



Prévention et maîtrise des risques

GROUPE CNPP
Département Feu et Environnement
Route de la Chapelle Réanville
CD 64 - CS 22265
F 27950 SAINT MARCEL
Tél. 33 (0)2 32 53 64 33
Fax 33 (0)2 32 53 64 68

RAPPORT D'ETUDE N° CR 22 14082-1
Additif n°1 au rapport CR 22 14082 en date du 19 avril 2022

INGÉNIERIE DE SECURITÉ INCENDIE

Etude du comportement au feu d'un site ICPE existant

DATE : 14 juin 2022

CLIENT :

CS France

135 Rue Edouard Isambard,
27120 Pacy-sur-Eure

RESPONSABLE CLIENT :

Mr. Eric ALLARD

Tél : 02 32 67 14 68 / 06 08 04 27 40

Fax : 02 32 67 14 17

Mail : e.allard@c-sgroup.com

Le présent rapport comporte : 97 pages dont 3 pages d'Annexe

Ce rapport ne peut être reproduit ou publié que dans sa forme intégrale. Le CNPP décline toute responsabilité en cas de reproduction ou de publication non conforme. Le CNPP se réserve le droit d'utiliser les enseignements qui résultent du présent rapport pour les inclure dans des travaux de synthèse ou d'intérêt général pouvant être publiés par ses soins.

www.cnpp.com

CNPP Entreprise SARL au capital de 8 500 000 € • SIRET 34290125300050 - N° TVA FR 50342901253 - Code NAF 8559A • RC Évreux 1987B00299
Siège Social : CS 22265 - F 27950 SAINT-MARCEL • N° formateur 23270036727

SOMMAIRE

1	CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE	5
2	ETUDE DU DOSSIER ET DESCRIPTION DE L'OUVRAGE	7
2.1	DESCRIPTION GENERALE DE L'OUVRAGE ETUDIE	7
2.2	PERIMETRE DE L'ETUDE	15
2.3	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES.....	16
2.4	DESCRIPTION DE LA STRUCTURE METALLIQUE DU BATIMENT.....	17
2.5	DISPOSITIONS DE MISE EN SECURITE INCENDIE.....	23
3	METHODOLOGIE DE L'ETUDE ET OUTILS DE CALCULS	25
3.1	GENERALITE	25
3.2	CODE DE CALCUL FDS.....	26
3.3	CODE DE CALCUL SAFIR.....	27
4	NOTE D'HYPOTHESES GENERALES	28
4.1	HYPOTHESES POUR LE CALCUL FEU/FUMEEES (SIMULATIONS FDS).....	28
4.2	HYPOTHESES SUR LES CALCULS DE STRUCTURE	29
5	DEFINITION DES SCENARIOS D'ETUDE	31
5.1	RISQUES ASSOCIES AU STOCKAGE ET A L'ACTIVITE	31
5.2	DEFINITION DES FOYERS	32
5.3	POSITIONNEMENT DES DEPARTS DE FEU	33
5.4	EVALUATION DES CONDITIONS D'EVACUATION ET D'INTERVENTION.....	35
6	CONDITIONS D'EVACUATION ET D'INTERVENTION	36
6.1	SC1 : DEPART DE FEU DANS LE STOCKAGE RACK DU MAGASIN 2	36
6.2	SC2 : DEPART DE FEU AU NIVEAU DES RACKS DE L'ATELIER.....	38
6.3	SC3 : DEPART DE FEU AU NIVEAU DE LA MEZZANINE CENTRALE DE L'ATELIER (MEZZANINE 1)	40
6.4	SC4 : DEPART DE FEU AU NIVEAU DU RACK A PROXIMITE DE LA MEZZANINE CENTRALE (MEZZANINE 1) 42	
6.5	SC5 : DEPART DE FEU AU NIVEAU D'UN EMPILEMENT DE PALETTES DE LA ZONE ATELIER, A PROXIMITE D'UN POTEAU	44
6.6	SYNTHESE DES RESULTATS ET CONCLUSION SUR LES CONDITIONS D'EVACUATION ET D'INTERVENTION 46	
7	RESISTANCE AU FEU NORMALISE (ISO 834)	47
7.1	PANNES	47
7.2	POUTRES PRS TRAME COURANTE	49
7.3	POUTRES PRS TRAME SINGULIERE (FILE 11)	50
7.4	POTEAUX	54
7.5	CONTREVENTEMENT	58
7.6	CONCLUSIONS SUR LA RESISTANCE SOUS FEU NORMALISE	58
8	COMPORTEMENT AU FEU REEL DE LA STRUCTURE	59
8.1	SC1 : DEPART DE FEU DANS LE STOCKAGE RACK DU MAGASIN 2.....	60
8.2	SC2 : DEPART DE FEU AU NIVEAU DES RACKS DE L'ATELIER	69
8.3	SC3 : DEPART DE FEU AU NIVEAU DE LA MEZZANINE CENTRALE DE L'ATELIER (MEZZANINE 1).....	75
8.4	SC4 : DEPART DU FEU AU NIVEAU DU RACK A PROXIMITE DE LA MEZZANINE 1.....	81
8.5	SC5 : DEPART DE FEU AU NIVEAU D'UN EMPILEMENT DE PALETTES DE LA ZONE ATELIER, A PROXIMITE D'UN POTEAU	87
9	CONCLUSION GENERALE	93
10	ANNEXE 1 - BIBLIOGRAPHIE	95
11	ANNEXE 2 - MODELES A CHAMPS : CODE FDS (VERSION 6.6.0)	97

TABLE DES ILLUSTRATIONS

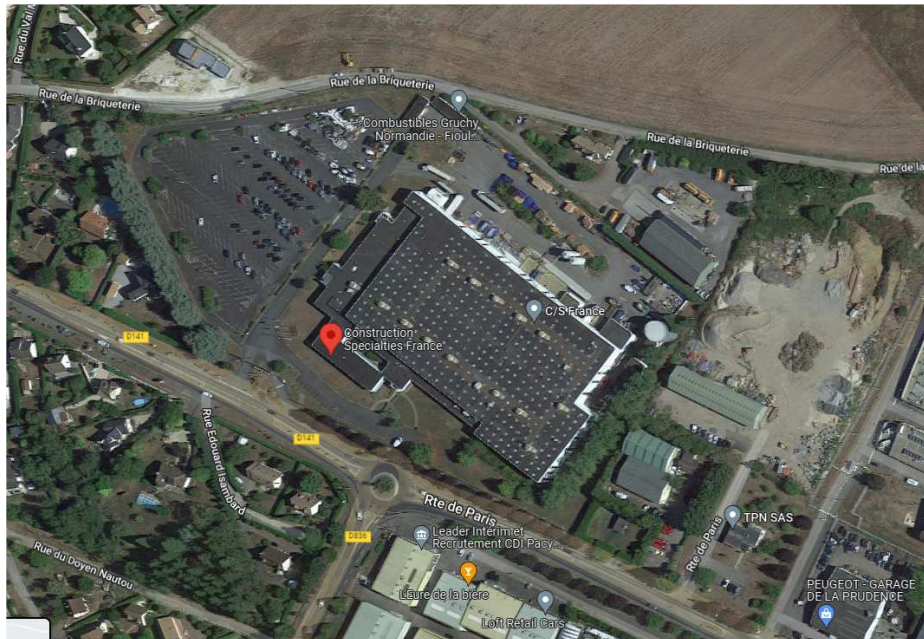
Figure 1 : Présentation de l'installation en objet de l'étude	5
Figure 2 : Magasins 1 et 2	7
Figure 3 : Réception stockage C9	8
Figure 4 : Préparation C9	8
Figure 5 : Magasins 3 et 4	8
Figure 6 : Ateliers	11
Figure 7 : Local départ.....	12
Figure 8 : Locaux machines maintenance et annexes	13
Figure 9 : Bureaux et autres	14
Figure 10 : Repérage des murs coupe-feu (2h)	16
Figure 11 : Schéma de l'ossature métallique du bâtiment.....	17
Figure 12 : Localisation des exutoires	23
Figure 13 : Implantation des détecteurs linéaires (traits rouges), zone « ateliers »	24
Figure 14 : Implantation des détecteurs ponctuels (points rouges), zone « magasin 1 et 2 ».....	24
Figure 15 : Présentation des étapes de calculs	25
Figure 16 : Exemple de simulation sous FDS de bâtiments industriels	26
Figure 17 : Exemples de calculs SAFIR	27
Figure 18 : Emplacements retenus pour les départs de feu.....	33
Figure 19 : Eléments verriers en façade des magasins	34
Figure 20 : SC1 : Coefficient d'extinction, plan situé à 2 m au-dessus du sol	37
Figure 21 : Localisation des mezzanines.....	38
Figure 22 : SC2 : Coefficient d'extinction, plan situé à 2 m au-dessus du sol	39
Figure 23 : SC3 : Coefficient d'extinction, plan situé à 2 m au-dessus du sol	41
Figure 24 : SC4 : Coefficient d'extinction, plan situé à 2 m au-dessus du sol	42
Figure 25 : SC5 : Coefficient d'extinction, plan situé à 2 m au-dessus du sol	44
Figure 26 : Réponse thermomécanique de la file courante des pannes.....	47
Figure 27 : Déplacement des points situés à mi-travée des pannes – feu ISO	48
Figure 28 : Modèle portique retenu.....	49
Figure 29 : Déformation visuelle à t = 560 s – feu ISO.....	50
Figure 30 : Portique étudié	51
Figure 31 : Conditions aux limites – modèle portique singulier	51
Figure 32 : Déformation visuelle du portique sous le feu ISO à t=788s (exagérée : x5)	52
Figure 33 : Déplacement selon Z du nœud 7382 – feu ISO.....	52
Figure 34 : Déplacement selon Y des nœuds 10653 et 5274 – feu ISO	53
Figure 35 : Repérage d'un poteau central avec sa zone de charge mécanique.....	54
Figure 36 : Conditions aux limites – poteaux HEA 240 sous feu ISO.....	54
Figure 37 : Déformation visuelle du poteau à différents instants – poteau HEA 240 – feu ISO	55
Figure 38 : Déplacement selon Y du point 34 – feu ISO	55
Figure 39 : Repérage d'un poteau de rive IPE600 et sa zone de charge mécanique.....	56
Figure 40 : Conditions aux limites – poteaux IPE 600 sous feu ISO	56
Figure 41 : Déformation visuelle du poteau à différents instants – poteau IPE 600 – feu ISO	57
Figure 42 : Déplacement selon X du point 2 – feu ISO	57
Figure 43 : Départ de feu du scénario SC1.....	60
Figure 44 : Puissance de l'incendie - SC1	61
Figure 45 : Profils de températures d'une coupe traversant le foyer - SC1	61
Figure 46 : Températures de gaz au niveau de la poutre PRS – SC1.....	62
Figure 47 : Portique étudié dans le cas du scénario SC1	63
Figure 48 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC1.....	64

Figure 49 : Action thermique sur la structure	65
Figure 50 : Conditions aux limites - modèle portique magasins 1 et 2 - SC1	65
Figure 51 : Déformation visuelle du portique principal à 1046 s (exagérée : x20) - SC1	66
Figure 52 : Déplacement selon Z du nœud 7382 – SC1	67
Figure 53 : Déplacement selon Y des nœuds 10653 et 5274 - SC1	67
Figure 54 : Départ de feu du scénario SC2.....	69
Figure 55 : Puissance de l'incendie - SC2	69
Figure 56 : File de structure retenue pour l'analyse thermomécanique – SC2	70
Figure 57 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC2.....	71
Figure 58 : Action thermique sur le portique principal (file 7) - SC2	71
Figure 59 : Déformation visuelle du portique (exagéré de 5 fois) – SC2	72
Figure 60 : Déplacement des nœuds indiqués dans la figure 59 – SC2.....	74
Figure 61 : Départ de feu du scénario SC3.....	75
Figure 62 : Puissance de l'incendie – SC3	76
Figure 63 : Profils de températures selon une coupe transversale - SC3	76
Figure 64 : Profil de températures selon une coupe longitudinale - SC3.....	76
Figure 65 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC3.....	77
Figure 66 : Action thermique sur le portique principal (file 4) – SC3	77
Figure 67 : Modèle du portique courant file 4 - SC3.....	78
Figure 68 : Réponse structurale du portique à t=1127 s (exagéré : x3) - SC3.....	79
Figure 69 : Déplacement selon Z du nœud 5942 – SC3.....	79
Figure 70 : Déplacement selon Y des nœuds 844 et 8077- SC3	80
Figure 71 : Départ de feu du scénario SC4.....	81
Figure 72 : Puissance de l'incendie – SC4	82
Figure 73 : Profil de températures selon une coupe transversale – SC4	82
Figure 74 : Profil de température selon une coupe longitudinale – SC4.....	82
Figure 75 : Identification des zones de contraintes thermiques – SC4.....	83
Figure 76 : Action thermique sur le portique principal (file 4) – SC4	83
Figure 77 : Réponse structurale du portique à 40 minutes (exagéré : x10) – SC4	84
Figure 78 : Déplacement selon Z du nœud 6757 – SC4.....	84
Figure 79 : Déplacement selon Y des nœuds 11067 et 800 – SC4	85
Figure 80 : Analyse de la ruine des pannes – SC4	86
Figure 81 : Départ de feu du scénario SC5.....	87
Figure 82 : Puissance de l'incendie – SC5	88
Figure 83 : File de structure retenue pour l'analyse thermomécanique – SC5	88
Figure 84 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC5.....	89
Figure 85 : Action thermique sur le portique principal (file 6) – SC5	89
Figure 86 : Réponse structurale du portique à différents instant (exagéré : x5) - SC5	90
Figure 87 : Déplacement selon X des nœuds situés dans l'âme de la poutre PRS – SC5 ...	91
Figure 88 : Déplacement selon Y des nœuds 3663 et 8936 – SC5	91
Figure 89 : Déplacement selon Z du nœud 4174 – SC5.....	92

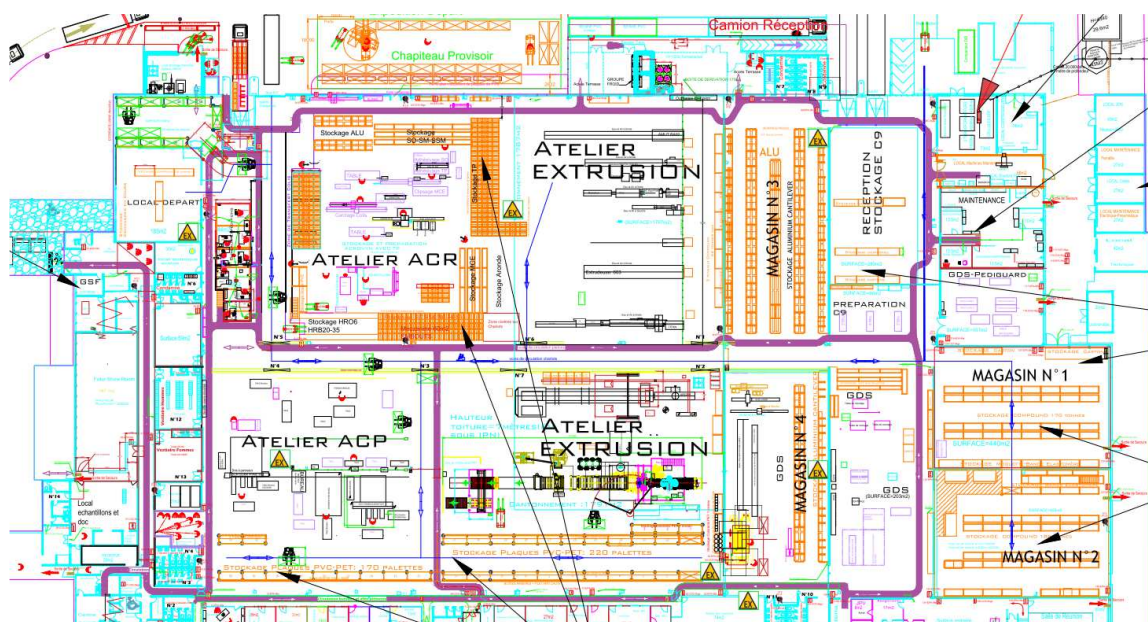
1 CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

Cette étude concerne l'évaluation du comportement au feu d'une structure métallique d'un bâtiment existant situé à Pacy-sur-Eure (27). L'étude demandée s'inscrit dans le cadre de la constitution d'un dossier ICPE.

Une vue aérienne d'ensemble du site et un plan d'agencement intérieur du bâtiment sont présentés ci-après.



Vue aérienne



Agencement intérieur de l'installation

Figure 1 : Présentation de l'installation en objet de l'étude

L'installation appartient aux rubriques 1510 (Enregistrement) et 2661 (Enregistrement) de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Compte tenu de la hauteur du bâtiment (environ 7,5 m), l'étude d'ingénierie demandée vise à répondre aux exigences réglementaires ICPE suivantes :

- *Les dispositions constructives visent à ce que la cinétique d'incendie soit compatible avec l'intervention des services de secours et la protection de l'environnement. Elles visent notamment à ce que la ruine d'un élément de structure (murs, toiture, poteaux, poutres par exemple) suite à un sinistre n'entraîne pas la ruine en chaîne de la structure du bâtiment, notamment les cellules de stockage avoisinantes, ni de leurs dispositifs de recoupement, et ne conduise pas à l'effondrement de la structure vers l'extérieur de la cellule en feu ;*
- *L'ensemble de la structure est à minima R 15, sauf, pour les zones de stockages automatisés.*

L'exploitant ne dispose pas à ce jour d'éléments permettant de démontrer que ces exigences réglementaires vis-à-vis de la tenue au feu de la structure métallique et ses modes de ruine en cas d'incendie sont satisfaites.

