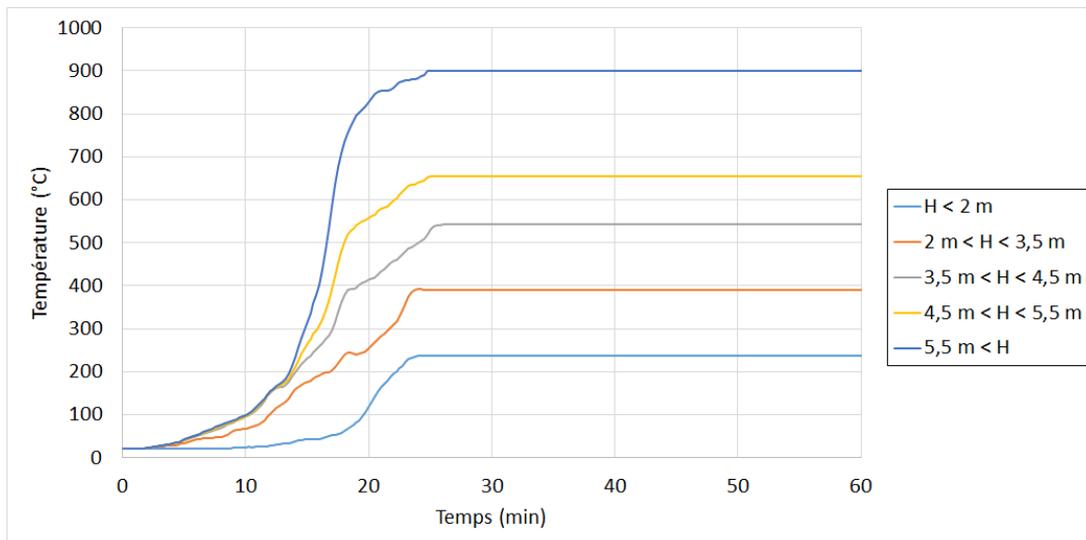
Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la température au niveau des éléments de structure en fonction du temps.



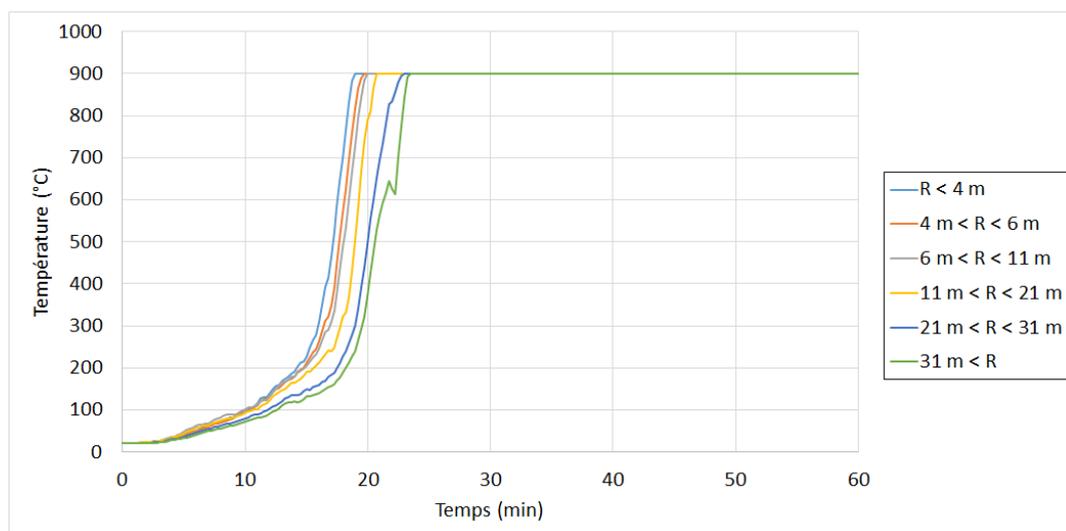
Évolution de la température selon la hauteur pour le poteau proche du départ de feu dans la cellule D



Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux de part et d'autre du départ de feu dans la cellule D