Dans ce contexte, le CNPP est missionné par la société CS-France pour réaliser une étude d'ingénierie ayant pour objectif de :

- Vérifier si la structure métallique du bâtiment est à minima R15 sous feu normalisé (courbe ISO 834) ;
- Vérifier si le bâtiment avec son système de sécurité incendie (désenfumage, protection incendie, dispositions constructives, etc.) assure un niveau de sécurité adéquat tel qu'en cas d'incendie réel se déclarant au sein du bâtiment, la cinétique de l'incendie, la tenue au feu et le mode de ruine de l'ossature du bâtiment (zones ICPE) sont compatibles avec l'évacuation des personnes et l'intervention des secours.

Ce document est le rapport d'étude visant à présenter, les données d'entrée (section §2), la méthodologie (section §3), les hypothèses retenues (sections §4 et 5) ainsi que les résultats des calculs (sections §6-§8) vis-à-vis des objectifs de sécurité identifiés.

La conclusion générale intégrant les avis techniques de CNPP est présentée dans la section §9.

2 ETUDE DU DOSSIER ET DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Cette section consiste à détailler les caractéristiques de l'ouvrage, à définir le périmètre en objet de l'étude, à identifier les risques incendie spécifiques aux conditions d'exploitation prévues, ainsi que les dispositions relatives à la mise en sécurité incendie du périmètre et susceptibles d'impacter la mise en données ultérieure de l'étude.

2.1 Description générale de l'ouvrage étudié

L'ouvrage en objet de l'étude est composé principalement des zones suivantes :

- **Magasins 1 et 2** contenant les produits initiaux : les surfaces au sol de ces deux magasins sont respectivement de 440 m² et de 455 m². Ces deux magasins sont communicants par une ouverture (sans porte) d'environ 2,5 m de largeur et 3 m de hauteur. Le stockage dans ces deux magasins s'effectue en rack avec une hauteur maximale de l'ordre de 5,5 m.



Figure 2 : Magasins 1 et 2

- Zone de **réception de stockage C9** : cette zone dispose de stockages provisoires. Lors des visites sur site effectuées par le CNPP (23/03 et 07/04/2022), un stockage en rack pouvant atteindre une hauteur maximale de l'ordre de 5,5 m a été constaté. Hormis le stockage en rack, des palettes superposées l'une sur l'autre représentent également une quantité importante de matières stockées.





Figure 3 : Réception stockage C9

- Zone de **préparation C9** : cette zone présente une charge calorifique relativement faible comparée à la zone de réception stockage C9.

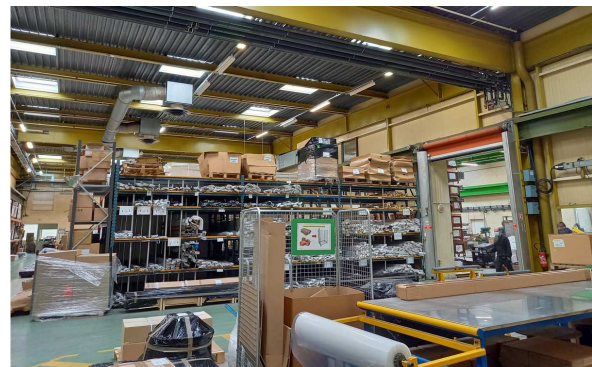


Figure 4 : Préparation C9

- **Magasins 3 et 4** : les activités et le stockage dans ces magasins concernent principalement l'aluminium. La charge calorifique dans ces magasins est donc faible comparativement à celle présente dans les magasins 1-2 et dans la zone C9.



Figure 5 : Magasins 3 et 4

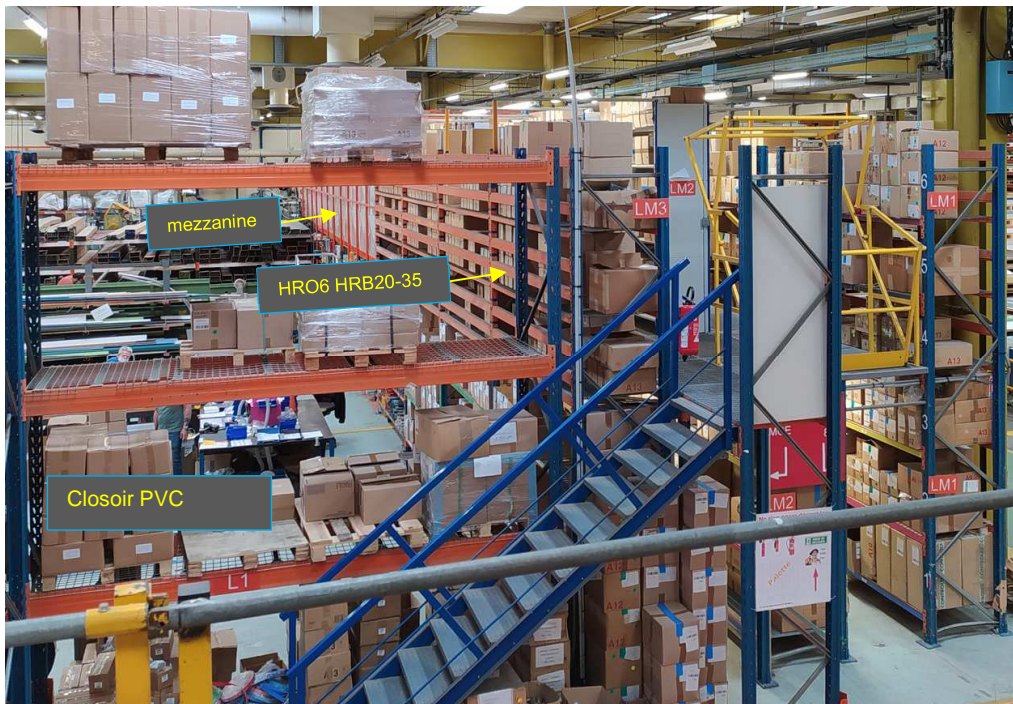
- **Ateliers** : cette zone consiste en un grand hall composé de plusieurs ateliers à savoir atelier ACP, ACR, Extrusion. Elle dispose également de stockages importants en quantité et en hauteur tels que : stockage en rack des plaques PVC-PET vers les bureaux, stockage SCR50/80-HRB4 dans une mezzanine de 60 m² située au centre des ateliers, stockage TP, stockage colis en partance, etc.)



Stockage plaques PVC-PET (5 m de hauteur)



Atelier Extrusion



Mezzanine (stockage SCR50/80-HRB4, stockage HRO6 HRB20-35, et stockage closoir PVC)



Palettes et Plaques de PVC posées à proximité d'un poteau

Figure 6 : Ateliers

- **Local départ :** cette zone, d'une surface de 185 m², contient du stockage provisoire des commandes en cours et des cartons de plaques roulées.

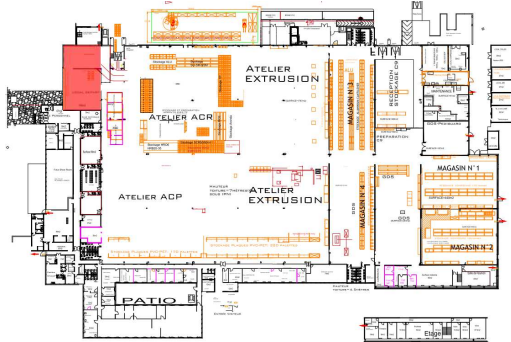
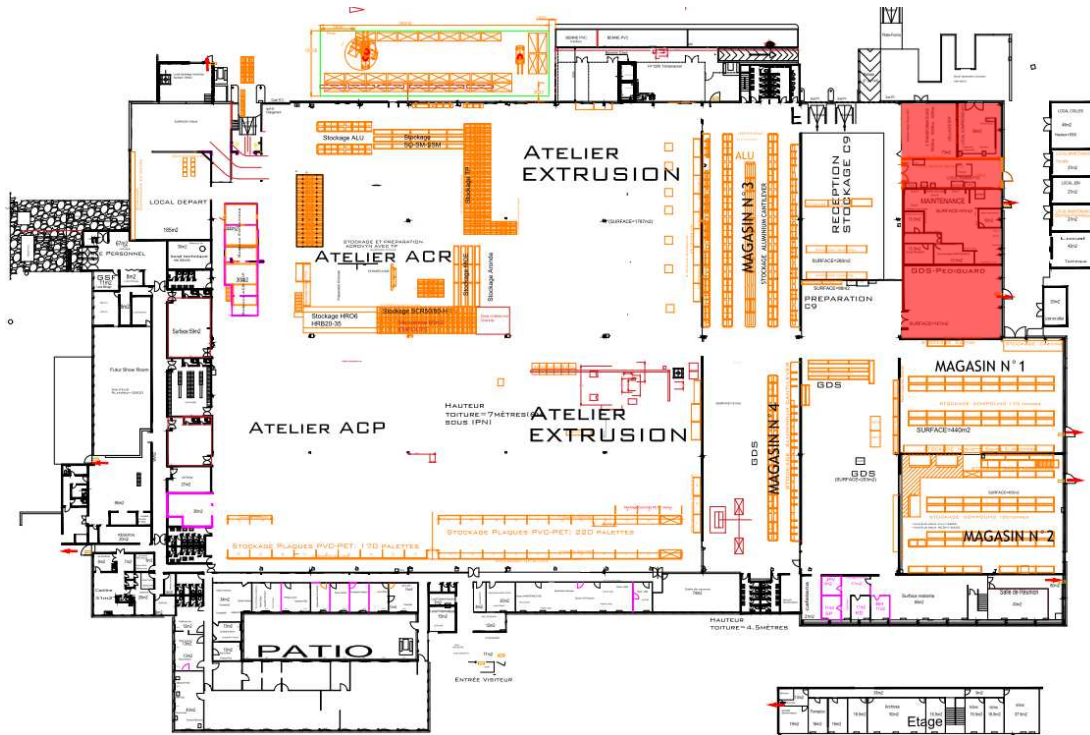
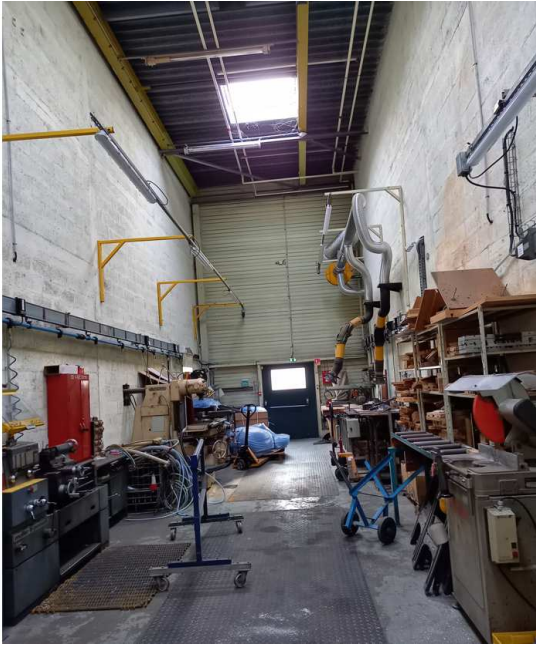


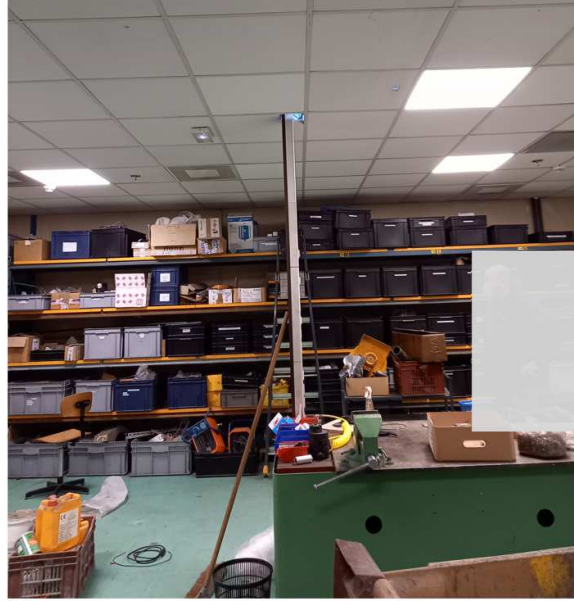
Figure 7 : Local départ

- **Locaux machines maintenance et annexes :** ces locaux contiennent d'une quantité de stockage / matière combustible relativement faible comparée aux magasins et aux ateliers.





Local soudure PVC



Local de maintenance



GDS-Pediguard

Figure 8 : Locaux machines maintenance et annexes

- **Bureaux et autres** : ces zones sont hors périmètre de la présente étude

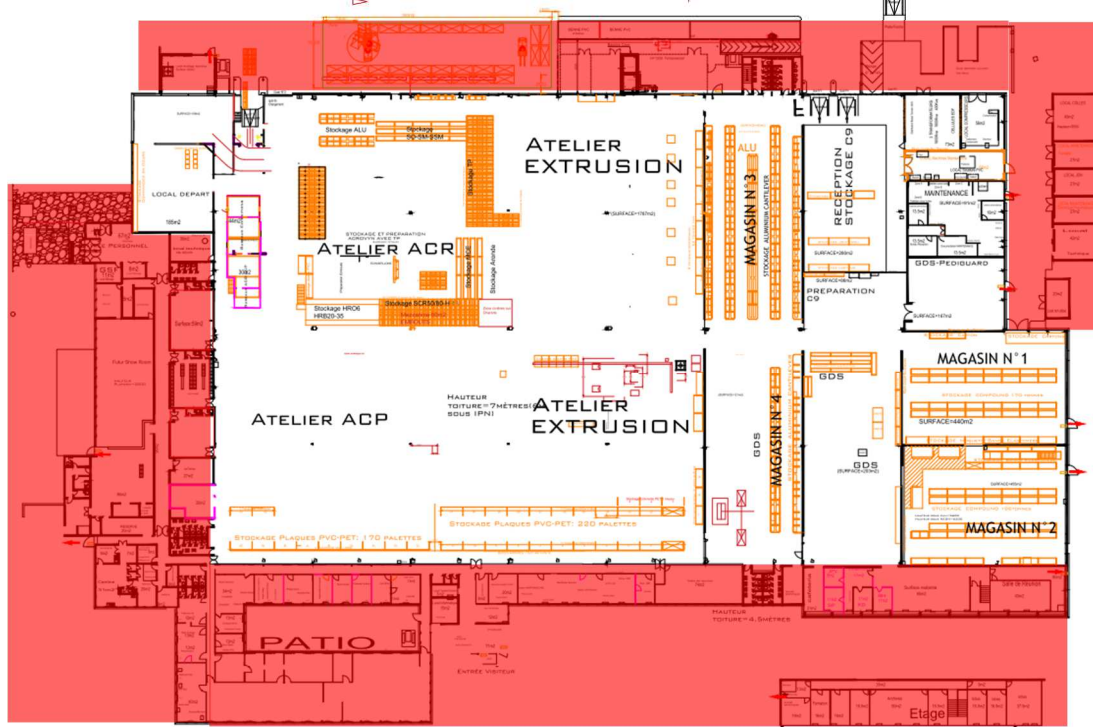
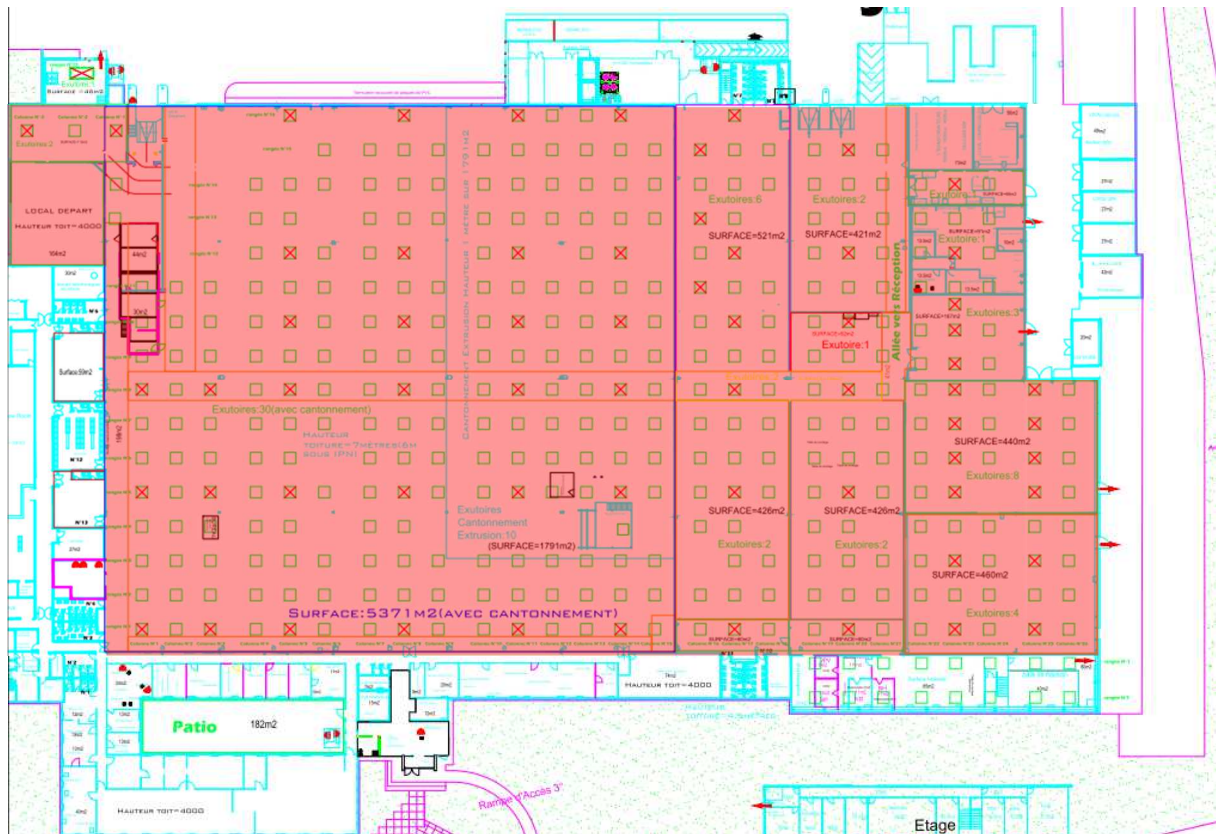


Figure 9 : Bureaux et autres

2.2 Périmètre de l'étude

Compte tenu des risques inhérents aux activités ICPE présentés dans la section précédente (§2.1), le périmètre de l'étude consiste en la structure des zones ICPE repérées sur la figure suivante.