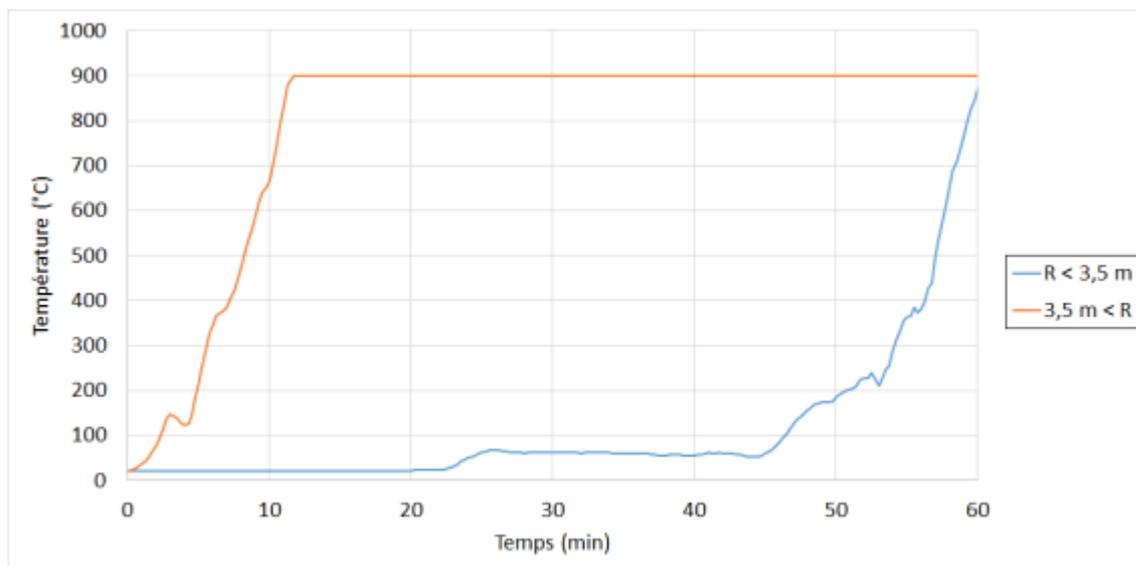
Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux en dehors des mezzanines dans la cellule D



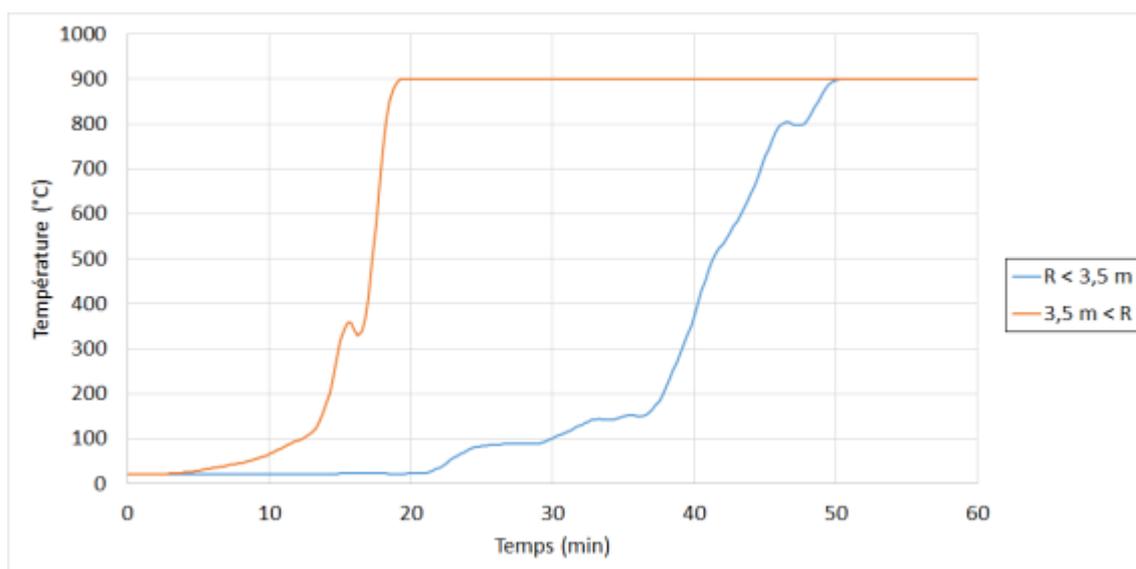
Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement vis-à-vis du foyer dans la cellule D