Les locaux annexes tels que bureaux, vestiaires, WC, ne font pas l'objet de la présente étude.

2.3 Dispositions constructives

Selon le plan dwg fourni par le demandeur de l'étude, les murs coupe-feu 2 heures sont repérés sur la figure suivante (ligne cyan).

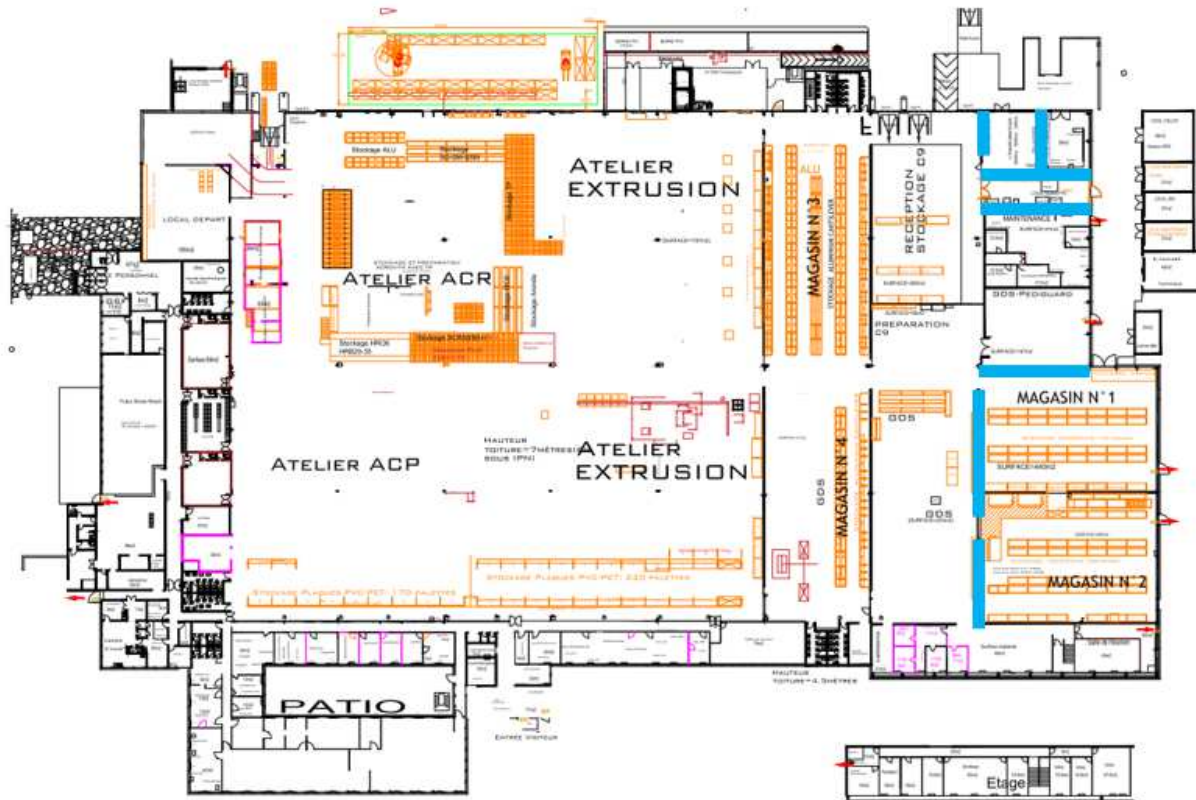


Figure 10 : Repérage des murs coupe-feu (2h)

L'ensemble des murs périphériques ainsi que les murs séparatifs entre les locaux hormis ceux repérés sur la figure ci-avant ne disposent pas de caractère coupe-feu spécifique.

Hormis les magasins 1 et 2, et les locaux transformateurs et compresseurs qui disposent de murs et de portes coupe-feu, l'ensemble des autres locaux / zones sont considérés communicants (ouverture de type rideaux ou portes sectionnelles).

2.4 Description de la structure métallique du bâtiment

La structure porteuse du bâtiment en objet de l'étude est une ossature métallique multi-nefs (avec une pente de toiture de 1,1%) composée de poteaux IPE / HEA, de poutres PRS (Profils Reconstitués Soudés) et des pannes IPE.

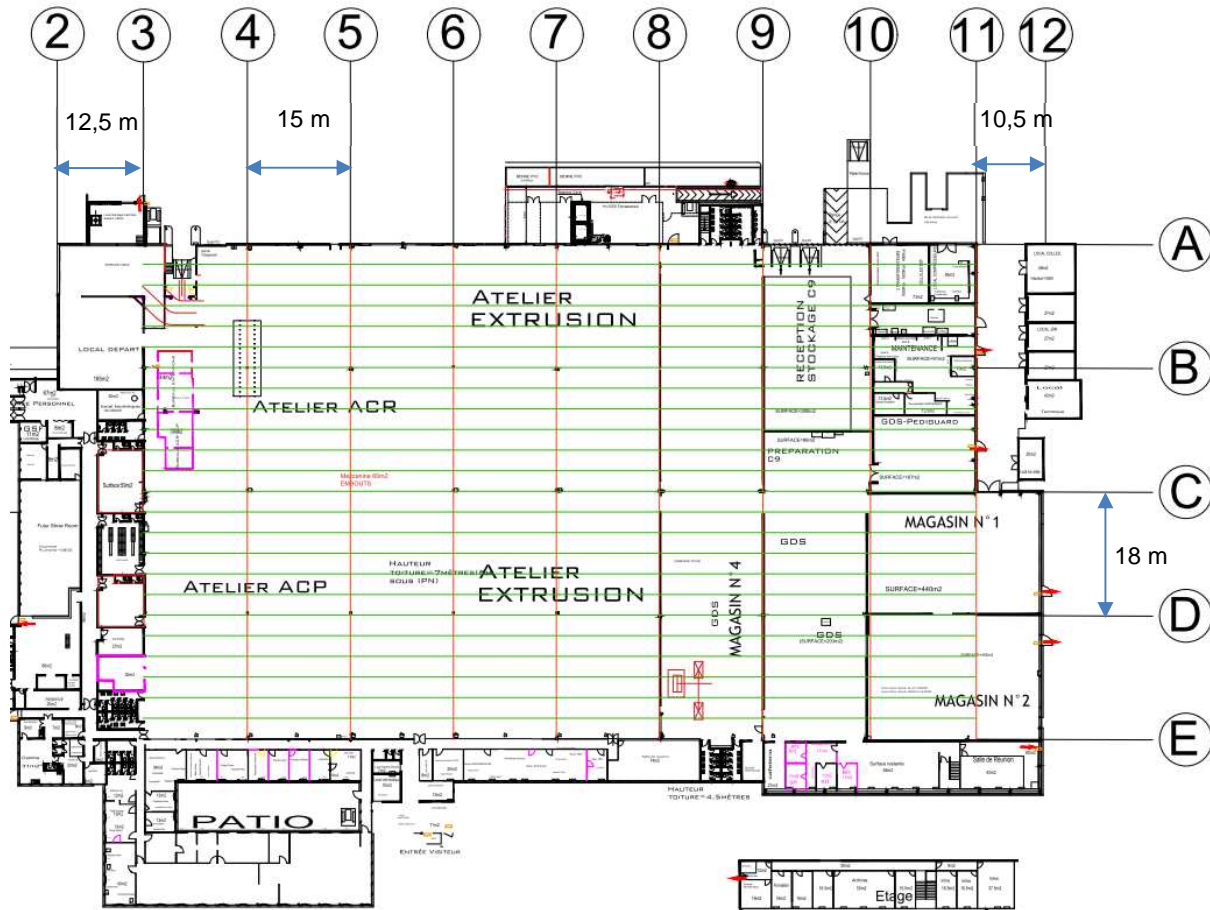


Figure 11 : Schéma de l'ossature métallique du bâtiment

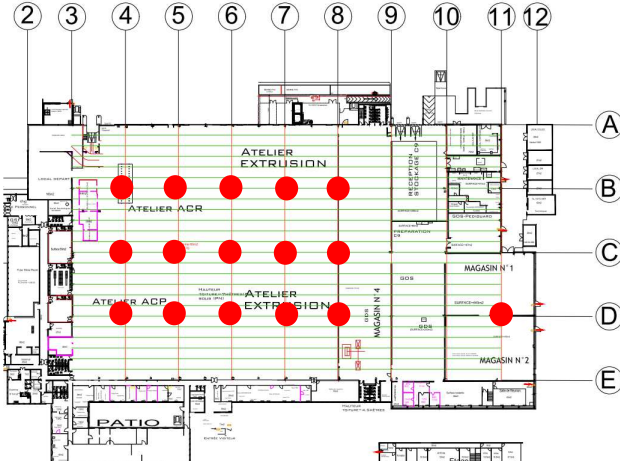
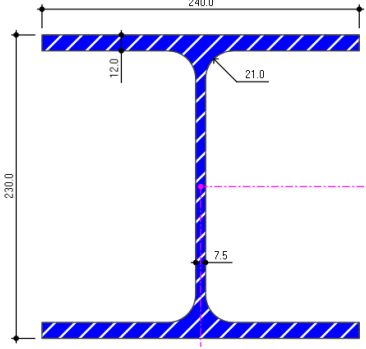
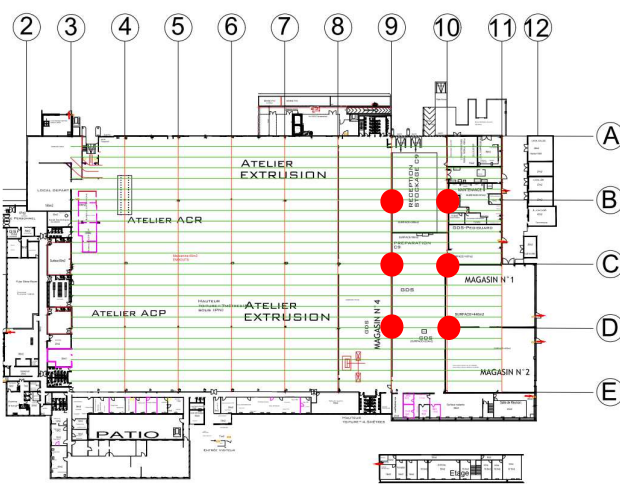
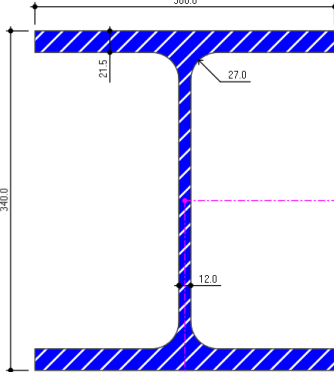
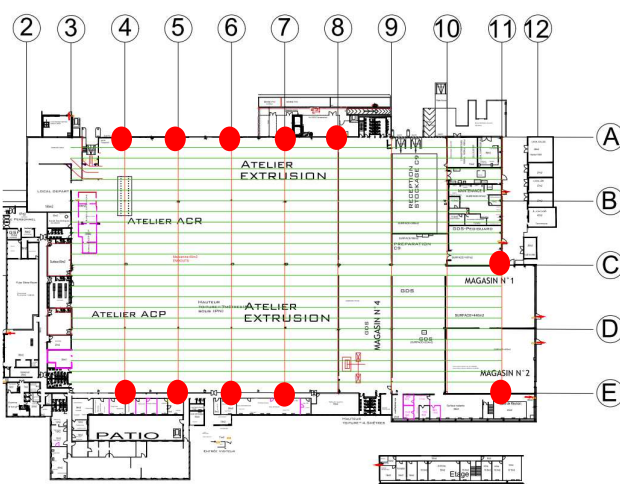
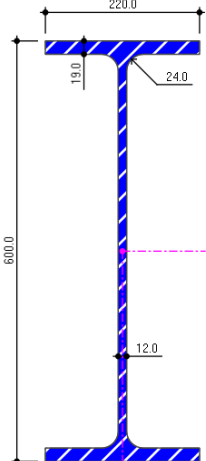
La hauteur sous toiture est de l'ordre de 7,3 mètres au faîtage (files B et D) 7,1 mètres sur sablière (files A, C et E).

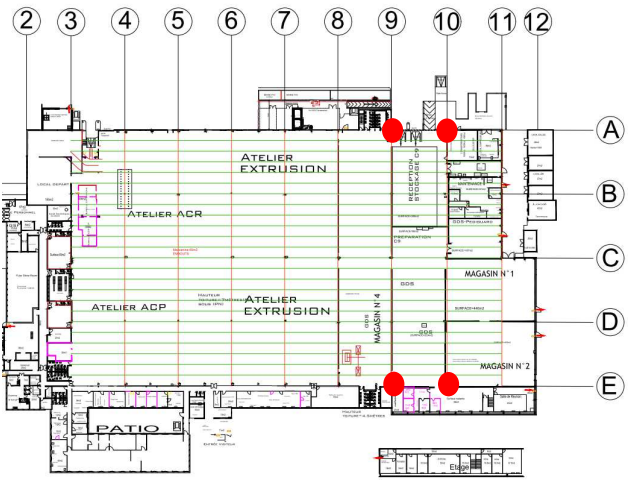
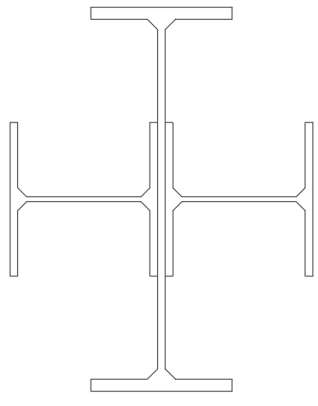

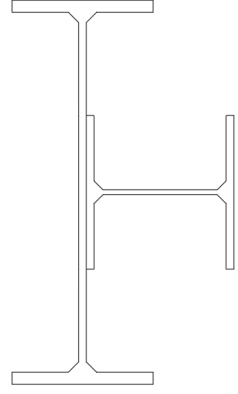

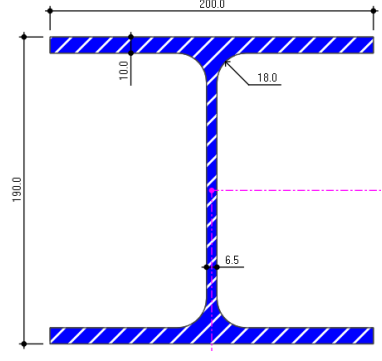
L'entraxe des files courantes (de 3 à 11) est de 15 mètres tandis qu'elle est de 18 mètres pour les files A, B, C, D et E.

Les entraxes entre les files 2-3 et 11-12 sont respectivement de l'ordre de 12,5 m et de 10,5 m.

L'entraxe des pannes est de 3 mètres (lignes vertes sur la figure 11).

L'ensemble des caractéristiques géométriques des éléments composant la structure métallique du bâtiment en objet de l'étude est récapitulé dans les tableaux ci-après.