A.2 INCENDIE AU-DESSUS DE LA MEZZANINE (R+1)

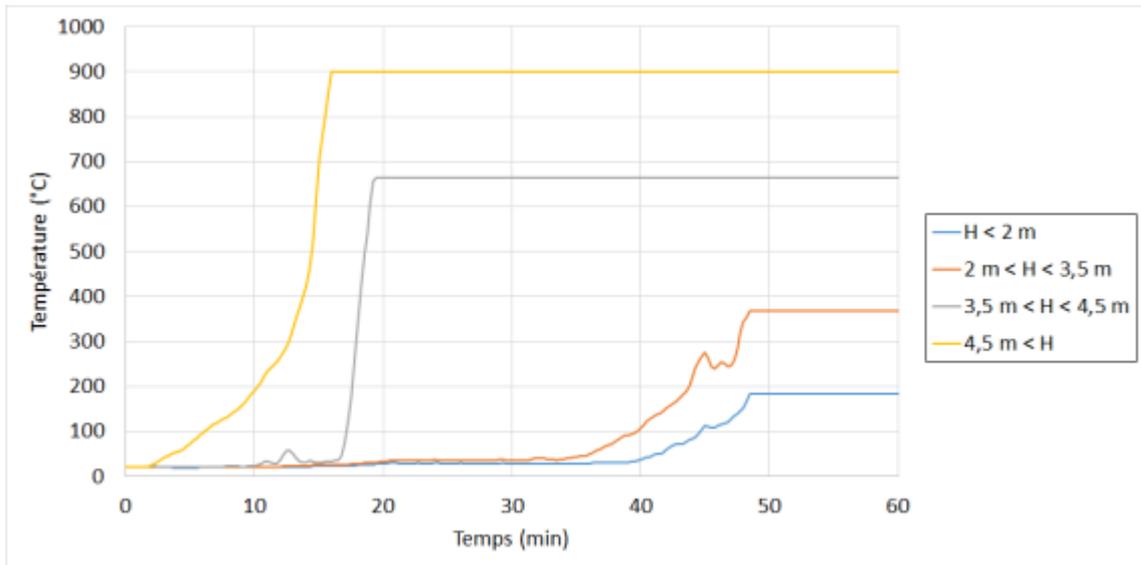
Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la température au niveau des éléments de structure en fonction du temps.



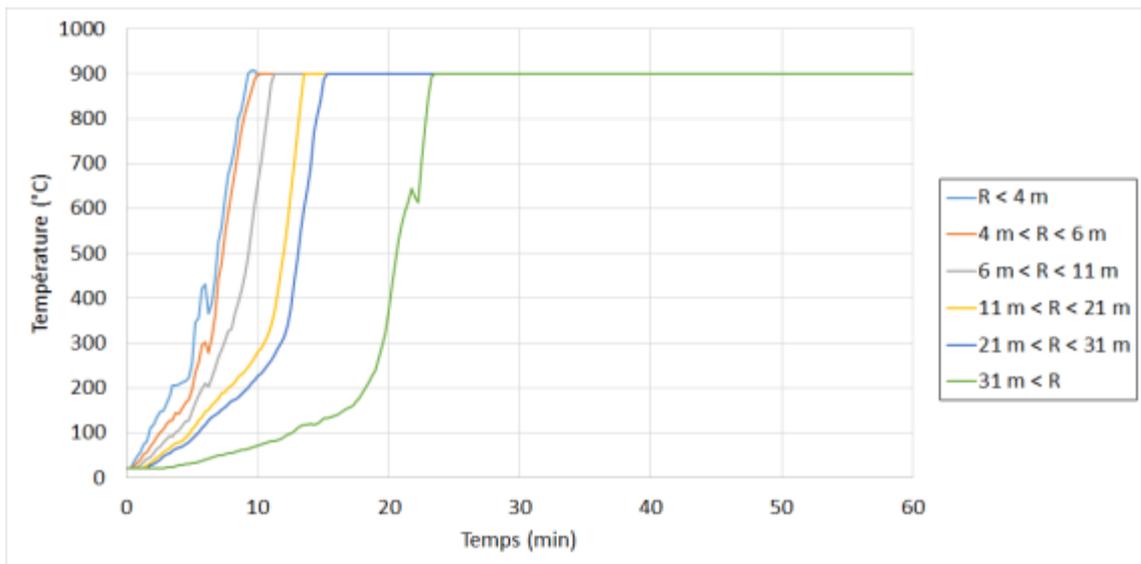
Évolution de la température selon la hauteur pour le poteau proche du départ de feu dans la cellule D



Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux de part et d'autre du départ de feu dans la cellule D



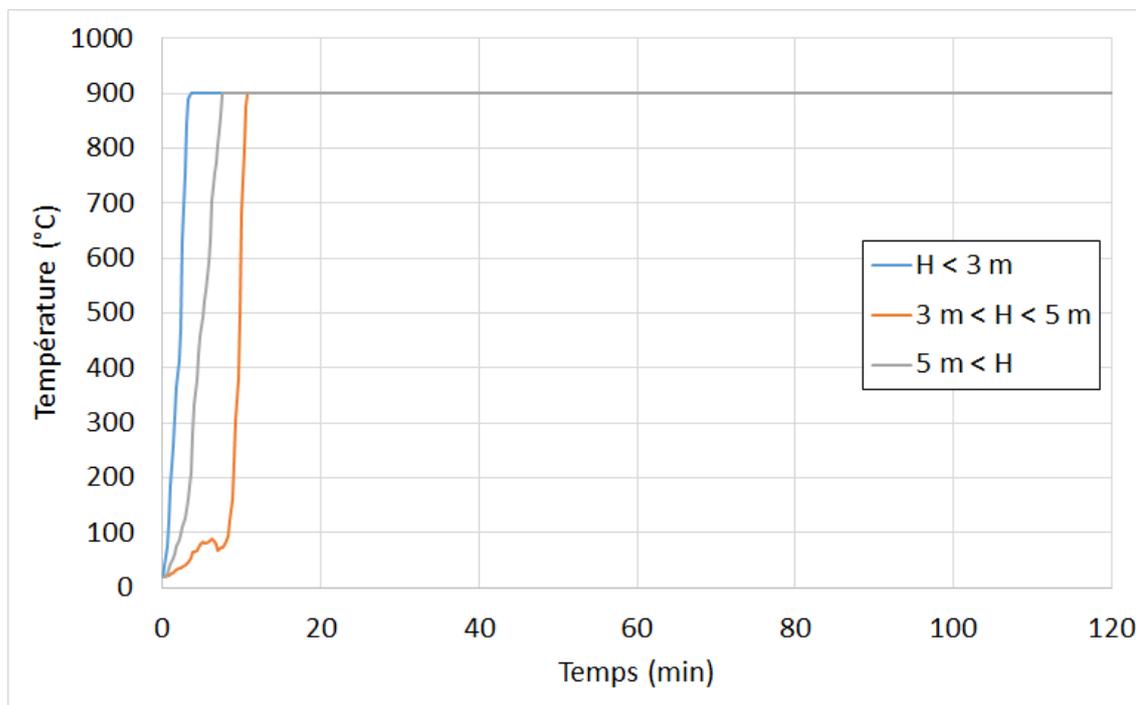
Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux en dehors des mezzanines dans la cellule D



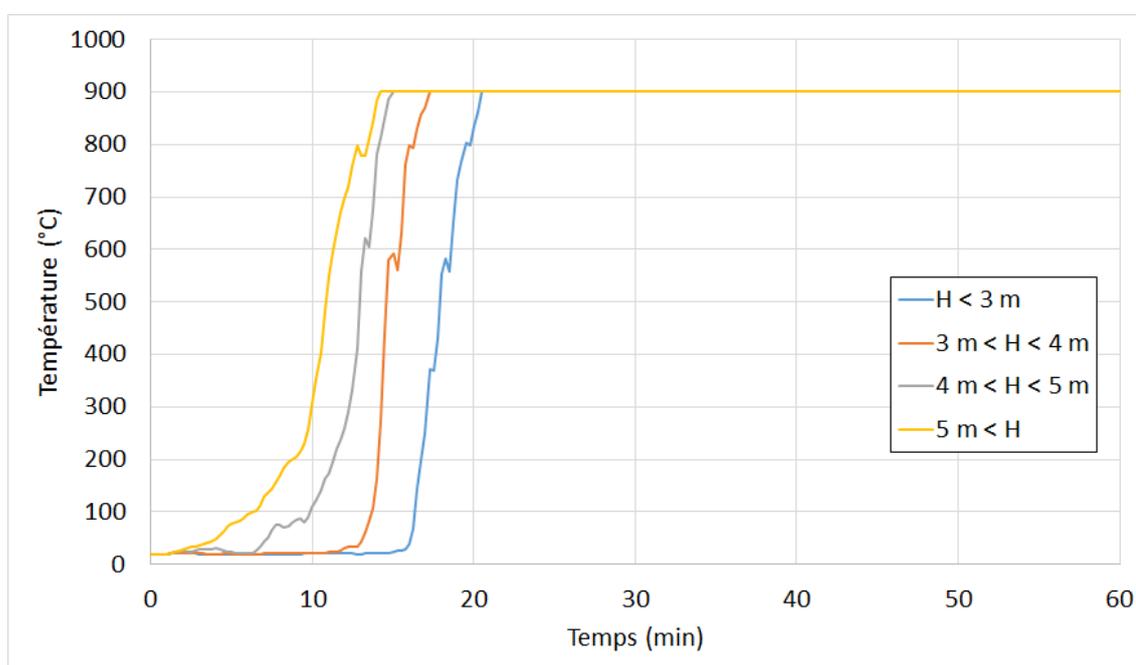
Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement vis-à-vis du foyer dans la cellule D

A.3 INCENDIE EN DEHORS DE LA MEZZANINE (STOCKAGE DE MASSE)

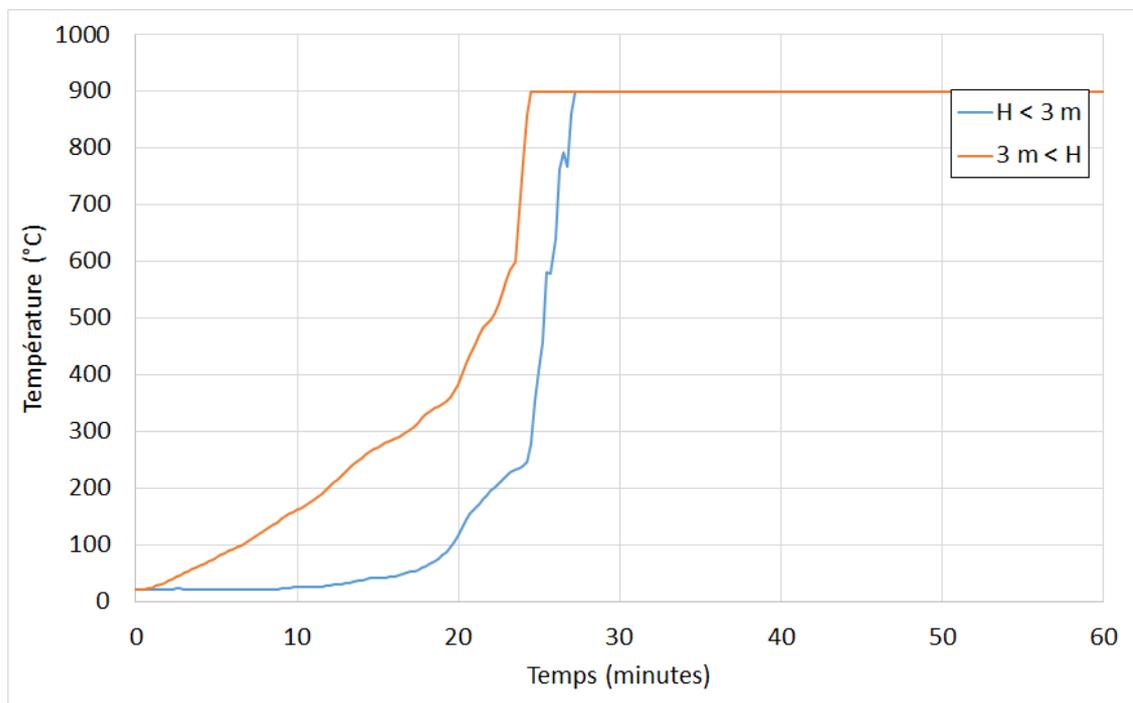
Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la température au niveau des éléments de structure en fonction du temps.