Eléments et localisations	Caractéristiques géométriques
<p style="text-align: center;">Poteaux type 1</p> 	 <p>HEA 240, $A = 76,8 \text{ cm}^2$ Poids propre : 60,3 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 123 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 4 faces</p>
<p style="text-align: center;">Poteaux type 2</p> 	 <p>HEB 340 : $A = 170,9 \text{ cm}^2$ Poids propre : 135 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 58 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>
<p style="text-align: center;">Poteaux type 3</p> 	 <p>IPE 600, $A = 156 \text{ cm}^2$ Poids propre : 122 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 91 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>

<p style="text-align: center;">Poteaux type 4</p> 	 <p>IPE 600 + 2 HEA180 $A = 156 + 2 \times 45,3 = 266,6 \text{ cm}^2$ Poids propre : $122 + 2 \times 35,5 = 193 \text{ kg/m}$ Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 59 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>
<p style="text-align: center;">Poteaux type 5</p> 	 <p>IPE 600 + HEA180 $A = 156 + 45,3 = 201,3 \text{ cm}^2$ Poids propre : $122 + 35,5 = 157,5 \text{ kg/m}$ Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 76 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>
<p style="text-align: center;">Poteaux type 6</p> 	 <p>HEA 200 $A = 53,8 \text{ cm}^2$ Poids propre : $42,3 \text{ kg/m}$ Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 108 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>


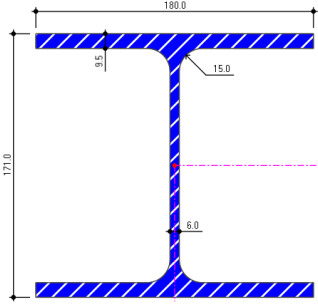

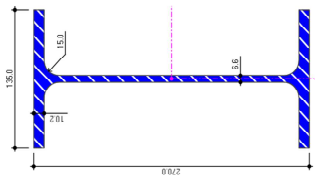
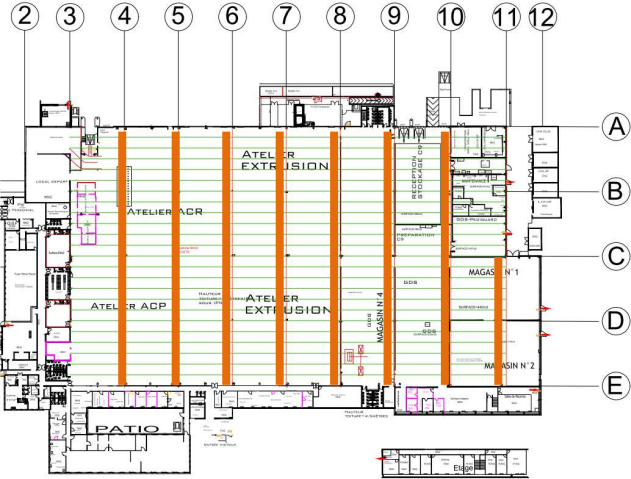
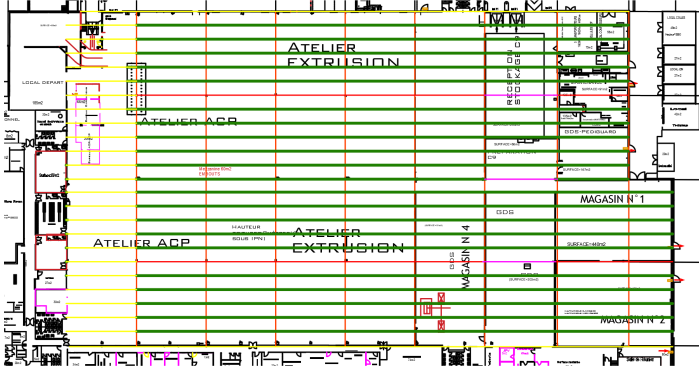
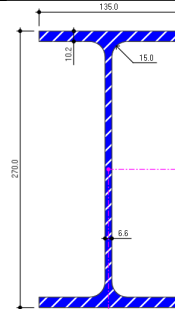
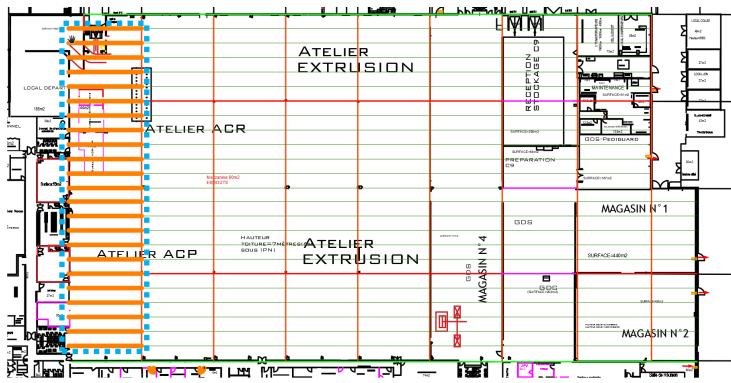
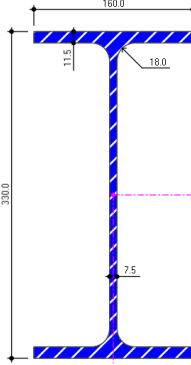
<p style="text-align: center;">Poteaux type 7</p> 	 <p>HEA 180 $A = 45,3 \text{ cm}^2$ Poids propre : 35,5 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 115 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>
<p style="text-align: center;">Poteaux type 8</p> 	 <p>IPE 270 $A = 45,9 \text{ cm}^2$ Poids propre : 36,1 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 117 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 3 faces</p>

Tableau 1 : Profilés des poteaux issus des plans d'archive (n°2A et 2^{bis}C) fournis par le demandeur de l'étude

Eléments et localisations	Caractéristiques géométriques
<p style="text-align: center; color: orange;">Poutres courantes (files 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11)</p>  <p>Le premier raidisseur et les bracons anti-déversement sont de 3 m depuis un appui. Les autres raidisseurs sont de 6 m depuis le premier.</p>	<p>PRS en I partie courante :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hauteur 800 mm ; • Largeur 250 mm ; • Epaisseur âme 6 mm ; • Epaisseur semelles 12 mm <p>$A = 106,56 \text{ cm}^2$ Poids propre : 84 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 197 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 4 faces</p> <p>A noter que la section des poutres PRS à proximité des appuis (assemblage poutres-poteaux, 3 m sur chaque côté des poteaux) est plus épaisse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epaisseur âme 8 mm ; • Epaisseur semelles 20 mm
<p style="text-align: center; color: green;">Pannes courantes (type 1)</p> 	 <p>IPE270 $A = 45,9 \text{ cm}^2$ Poids propre : 36,1 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 176 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 4 faces</p>
<p style="text-align: center; color: brown;">Pannes type 2 (type 2) : les pannes entre files 3 et 4</p> 	 <p>IPE 330 $A = 62,6 \text{ cm}^2$ Poids propre : 49,1 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 157 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 4 faces</p>

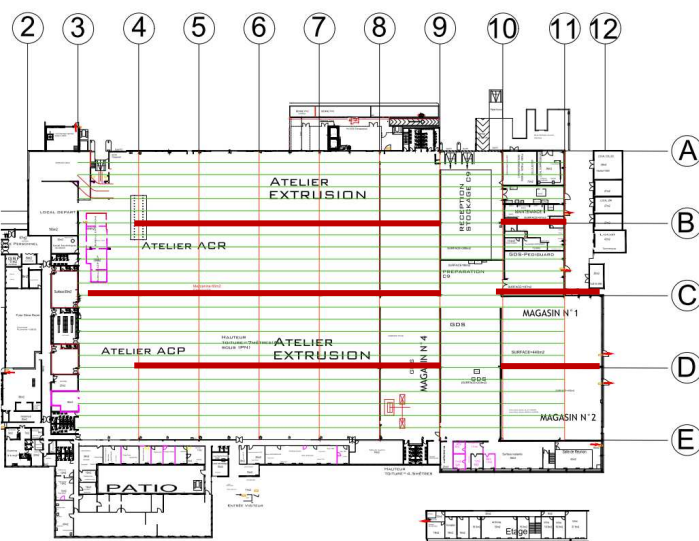
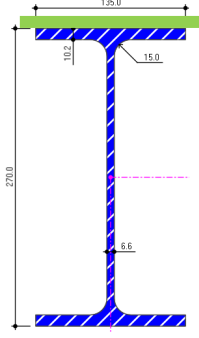


<p style="text-align: center; color: red;">Pannes faitières (type 3) : files B, C et D</p> 	 <p>IPE270 renforcé par un plat 200x6 soudé sur la semelle supérieure $A = 57,9 \text{ cm}^2$ Poids propre : 45.5 kg/m Massivité $(A_m/A_v)_{\text{box}} : 142 \text{ m}^{-1}$ Exposition au feu : 4 faces</p>
<p style="text-align: center; color: blue;">Pannes sablières (type 4) : file A et E</p> 	<p>IPE240 + HEA180</p> <p>$A = 39,1 + 45,3 = 84,40 \text{ cm}^2$ Poids propre : 66,3 kg/m Exposition au feu : 4 faces</p>
<p style="text-align: center; color: purple;">Pannes singulières (type 5) : file B et D</p> 	<p>IPE270 + PRS en I</p> <p>$A = 45,9 + 106,56 = 152,46 \text{ cm}^2$ Poids propre : 36,1 + 84 = 120,1 kg/m Exposition au feu : 4 faces</p>

Tableau 2 : Profilés des poutres et pannes

2.5 Dispositions de mise en sécurité incendie

2.5.1 Système de désenfumage

Le désenfumage est assuré par 65 exutoires répartis sur la surface du bâtiment. La surface géométrique unitaire des exutoires est de 1,4 m par 1,4 m. Les exutoires sont à activation automatique sur fusible thermique, actuellement à 68 °C ou à 93 °C.

Les exutoires sont localisés sur la figure suivante.



Figure 12 : Localisation des exutoires

Les amenées d'air du système de désenfumage sont assurées par les portes donnant sur l'extérieur.

La zone atelier est équipée d'un écran de cantonnement localisé sur la figure précédente (traits rouges).

2.5.2 Système de détection incendie

L'ensemble des zones étudiées sont équipées d'un système de détection incendie. Les détecteurs sont de type linéaire dans les zones « ateliers », « magasin 3 et 4 » et « préparation C9 », et de type ponctuel dans les autres zones.

La localisation des détecteurs, relevés dans les zones spécifiquement simulées dans l'étude (« ateliers » et « magasins 1 et 2 »), sont présentés sur les figures suivantes.

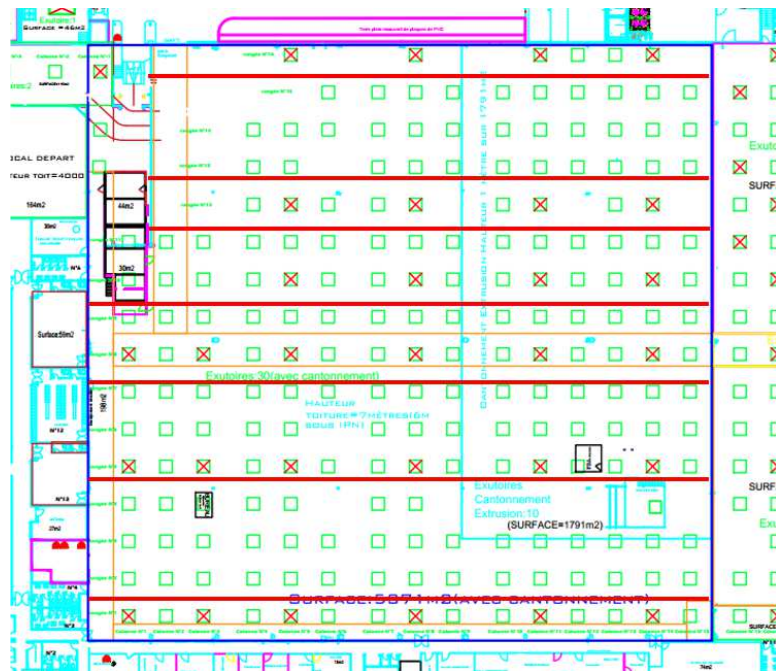


Figure 13 : Implantation des détecteurs linéaires (traits rouges), zone « ateliers »

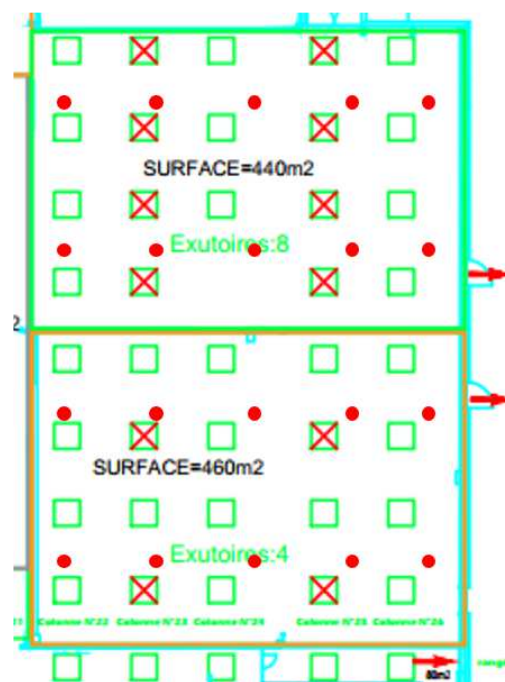


Figure 14 : Implantation des détecteurs ponctuels (points rouges), zone « magasin 1 et 2 »

2.5.3 Système de protection incendie

L'ensemble des zones sont équipées d'un système sprinkler. Les têtes sont espacées d'environ 3 m sur chaque ligne et la température d'activation des éléments thermosensibles est de 68 °C.

3 METHODOLOGIE DE L'ETUDE ET OUTILS DE CALCULS

3.1 Généralité

L'étude du comportement au feu de l'ossature métallique en objet de l'étude sera réalisée par des analyses thermomécaniques qui reposent sur :

- ✓ Les règles de calculs Eurocodes 0, 1 et 3 [1, 2, 3] ;
- ✓ La méthode de calculs avancés (modèles par éléments finis). L'intérêt de cette approche demeure en la prise en compte de la configuration réelle des éléments de structure, notamment en termes de charges mécaniques, de caractéristiques thermomécaniques des matériaux (acier) ainsi que des dimensions des sections et de la structure.

Les calculs consistent en trois étapes principales :

- ✓ Détermination des actions thermiques : dans le cas présent, les actions thermiques seront issues d'une part des simulations des scénarios incendie (feu réel) à l'aide du code de calcul FDS (cf. voir §3.2) et d'autre part de la courbe de feu normalisé ISO 834 [4] ;
- ✓ Calcul de l'échauffement des éléments de structure : cette étape permet de déterminer l'évolution spatiale et temporelle des températures dans les éléments de structure ;
- ✓ Analyse mécanique prenant en compte l'agression thermique des éléments de structure déterminée dans l'étape précédente : cette analyse de réponse structurale permet de déterminer la tenue au feu de la structure ainsi que son mode de ruine. La modélisation thermomécanique sera effectuée à l'aide du code commercial à éléments finis SAFIR (cf. voir § 3.3).

Ces deux étapes sont récapitulées dans la figure suivante (figure pour titre d'exemple).

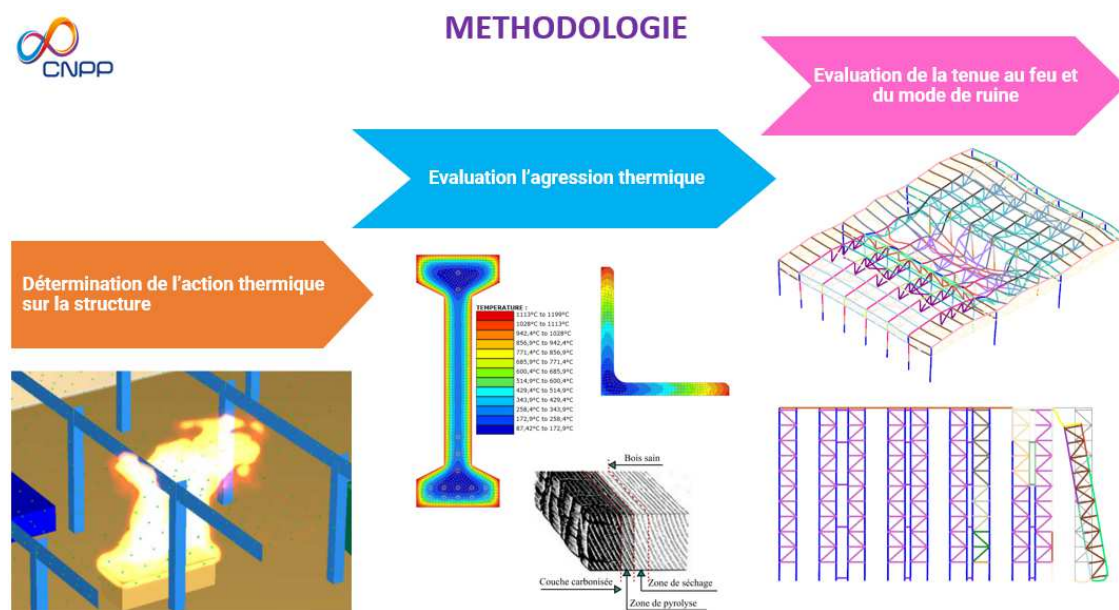


Figure 15 : Présentation des étapes de calculs

3.2 Code de calcul FDS

Le code FDS (Fire Dynamic Simulator, version 6.6.0) développé au NIST est largement reconnu et utilisé en modélisation des phénomènes d'incendie, et plus particulièrement dans le cadre d'études d'Ingénierie de la Sécurité Incendie (ISI). Il s'agit d'un code à champs permettant une modélisation physique en trois dimensions des phénomènes liés au développement d'un feu et de ses effluents. FDS est largement utilisé dans le cadre d'études d'ingénierie du désenfumage en France et dans le monde. A ce titre ce code sera mis en œuvre dans la présente étude. Une présentation sommaire des hypothèses intrinsèques au code de calcul FDS est reportée en Annexe 2.

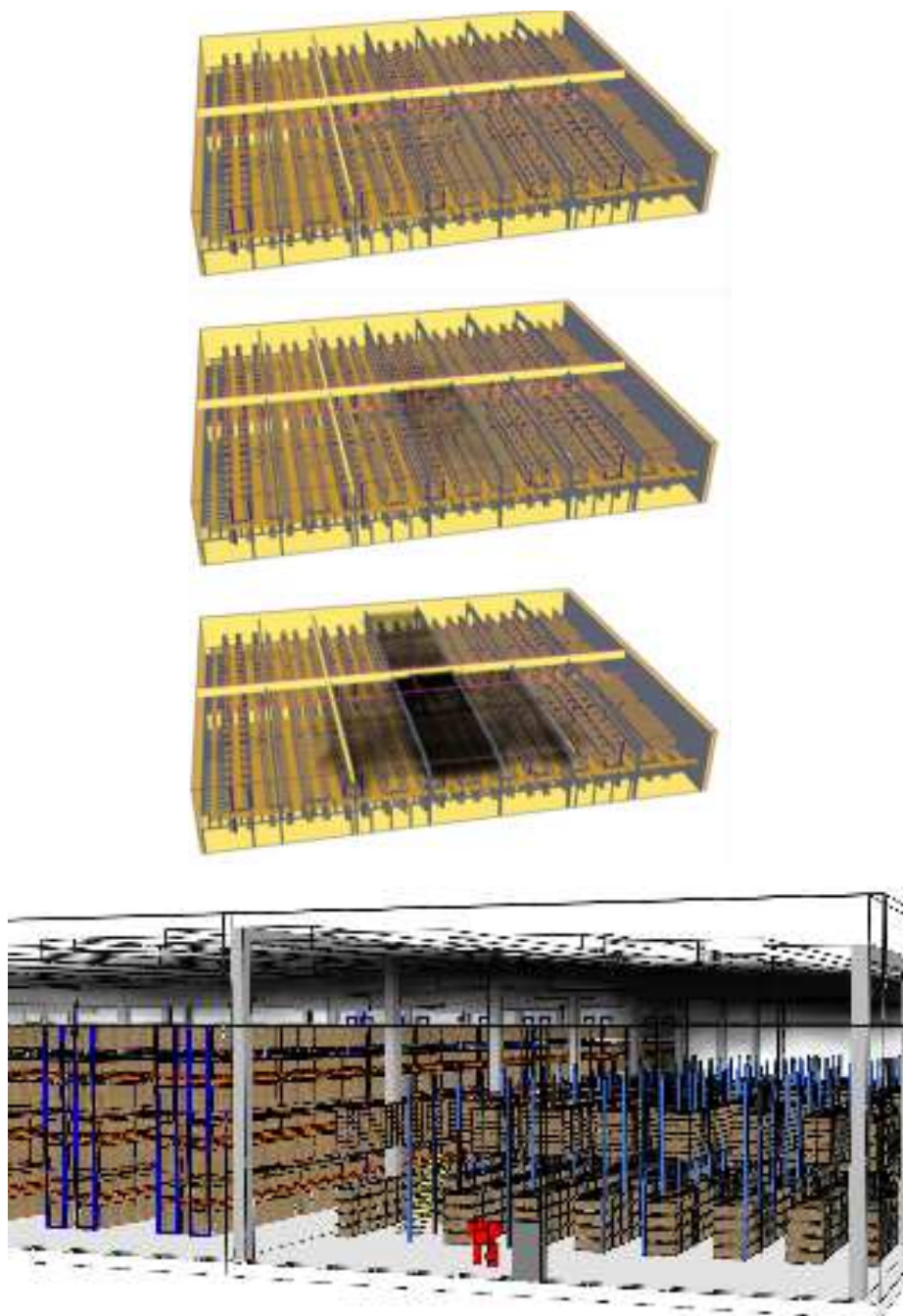


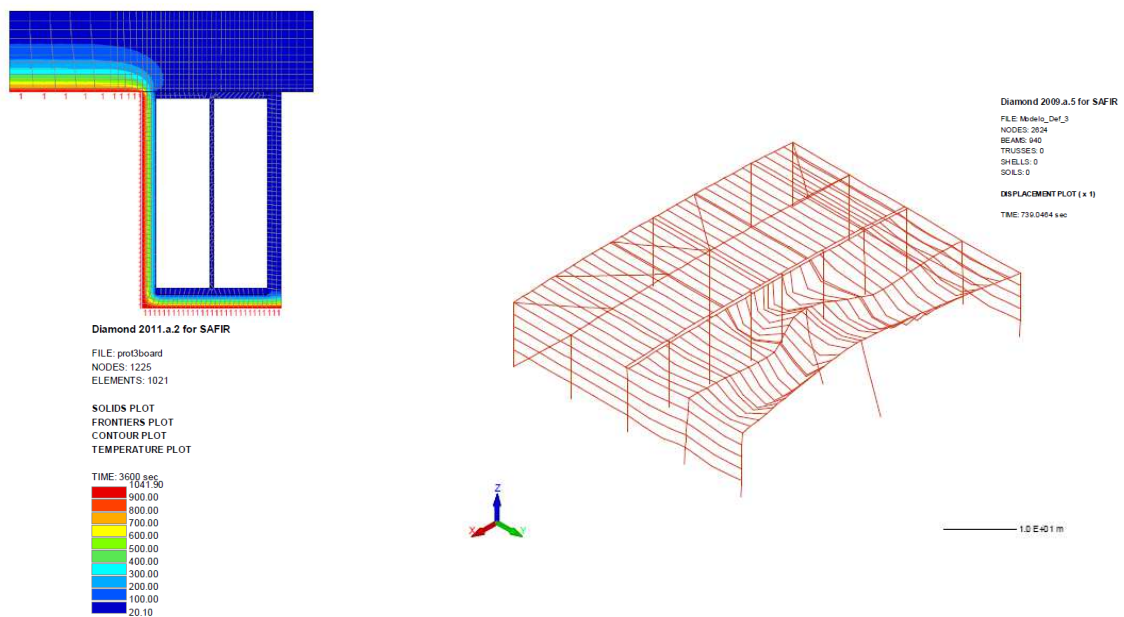
Figure 16 : Exemple de simulation sous FDS de bâtiments industriels

3.3 Code de calcul SAFIR

SAFIR est un outil de simulation numérique, basé sur la méthode des éléments finis, développé à l'Université de Liège et permettant de modéliser le comportement mécanique au feu des structures en 2D ainsi qu'en 3D.

À partir des températures de gaz récupérées après une simulation FDS, SAFIR va d'abord calculer l'évolution des températures dans la structure. Le comportement mécanique de la structure est ensuite calculé sur la base de sa géométrie, de ses conditions d'appui, des charges qu'elle doit supporter, de la résistance des matériaux, en tenant compte de l'échauffement progressif des éléments de structure.

SAFIR permet d'analyser les performances thermomécaniques de matériaux tels que l'acier, le béton armé et les sections mixtes acier-béton. D'autres matériaux peuvent également être analysés (modélisation de protections thermiques, d'isolants, etc.) à condition que leurs propriétés physiques à des températures élevées soient connues.



Calcul de l'évolution de la température d'une poutre en acier protégée et chauffée d'un seul côté

Calcul du comportement mécanique d'une structure en 3D soumise au feu

Figure 17 : Exemples de calculs SAFIR

La version utilisée dans le cadre de la présente étude est SAFIR2019.b.1

4 NOTE D'HYPOTHESES GENERALES

4.1 Hypothèses pour le calcul feu/fumées (simulations FDS)

Les hypothèses suivantes sont considérées dans l'étude :

- ◇ De manière pénalisante, on suppose dans les simulations que le stockage est à sa capacité maximale ;
- ◇ Les exutoires sont configurés dans les simulations pour une ouverture automatique par thermofusible taré à 93 °C (hypothèse pénalisante prenant en compte la modification éventuelle des thermofusibles actuellement tarés à 68 °C) ;
- ◇ De manière pénalisante, seule la surface utile est considérée comme passage des fumées au travers des exutoires dans les simulations. En absence de données, il est considéré que la surface utile de chaque exutoire est de 0,5 fois sa surface géométrique ;
- ◇ L'effet de l'aspersion d'eau (notamment par le système sprinkleur) ne sera pas considéré dans l'étude. Cependant, une estimation du temps de déclenchement du système sprinkleur sera calculée, en particulier pour comparer ce temps au temps caractéristique de ruine de la structure ;
- ◇ Le bâtiment est équipé de systèmes CVC (chauffage, ventilation). L'objectif principal de l'étude étant l'évaluation du comportement de la structure en situation d'incendie, ces dispositifs sont considérés à l'arrêt (hypothèse pénalisante car ceux-ci peuvent brasser la couche de fumée et réduire sa température) ;
- ◇ L'alarme générale est déclenchée sans temporisation sur détection incendie ;
- ◇ Le volume considéré comme étant accessible aux fumées est l'ensemble de la cellule étudiée. Les locaux adjacents séparés physiquement par des murs, vitrages ou des ouvrages séparatifs coupe-feu ne seront pas considérés dans la modélisation ;
- ◇ Une des limitations actuelles du code de calcul FDS est liée à la représentation des obstacles, lesquels sont discrétisés par des cellules élémentaires cubiques. De ce fait les éléments obliques ou courbes ne peuvent être restitués fidèlement (modélisation 'en briques').

4.2 Hypothèses sur les calculs de structure

4.2.1 Hypothèses retenues pour le calcul d'échauffement des éléments

- L'échauffement des éléments en acier non protégé est calculé selon la méthode simplifiée proposée par l'Eurocode 3, partie 1-2 [3]. Cette méthode adopte l'hypothèse que la température sur tout point de la section d'un élément de structure est homogène et ne varie qu'en fonction du temps.
- Emissivité de la surface de l'élément : $\varepsilon_m = 0,7$ (valeurs recommandées dans les normes Eurocodes) ;
- Emissivité du feu : $\varepsilon_f = 1$ (valeur recommandée dans l'Eurocode 1-1-2) ;
- Constante de Stephan Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴)
- Le coefficient de transfert thermique par convection (selon l'Eurocode 1-1-2) :
 - cas d'un feu normalisé : $\alpha_c = 25$ W/m²K
 - cas d'un feu réel : $\alpha_c = 35$ W/m²K
- Les poteaux de rive sont supposés exposés au feu sur leurs 3 faces tandis qu'une exposition sur les 4 faces sera considérée pour les poteaux centraux. La face en contact avec le bardage est considérée adiabatique (démarche sécuritaire) ;
- Les pannes et poutres sont supposées exposées au feu sur les 4 faces ;

4.2.2 Hypothèses retenues pour les analyses de réponse structurale

4.2.2.1 Caractéristiques des matériaux

Dans le cadre de la présente étude, l'ensemble des éléments de structure est supposé constitué d'un seul et même acier de carbone ayant les caractéristiques suivantes :

- Limite d'élasticité : faute données précises, la valeur retenue est la suivante $f_{yk} = 235$ MPa (démarche sécuritaire) ;
- Module tangent : $E_s = 210\ 000$ MPa ; Coefficient de Poisson : 0,3 ;
- Relation contrainte-déformation conforme à la figure 3.1 et au tableau 3.1 a de l'Eurocode 3, partie 1-2 [3] ;
- Masse volumique 7850 kg/m³ ;
- Propriétés thermiques selon la section 3.4 de l'Eurocode 3, partie 1-2 [3].

Le coefficient partiel relatif à l'acier, en situation d'incendie est : $\gamma_{M,fi} = 1,0$

4.2.2.2 Charges mécaniques

Les éléments à disposition du CNPP ne permettent pas de relever de manière précise les charges mécaniques appliquées sur la structure. Les valeurs approximatives retenues sur la base des projets similaires sont les suivantes.

Charges permanentes G :

- Poids propre des éléments acier avec masse volumique de 8000 kg/m^3 . Selon le guide [5], cette valeur correspond à une majoration faible de 2% qui est souvent suffisante pour une ossature en portique composant seulement quelques assemblages).
- Poids de la couverture : complexe toiture d'environ 20 cm d'épaisseur (bac acier + isolation + étanchéité) : estimé à 40 daN/m^2
- Réseaux suspendus : estimé à 40 daN/m^2 (sprinklage, luminosité, CVC, etc.) dont 70% sont supportées par les pannes et 30% directement par les poutres PRS ;
- Bardage de façade : 25 daN/m^2 .

Charges de neige – Sn :

Selon l'Annexe Nationale (française) de l' Eurocode 1-1-3 , le bâtiment se situe dans une région de type A1.

L'altitude de la commune Bazeilles est inférieure à 200 m, la charge caractéristique de neige est donc de $S_k = 0,45 \text{ kN/m}^2$ (selon la norme Eurocode 1).

La toiture ayant une pente de 1,1% (donc comprise entre 0 et 30°), le coefficient de forme est donc $\mu_1=0.8$, soit $S_n= 0,36 \text{ kN/m}^2$.

Il est à noter qu'en situation accidentelle d'incendie, seules les charges de neige normale sans accumulation, réparties uniformément, sont considérées.

Charges de vent – W :

En principe, la vérification de la stabilité de la structure doit se faire avec les deux combinaisons de charges, à savoir l'une avec le vent et l'autre avec la neige. Pourtant, sur la base des considérations suivantes, la charge de vent n'est pas considérée dans la présente étude :

- Sur la résistance au feu : selon le document [6], pour une structure métallique d'un bâtiment industriel de simple rez-de-chaussée, tel qu'il est le cas dans la présente étude, la combinaison la plus pénalisante en termes de résistance au feu est celle relative à la neige ;
- Sur le mode de ruine : selon le guide [7], le mode de ruine vers l'extérieur ne se présente pas dans le plan des portiques pour les bâtiments en structure métallique de dimensions courantes, excepté les portiques à simple nef avec un rapport hauteur/portée dépassant la valeur 0,4.
A noter que la structure métallique en objet de l'étude est une structure à multi-nefs. De plus, le rapport hauteur / portée d'une portique est de $7,5 / 36 = 0,21$, soit nettement plus faible que 0,4. Le risque de ruine est donc en général écarté.

Ainsi la combinaison des charges relative avec le vent n'est pas considérée dans la présente étude.

5 DEFINITION DES SCENARIOS D'ETUDE

Les paragraphes suivants visent à définir les scénarios d'étude, justifier la localisation des foyers envisagés et préciser leurs caractéristiques.

5.1 Risques associés au stockage et à l'activité

La charge calorifique la plus importante est localisée au niveau des zones de stockage du bâtiment. En particulier, les zones de stockage en palletier présentent une densité de charge calorifique importante ainsi qu'une hauteur importante de stockage conduisant à des contraintes thermiques plus importantes sur les éléments de structure en cas de feu. Un départ de feu sur ces zones peut être envisagé par exemple en cas de défaillance d'un chariot élévateur à proximité.

Les zones dont la charge calorifique est la plus importante, et d'intérêt pour l'étude de la structure, sont les zones « réception stockage C9 », « magasin 1 et 2 », la mezzanine centrale de la zone « ateliers », les racks de la zone atelier et les stockages au sol de palettes (vides ou pleines) au niveau de l'atelier extrusion.

Les zones « réception stockage C9 » et les magasins 1 et 2 présentent des typologies de stockage similaires. Cependant, la configuration des magasins est plus pénalisante pour l'étude car ils se trouvent en extrémité de la structure du bâtiment (pénalisant pour le mode de ruine), ces zones sont moins étendues et vont favoriser l'accumulation de fumées chaudes et la densité de charge calorifique y est plus importante.

La zone atelier présente également une charge calorifique importante liée au process et aux machines. Le risque de départ de feu peut être lié à une défaillance électrique ou à un échauffement sur les chaînes de production. Cependant, la charge calorifique y est localisée (hors zones de stockage identifiées précédemment) au niveau du sol. Ce type de départ de feu n'est donc pas dimensionnant pour l'étude.

La charge calorifique des zones de stockage est composée :

- Du bois des palettes ;
- Des emballages (big bag, cartons). La masse de ceux-ci est faible par rapport à la masse totale de combustible mobilisable ;
- De matières plastiques (PVC ou PE), sous formes « brut » dans la zone réception ou magasin et sous forme de produits finis ou semi-finis dans la zone atelier (plaques, éléments).

D'après les informations portées à notre connaissance par CS France, la matière plastique réceptionnée est additivée afin de garantir des propriétés de réaction au feu des produits finis. Il en résulte que cette matière sera moins facilement mobilisable en cas d'incendie et est moins propice à la formation de nappes pour le polyéthylène.

5.2 Définition des foyers

5.2.1 Stockage de matière plastique

Compte tenu des éléments précédents, il est retenu pour ce type de foyer un feu de solide et non un feu de nappe. Cette hypothèse va également conduire à considérer une propagation des foyers en partie haute des racks, ce qui est pénalisant pour la structure.

Les foyers proposés sont basés sur la palette rubrique 2662 proposée dans le cadre de la méthodologie FLUMILOG [8] :

Palette rubrique	Dimensions standard	Puissance de feu	Durée d'incendie
2662	L 1,2 m x l 0,8 m x H 1,5 m	1875 kW	45 min

Les caractéristiques de cette palette sont enveloppe : la palette ainsi définie est représentative à 95% de l'ensemble des palettes susceptibles d'appartenir à la rubrique 2662 sur la base de 30000 compositions de palettes testées numériquement : par défaut la palette considérée est constituée de 25 kg de bois palette. A ceci s'ajoute la masse du PE (avec un minimum de 50% du poids total de l'échantillon) complétée aléatoirement par d'autres produits possibles (combustibles ou non).

La montée en puissance sera considérée

- Comme moyenne au sens de la NFPA 204 (Cf. [9] Annexe D pp 204-51) pour la palette initialement en feu et pour prendre en compte les propriétés de réaction au feu des produits stockés ;
- Comme rapide au sens de la NFPA 204 pour les autres palettes qui seront soumises à des contraintes thermiques plus importantes favorisant la propagation du feu.

Suite au départ de feu, la propagation du foyer aux palettes adjacentes est réalisée automatiquement par le code de calcul sur la base de la montée en température du combustible.

La puissance des palettes sera adaptée à chaque typologie de stockage sur la base de la surface développée de combustible.

5.2.2 Stockage de palettes vides

Des empilements de palettes vides ont été identifiés au niveau de la zone atelier extrusion et à proximité de poteaux du bâtiment lors de notre visite (voir figure 6).

Un feu d'empilement de palettes vides peut produire des feux dont la croissance est plus rapide et la puissance maximale plus élevée qu'un feu de palette pleine d'une hauteur équivalente. En effet, ce combustible est très ajouré et favorise ainsi la propagation du feu. La combustion reste cependant moins longue.

D'après les éléments présentés dans la référence [10], la puissance par unité de surface d'un empilement de palette sera calculée par la relation suivante :

$$\dot{q}'' = 919(1 + 2.14h_p)(1 - 0.03M)$$

Avec h_p la hauteur de l'empilement et M (humidité du combustible) égal à 10%.

La montée en puissance sera réalisée avec un coefficient de croissance de $0,075 \text{ kW.s}^{-2}$ (entre rapide et très rapide au sens de la NFPA 204) comme le suggère la référence [10]. La durée de combustion sera maintenue pendant 15 minutes à minima.

On retiendra dans l'étude une hauteur de 2,5 m, correspondant à un empilement d'environ 14 palettes.

Compte tenu des dimensions des palettes de la zone considérée (3 m par 1,5 m), la puissance résultante maximale est ainsi de 18 MW environ.

5.3 Positionnement des départs de feu

Les départ de feu sont positionnés en considérant l'analyse des paragraphes précédents.