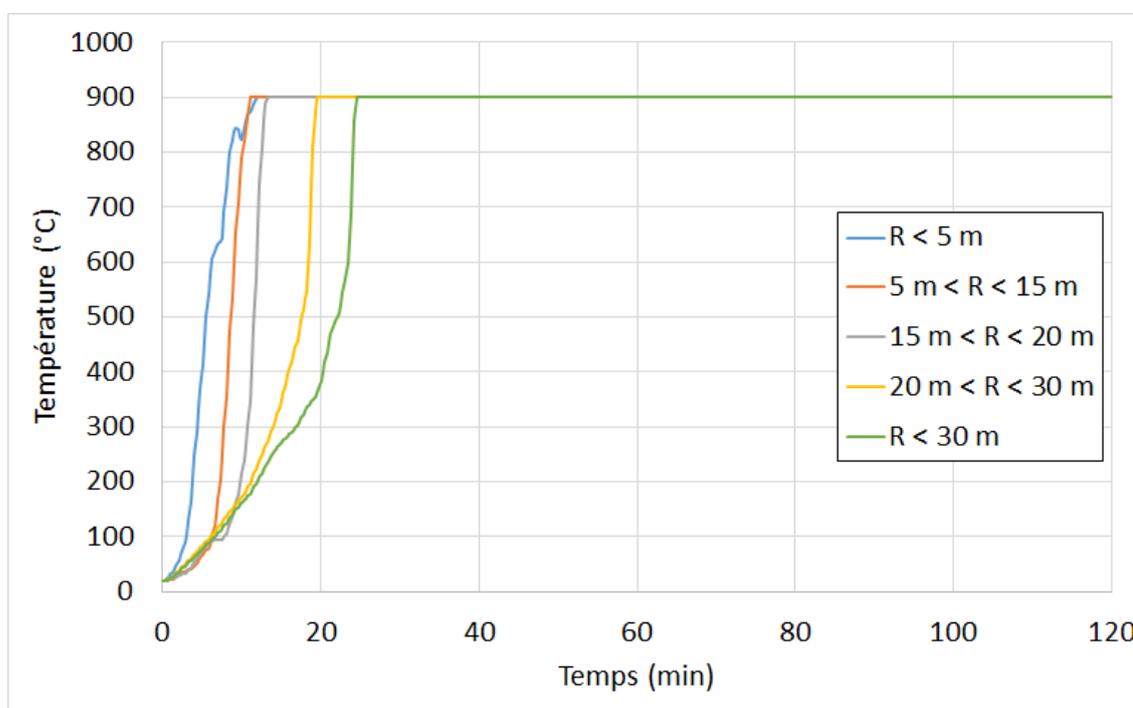
Évolution de la température selon la hauteur pour le poteau proche du départ de feu dans la cellule D



Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux de part et d'autre du départ de feu dans la cellule D



Évolution de la température en fonction de la hauteur pour les poteaux en rive dans la cellule D



Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement vis-à-vis du foyer dans la cellule D