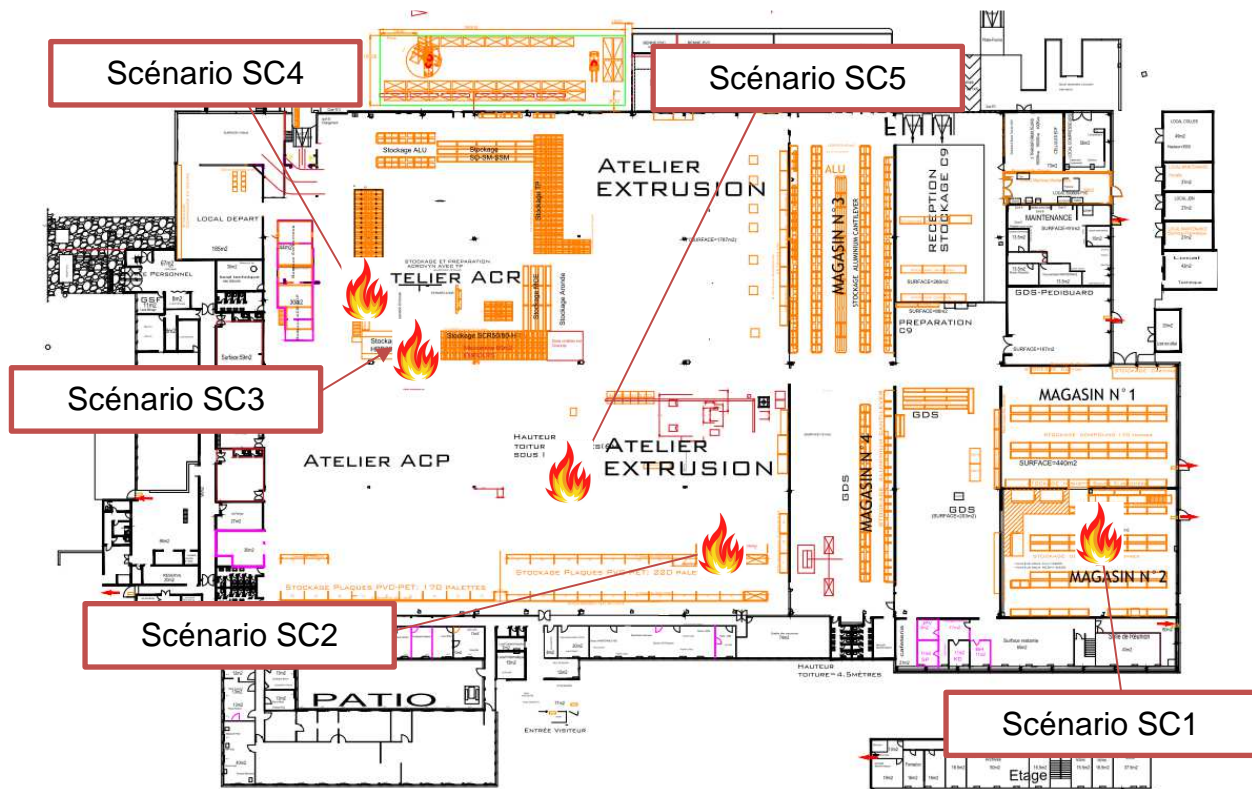


Figure 18 : Emplacements retenus pour les départs de feu

Le scénario SC1 considère un départ de feu en partie basse d'un double rack du magasin 2 (typologie du §5.2.1). Le départ de feu est placé au droit d'une poutre principale. De manière pénalisante, les portes des magasins donnant sur le reste du bâtiment sont considérées comme ouvertes (apport d'air au foyer). Il est à noter que

même si ces portes étaient fermées, il ne peut être exclu la ruine des éléments verriers situés au niveau de la façade du bâtiment. Celle-ci conduirait de même à un apport d'air au feu.



Figure 19 : Eléments verriers en façade des magasins

Le scénario SC2 considère un départ de feu au niveau des racks de l'atelier (voir figure 6, « stockage plaques »). La typologie est celle présentée au §5.2.1. Le départ de feu est réalisé au niveau des doubles racks, maximisant la charge calorifique qui pourrait être impliquée dans les premières phases du sinistre.

Le scénario SC3 considère un départ de feu au niveau de la mezzanine centrale de l'atelier (typologie du §5.2.1). Le départ de feu est placé en partie basse dans la zone de plancher en caillebotis car la zone en plancher plein limitera la propagation du feu. De plus, le stockage sous la zone en plancher plein est réalisée dans de petites alvéoles métalliques qui vont nécessairement limiter la propagation du feu.

Le départ de feu du scénario SC4 est positionné au niveau du rack à proximité de la mezzanine centrale (typologie du §5.2.1).

Le départ de feu du scénario SC5 est positionné à proximité d'un poteau et considère le foyer présenté au §5.2.2.

5.4 Evaluation des conditions d'évacuation et d'intervention

Bien que la présente étude se focalise sur la résistance au feu de la structure, les simulations feu seront également instrumentées afin d'évaluer les temps disponibles pour l'évacuation et l'intervention, en absence d'intervention sur le foyer. Les zones en mezzanine seront particulièrement étudiées.

Les critères d'acceptabilité pris en compte dans l'étude sont adaptés des critères en vigueur dans le guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie de désenfumage paru en juin 2017 [11].

Objectif réglementaire de sécurité	Critères imposés
Maintenir praticables les cheminements destinés à l'évacuation du public	À une hauteur de 2 m, température de l'air dans les cheminements $< T_{\text{seuil}}$, avec $T_{\text{seuil}} = 40^{\circ}\text{C}$
	À une hauteur de 2 m, coefficient d'extinction de la lumière dans les cheminements $< K_{\text{seuil}}$, avec $K_{\text{seuil}} = 0,4\text{m}^{-1}$
	À une hauteur de 2 m, flux thermique radiatif incident sur le public dans les cheminements $< \Phi_{\text{seuil}}$, avec $\Phi_{\text{seuil}} = 2 \text{ kW/m}^2$
Faciliter l'intervention des secours	À une hauteur de 1 m, température de l'air $< T_{\text{seuil}}$, avec $T_{\text{seuil}} = 100^{\circ}\text{C}$
	À une hauteur de 1 m, flux thermique radiatif incident $< \Phi_{\text{seuil}}$, avec $\Phi_{\text{seuil}} = 5 \text{ kW/m}^2$

Tableau 3 : Critères d'acceptabilité proposés

Il est également proposé de mesurer les températures en couche chaude afin d'évaluer la possibilité d'occurrence d'un phénomène thermique violent de type flashover (température des fumées supérieure à 300°C).

6 CONDITIONS D'EVACUATION ET D'INTERVENTION

Les paragraphes suivants présentent les résultats relatifs à l'évacuation des personnes et à l'intervention des secours.

6.1 SC1 : Départ de feu dans le stockage rack du magasin 2

6.1.1 Conditions d'évacuation

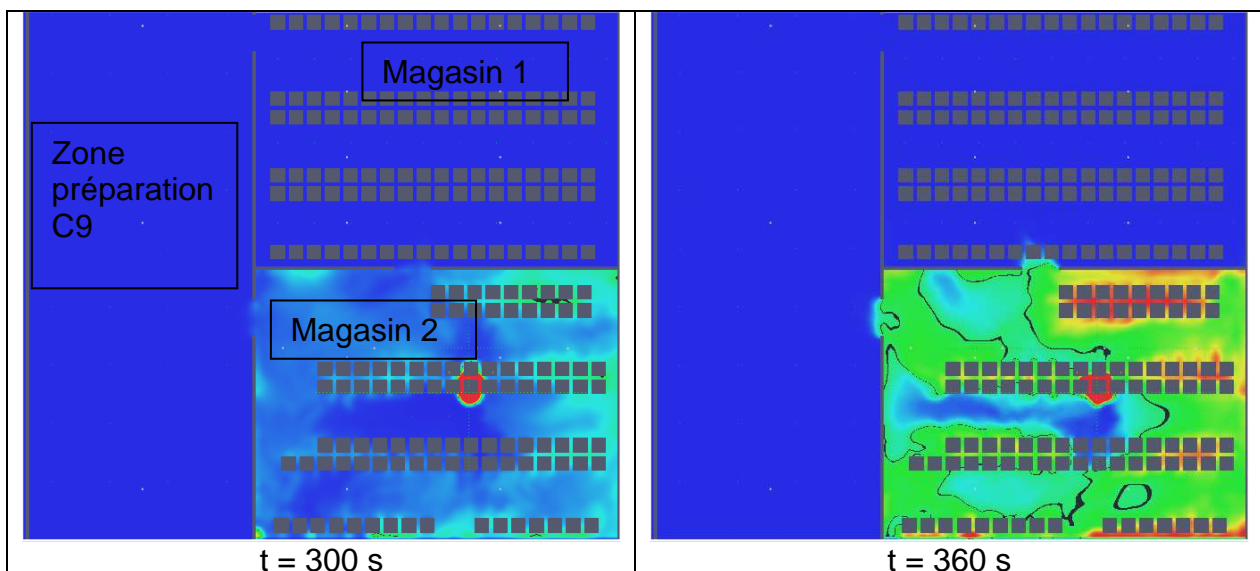
Le tableau suivant synthétise les résultats relatifs à l'évacuation des personnes.

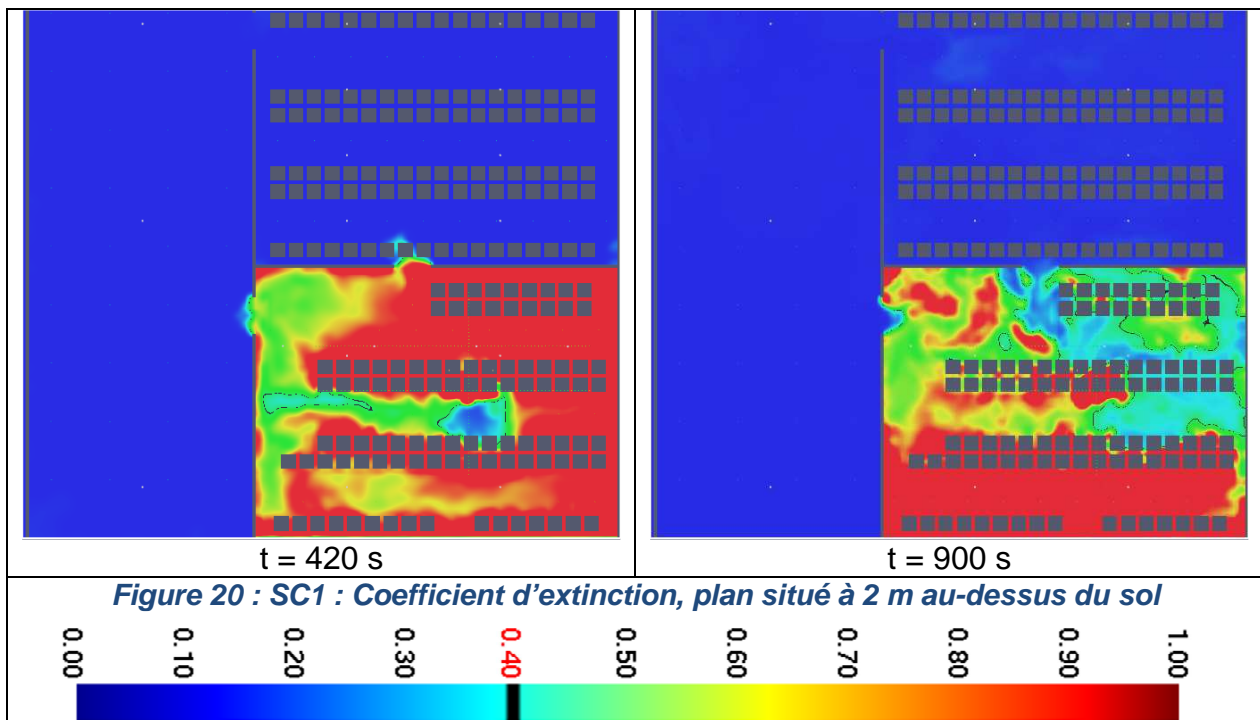
Zone	Temps de remise en cause des critères d'évacuation "locaux" (par niveau) - en s			Temps d'activation sprinkler - en s	Temps de détection - en s
	Coefficient d'extinction	Température	Flux thermique radiatif		
Magasin 2	324 s	482 s	846 s*	310	44
Magasin 1	NA**	NA**	NA**		
Autres zones	NA**	NA**	NA**		

* : Hors dépassement à proximité du foyer

** : Non Atteint sur la durée de simulation

La figure suivante représente l'évolution du critère le plus pénalisant (coefficient d'extinction) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Le seuil critique (coefficient d'extinction de $0,4 \text{ m}^{-1}$) est représenté par les contours noirs.





Les conditions d'évacuation sont remises en cause dans le magasin 2 (subissant le départ de feu) à partir de 5 minutes et 30 s environ.

Les conditions d'évacuation ne sont pas remises en cause dans les autres zones.

Il est de plus rappelé que les portes donnant sur le reste du volume sont considérées, de manière pénalisante, comme restant ouvertes.

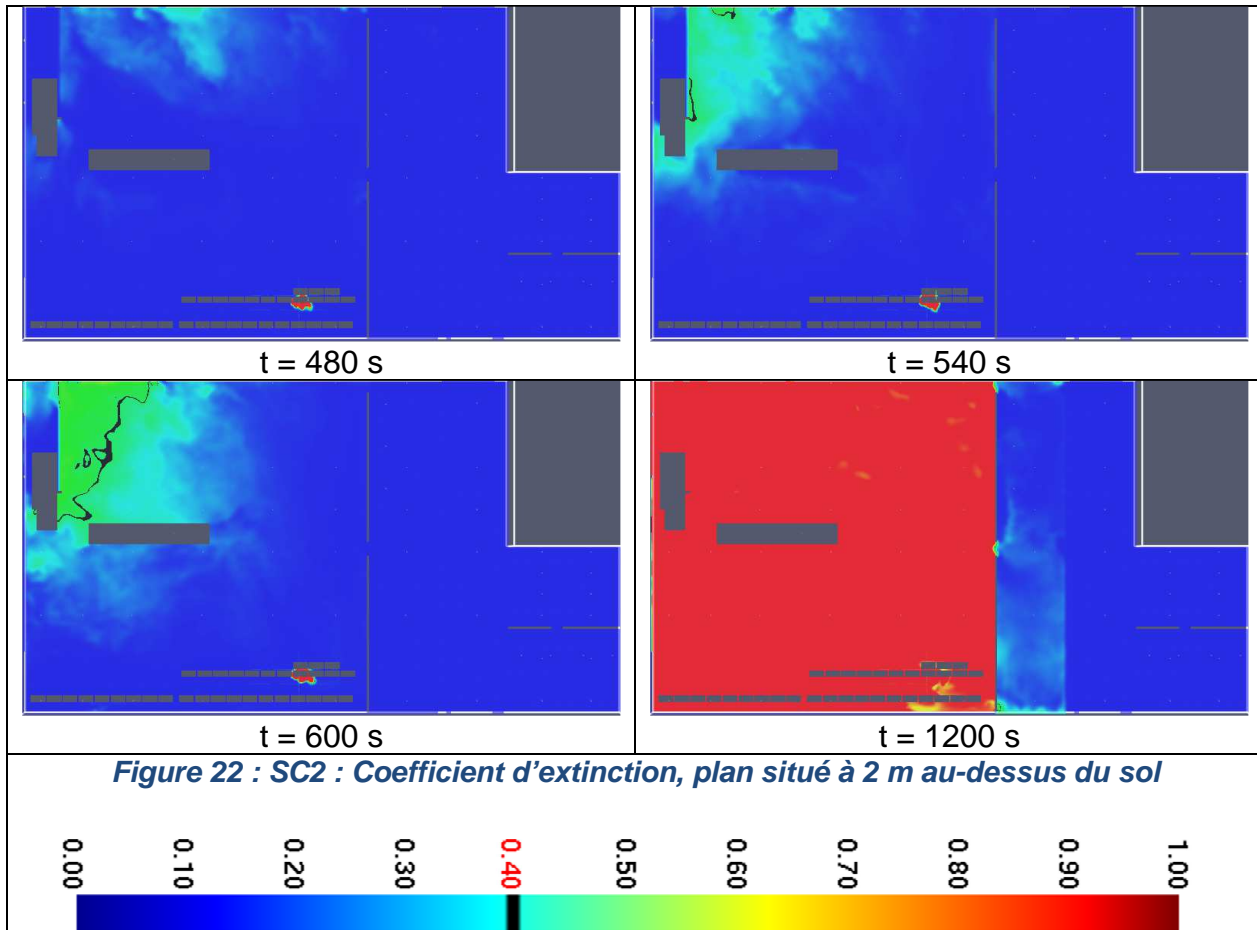
Compte tenu du temps de détection et des distances relativement faibles à parcourir pour évacuer la zone du magasin 2, plusieurs minutes de marge de sécurité sont disponibles pour l'évacuation des personnes.

6.1.2 Intervention des secours

Les conditions de flux thermique et de température ne sont pas remises en cause à une hauteur de 1 m au-dessus du sol sur les 15 premières minutes de simulation.

Une couche chaude d'une température supérieure à 300 °C s'établit à partir de 700 s environ (en absence de prise en compte des moyens de protection dans les simulations). Ce temps est long par rapport au temps d'activation estimé pour le système sprinkleur (310 s).

La figure suivante représente l'évolution du critère le plus pénalisant (coefficient d'extinction) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Le seuil critique (coefficient d'extinction de $0,4 \text{ m}^{-1}$) est représenté par les contours noirs.



Les conditions d'évacuation sont remises en cause dans l'atelier à partir de 530 s environ (remise en cause locale, mais à distance du foyer), à 504 s pour la mezzanine 1 et à 487 s pour la mezzanine 2.

Les conditions d'évacuation ne sont pas remises en cause dans les autres zones.

Compte tenu du temps de détection, des distances relativement faibles à parcourir pour évacuer les mezzanines et du temps disponible pour évacuer le RDC de l'atelier, plusieurs minutes de marge de sécurité sont disponibles pour l'évacuation des personnes.

Remarque sur l'évacuation des mezzanines : Les mezzanines ne disposent que d'un escalier. Ainsi, celles-ci pourraient ne pas être évacuées dans de bonnes conditions si l'escalier s'avérait être impraticable. Il a de plus été observé sur site la présence de stockage sous les escaliers que nous conseillons de supprimer pour la raison évoquée ci-avant. Les distances d'évacuation des mezzanines devront être vérifiées vis-à-vis des exigences applicables, notamment du code du travail.

6.2.2 Intervention des secours

Les conditions de flux thermique et de température ne sont pas remises en cause à une hauteur de 1 m au-dessus du sol sur les 20 premières minutes de simulation.

Une couche chaude d'une température supérieure à 300 °C s'établit à partir de 1080 s environ (en absence de prise en compte des moyens de protection dans les simulations). Ce temps est long par rapport au temps d'activation estimé pour le système sprinkleur (350 s).

6.3 SC3 : Départ de feu au niveau de la mezzanine centrale de l'atelier (mezzanine 1)

6.3.1 Conditions d'évacuation

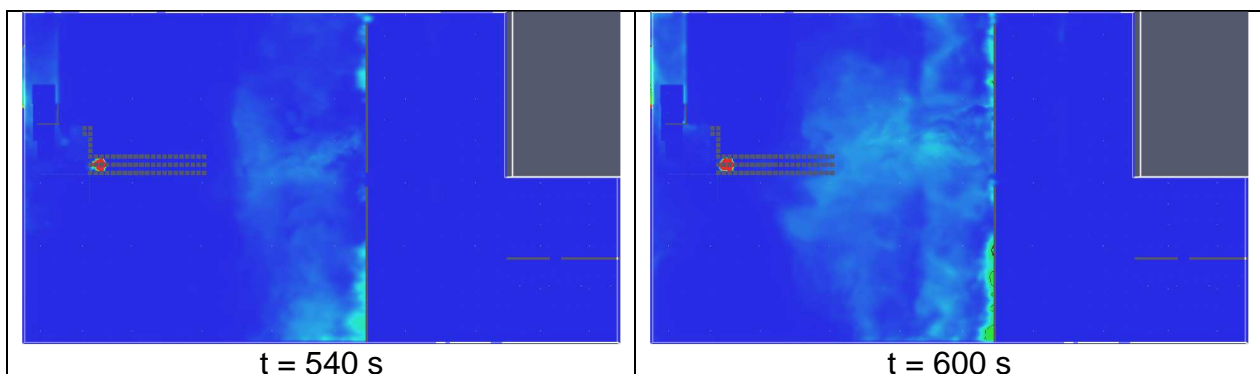
Le tableau suivant synthétise les résultats relatifs à l'évacuation des personnes.

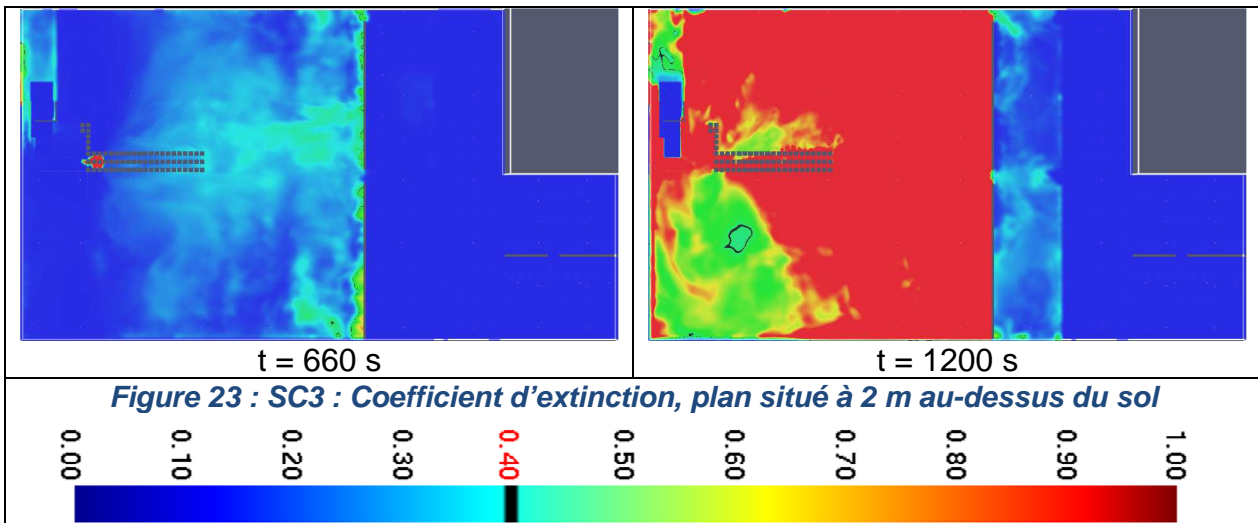
Zone	Temps de remise en cause des critères d'évacuation "locaux" (par niveau) - en s			Temps d'activation sprinkler - en s	Temps de détection – en s
	Coefficient d'extinction	Température	Flux thermique radiatif		
RDC Atelier	580	900	NA*	360	115
Mezzanine 1	Voir commentaire en fin de paragraphe				
Mezzanine 2	465	660	NA**		
Autres zones	NA**	NA**	NA**		

* : Non Atteint sauf à proximité du foyer

** : Non Atteint sur la durée de simulation

La figure suivante représente l'évolution du critère le plus pénalisant (coefficient d'extinction) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Le seuil critique (coefficient d'extinction de $0,4 \text{ m}^{-1}$) est représenté par les contours noirs.





Les conditions d'évacuation sont remises en cause dans l'atelier à partir de 580 s environ (remise en cause locale, mais à distance du foyer) et à 465 s pour la mezzanine 2.

Les conditions d'évacuation ne sont pas remises en cause dans les autres zones.

Compte tenu du temps de détection, des distances relativement faibles à parcourir pour évacuer la mezzanine 2 et du temps disponible pour évacuer le RDC de l'atelier, plusieurs minutes de marge de sécurité sont disponibles pour l'évacuation des personnes.

En revanche, pour la mezzanine 1 (subissant le départ de feu), le chemin d'évacuation est très rapidement impacté par les conséquences du départ de feu. Les conditions d'évacuation sont dégradées dès le début de la simulation. L'absence de chemin d'évacuation alternatif ne permet dans ce cas pas de se prononcer sur la possibilité d'évacuation dans de bonnes conditions de sécurité pour cette mezzanine dans le cadre de ce scénario (voir remarque du §6.2.1).

6.3.2 Intervention des secours

Les conditions de flux thermique et de température ne sont pas remises en cause à une hauteur de 1 m au-dessus du sol sur les 20 premières minutes de simulation.

Une couche chaude d'une température supérieure à 300 °C s'établit à partir de 1020 s environ (en absence de prise en compte des moyens de protection dans les simulations). Ce temps est long par rapport au temps d'activation estimé pour le système sprinkleur (360 s).

6.4 SC4 : Départ de feu au niveau du rack à proximité de la mezzanine centrale (mezzanine 1)

6.4.1 Conditions d'évacuation

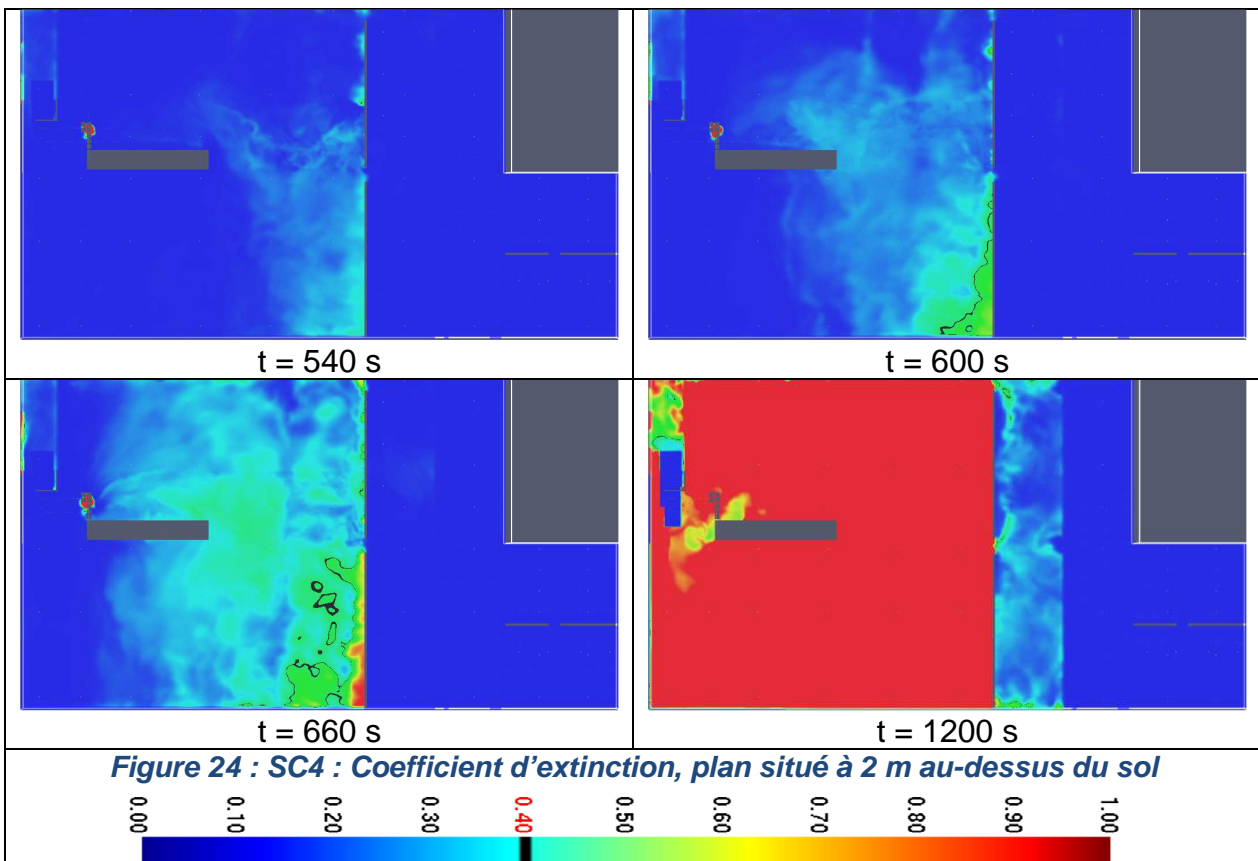
Le tableau suivant synthétise les résultats relatifs à l'évacuation des personnes.

Zone	Temps de remise en cause des critères d'évacuation "locaux" (par niveau) - en s			Temps d'activation sprinkler - en s	Temps de détection - en s
	Coefficient d'extinction	Température	Flux thermique radiatif		
RDC Atelier	560	820	NA*	320	105
Mezzanine 1	525	712	595		
Mezzanine 2	410	592	547		
Autres zones	NA**	NA**	NA**		

* : Non Atteint sauf à proximité du foyer

** : Non Atteint sur la durée de simulation

La figure suivante représente l'évolution du critère le plus pénalisant (coefficient d'extinction) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Le seuil critique (coefficient d'extinction de $0,4 \text{ m}^{-1}$) est représenté par les contours noirs.



Les conditions d'évacuation sont remises en cause dans l'atelier à partir de 560 s environ (remise en cause locale, mais à distance du foyer), à 525 s pour la mezzanine 1 et à 410 s pour la mezzanine 2.

Les conditions d'évacuation ne sont pas remises en cause dans les autres zones.

Compte tenu du temps de détection et des distances relativement faibles à parcourir pour évacuer les mezzanines et du temps disponible pour évacuer le RDC de l'atelier, plusieurs minutes de marge de sécurité sont disponibles pour l'évacuation des personnes.

6.4.2 Intervention des secours

Les conditions de flux thermique et de température ne sont pas remises en cause à une hauteur de 1 m au-dessus du sol sur les 20 premières minutes de simulation.

Une couche chaude d'une température supérieure à 300 °C s'établit à partir de 1000 s environ (en absence de prise en compte des moyens de protection dans les simulations). Ce temps est long par rapport au temps d'activation estimé pour le système sprinkleur (320 s).

6.5 SC5 : Départ de feu au niveau d'un empilement de palettes de la zone atelier, à proximité d'un poteau

6.5.1 Conditions d'évacuation

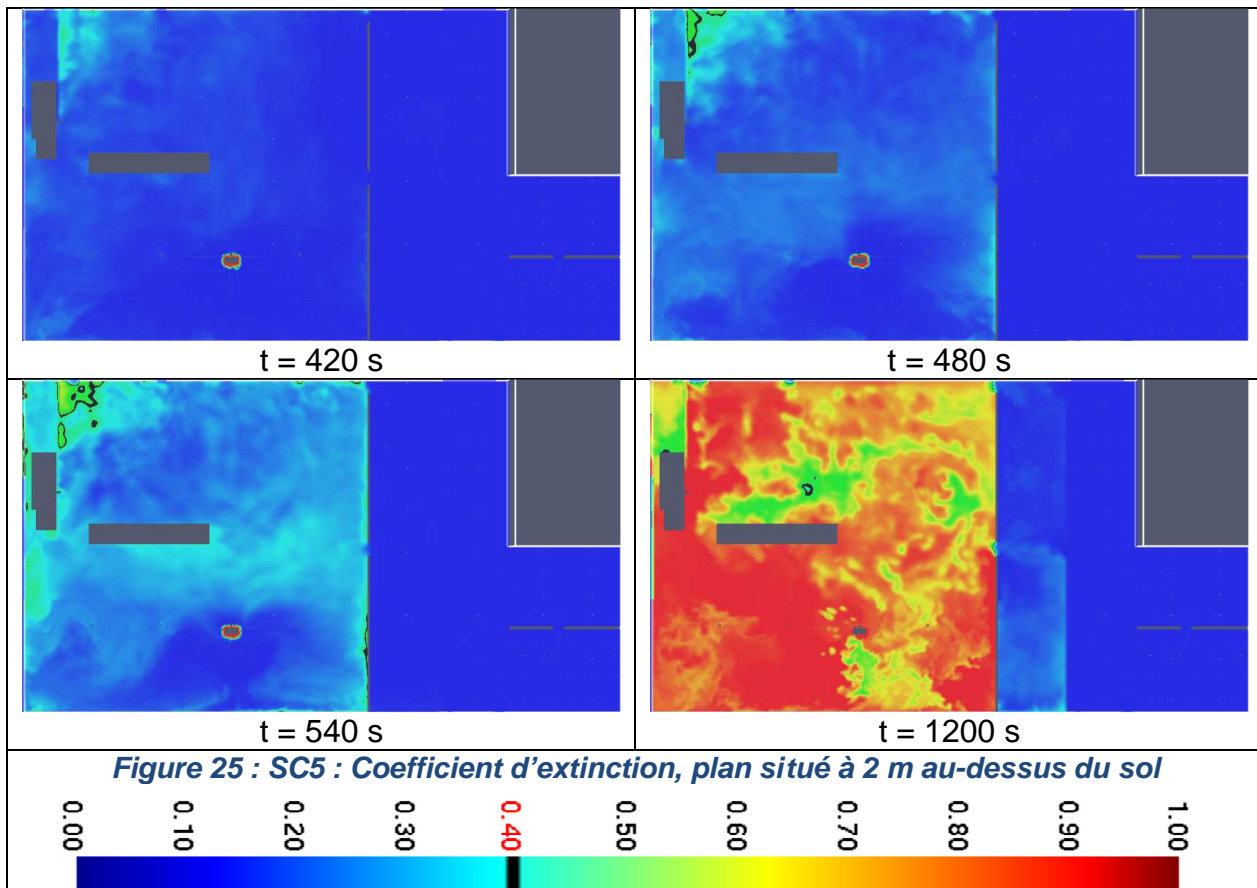
Le tableau suivant synthétise les résultats relatifs à l'évacuation des personnes.

Zone	Temps de remise en cause des critères d'évacuation "locaux" (par niveau) - en s			Temps d'activation sprinkler - en s	Temps de détection – en s
	Coefficient d'extinction	Température	Flux thermique radiatif		
RDC Atelier	440	470	NA*	390	93
Mezzanine 1	420	376	NA**		
Mezzanine 2	417	376	NA**		
Autres zones	NA**	NA**	NA**		

* : Non Atteint sauf à proximité du foyer

** : Non Atteint sur la durée de simulation

La figure suivante représente l'évolution du critère le plus pénalisant (coefficient d'extinction) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol. Le seuil critique (coefficient d'extinction de $0,4 \text{ m}^{-1}$) est représenté par les contours noirs.



Les conditions d'évacuation sont remises en cause dans l'atelier à partir de 440 s environ (remise en cause locale, mais à distance du foyer), à 376 s pour la mezzanine 1 et à 376 s pour la mezzanine 2.

Les conditions d'évacuation ne sont pas remises en cause dans les autres zones.

Compte tenu du temps de détection, des distances relativement faibles à parcourir pour évacuer les mezzanines et du temps disponible pour évacuer le RDC de l'atelier, plusieurs minutes de marge de sécurité sont disponibles pour l'évacuation des personnes.

6.5.2 Intervention des secours

Les conditions de flux thermique et de température ne sont pas remises en cause à une hauteur de 1 m au-dessus du sol sur les 20 premières minutes de simulation.

Une couche chaude d'une température supérieure à 300 °C s'établit à partir de 700 s environ (en absence de prise en compte des moyens de protection dans les simulations). Ce temps est long par rapport au temps d'activation estimé pour le système sprinkleur (390 s).

6.6 Synthèse des résultats et conclusion sur les conditions d'évacuation et d'intervention

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence que les temps de détection sont rapides et que les temps disponibles pour l'évacuation sont longs pour l'ensemble du bâtiment. Ces éléments offrent plusieurs minutes de marge de sécurité pour l'évacuation des personnes.

Concernant plus spécifiquement l'évacuation des mezzanines, aucun problème spécifique n'est mis en évidence, sauf si le départ de feu se situe directement dans l'une d'elle ou à proximité immédiate et venait à dégrader les conditions d'évacuation sur le seul chemin d'évacuation disponible. Les mezzanines ne disposent actuellement que d'un seul escalier permettant leur évacuation. Il a de plus été observé sur site la présence de stockage sous les escaliers que nous conseillons de supprimer pour la raison évoquée ci-avant. Les distances d'évacuation des mezzanines devront être vérifiées vis-à-vis des exigences applicables, notamment du code du travail.

Les conditions d'intervention ne sont pas remises en cause directement sur la durée des simulations. La probabilité d'occurrence d'un phénomène de type flashover pourrait cependant dégrader les conditions d'intervention à partir de temps relativement longs (plus de 11 minutes). Il est cependant rappelé que le bâtiment dispose d'un système d'extinction automatique dont les effets ne sont pas pris en compte dans les simulations. Les temps d'activation estimés de ces systèmes sont beaucoup plus courts que les temps mis en évidence ci-avant.

7 RESISTANCE AU FEU NORMALISE (ISO 834)

7.1 Pannes

Une file courante des pannes continues est modélisée à l'aide du logiciel SAFIR. La section des pannes est celle du profilé IPE 270, exposée sur les 4 faces.

La réponse thermomécanique de la file est montrée dans la figure suivante.

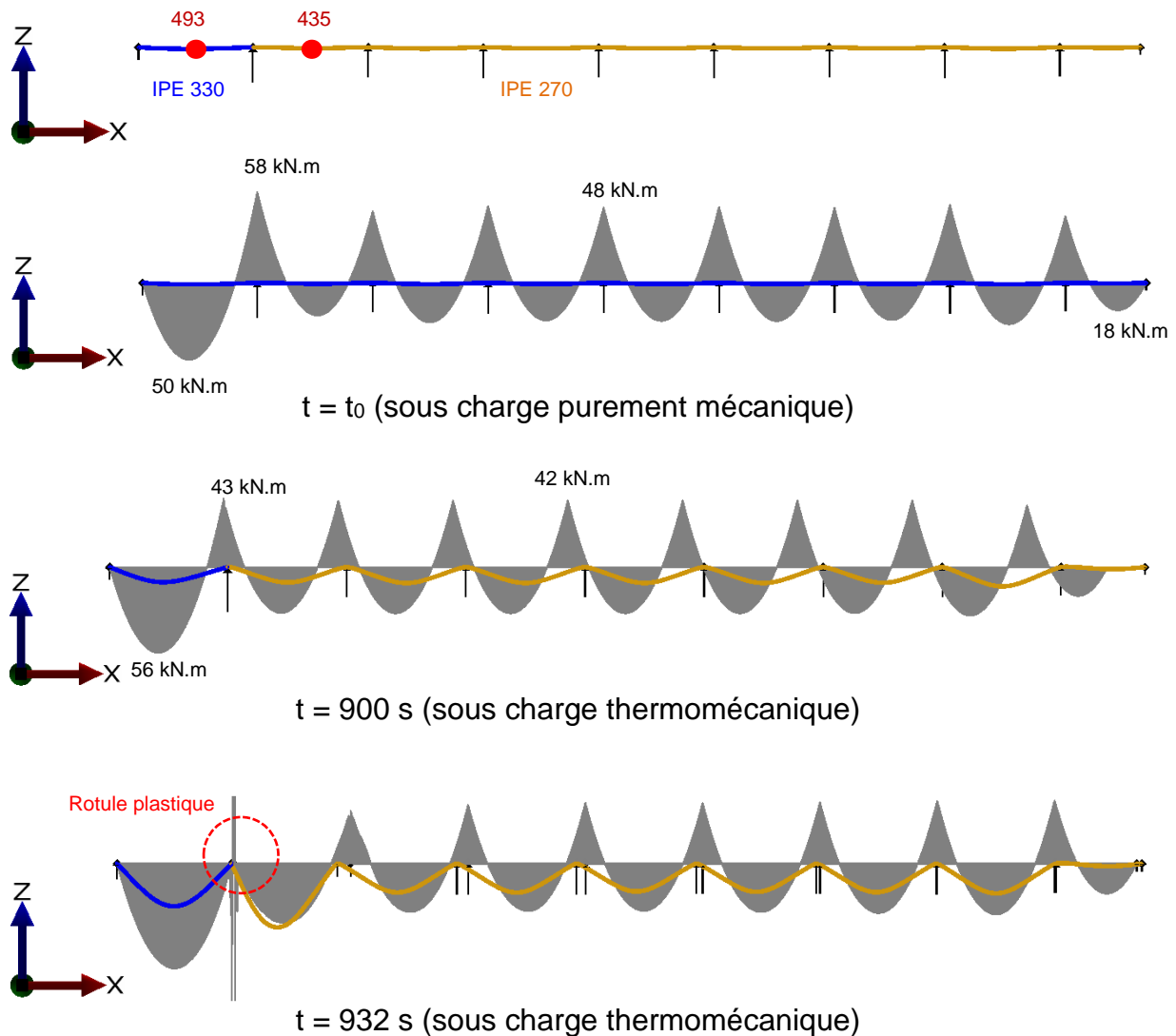


Figure 26 : Réponse thermomécanique de la file courante des pannes

Les résultats montrent les pannes assurent un degré de résistance au feu R15. Une rotule plastique observée après 15 min 32 s entraîne l'effondrement de la file. Cet effondrement est manifesté par un déplacement brutal des points comme le montre la figure suivante.

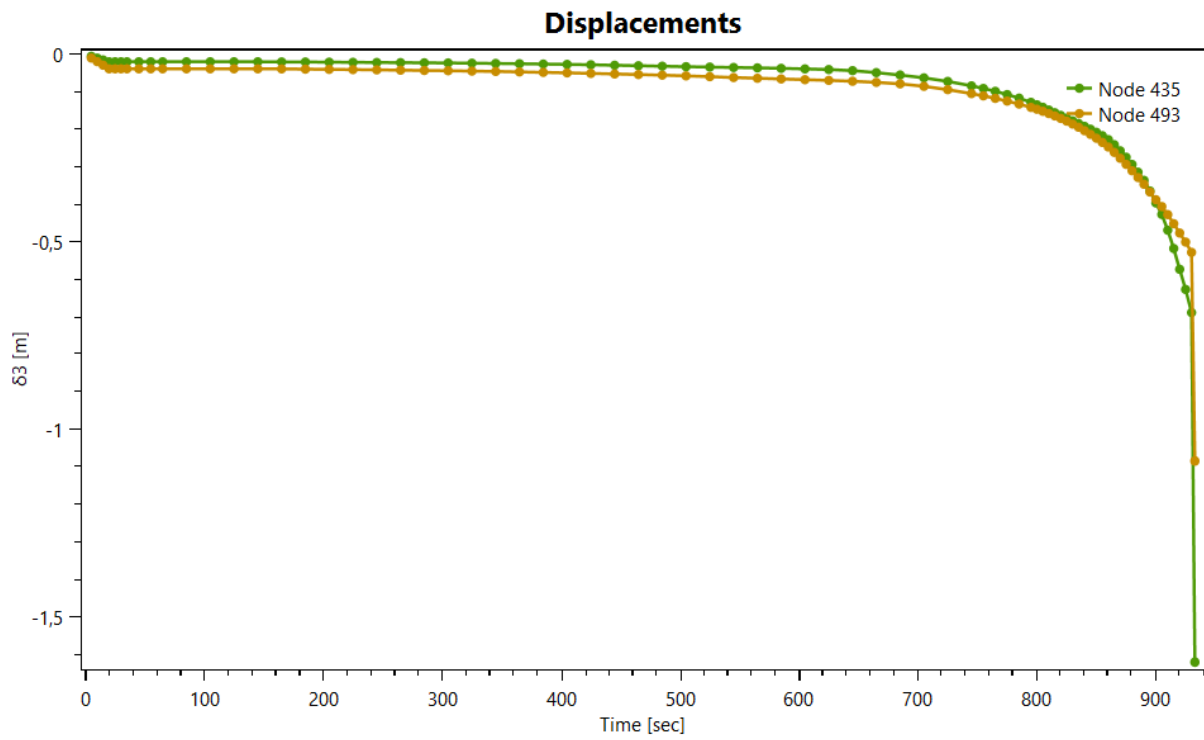


Figure 27 : Déplacement des points situés à mi-travée des pannes – feu ISO

7.2 Poutres PRS trame courante

Afin d'évaluer la résistance au feu des poutres PRS, un modèle portique courant utilisant des éléments de type coques (pour les profilés de hauteur importante) est retenu.

Le modèle et les conditions aux limites sont présentés ci-après.

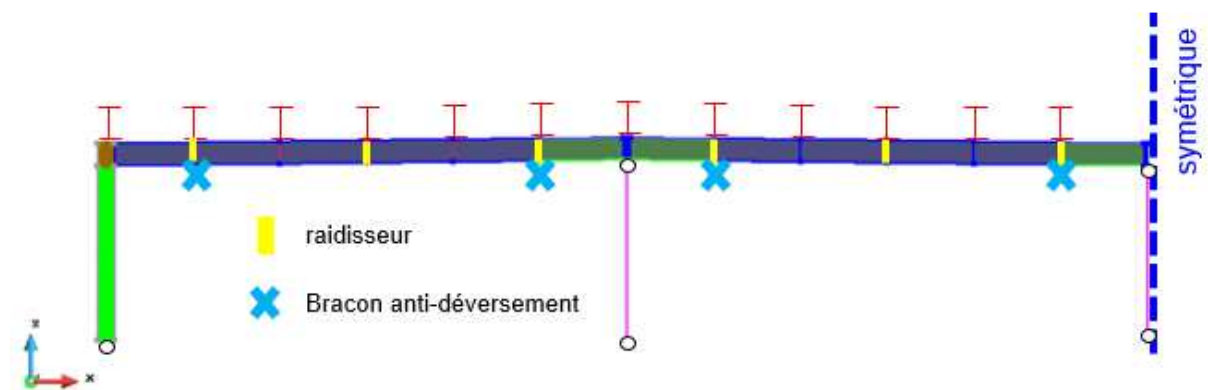


Figure 28 : Modèle portique retenu

Conditions aux limites :

- Les pieds des poteaux sont articulés selon X, Y et Z ; Leur rotation selon Z est bloquée ;
- Le maintien hors-plan assuré par des pannes et les bracons anti-déversement est pris en compte par le blocage : du déplacement selon Y au niveau des emplacements des pannes ; et de rotation selon X au niveau des emplacements des bracons ;
- Le poteau central est considéré articulé en tête également ;
- Les assemblages poutres - poteaux de rive, et poutre - poutre sont considérés parfaitement rigides et suffisamment résistants pendant toute la durée de calculs du fait d'une rigidité plus importante au voisinage immédiat des assemblages due à une plus lente montée en température par rapport aux autres parties du portique ;
- Le chargement mécanique est considéré constant sur toute la durée de l'exposition au feu.

Les résultats de l'analyse thermomécanique sont montrés ci-après.

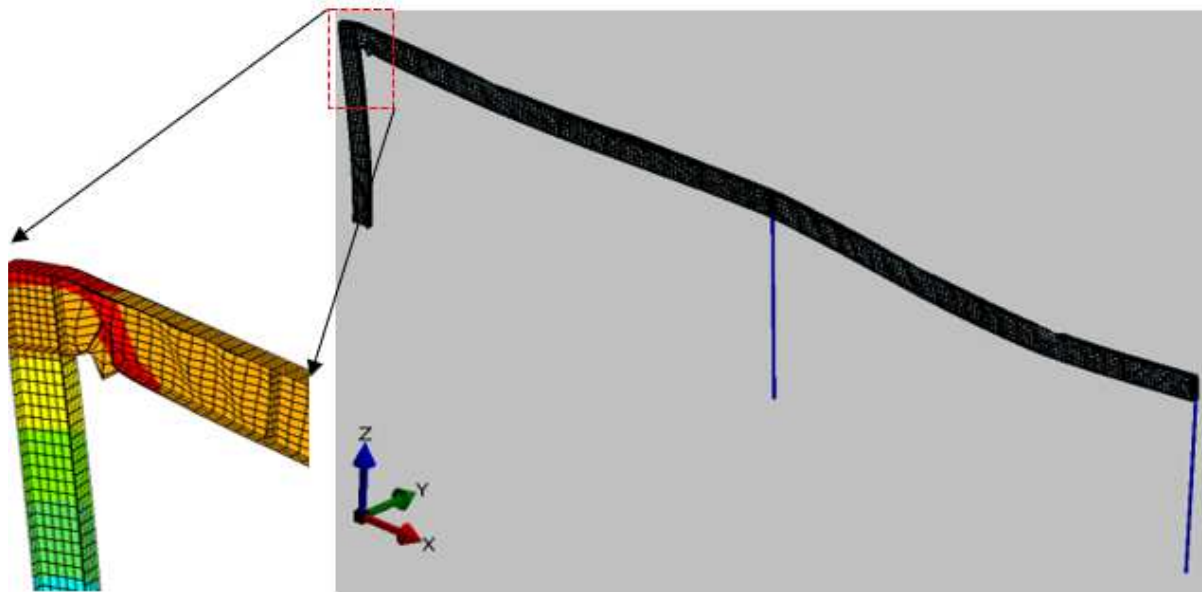
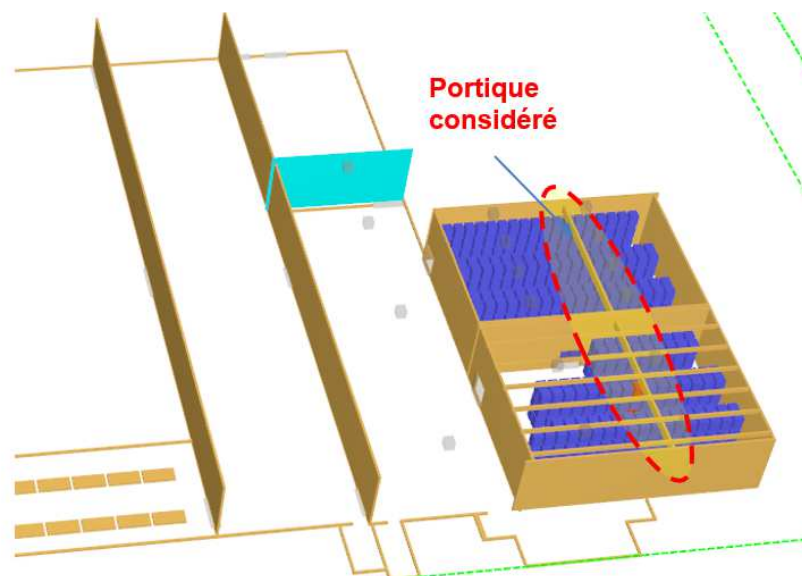


Figure 29 : Déformation visuelle à $t = 560$ s – feu ISO

La figure ci-avant montre que la poutre PRS perd sa résistance après 9 minutes 20 s. Une rotule plastique est observée à proximité de l'assemblage poutre - poteau de rive à noter que le moment fléchissant le plus important se trouve à ce niveau.

7.3 Poutres PRS trame singulière (file 11)

Le portique singulier traversant les deux magasins 1 et 2 sous l'action thermique du feu normalisé est analysé et présenté dans ce paragraphe.



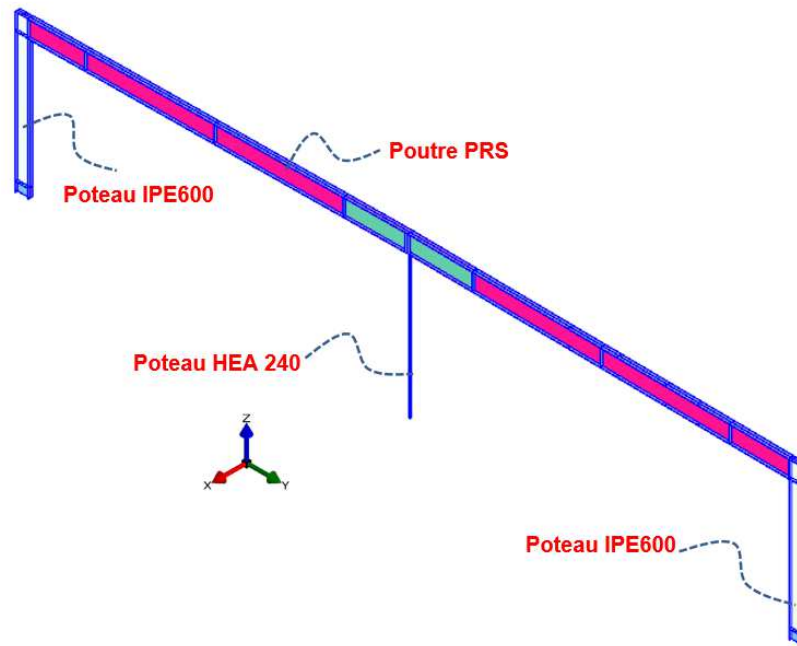


Figure 30 : Portique étudié

Les conditions aux limites suivantes sont considérées :

- Les pieds des poteaux sont articulés selon X, Y et Z ; Leur rotation selon Z est bloquée ;
- Le poteau central est considéré articulé en tête également ;
- Le maintien hors-plan assuré par des pannes et les bracons anti-déversement est pris en compte par le blocage : du déplacement selon Y au niveau des emplacements des pannes ; et de rotation selon X au niveau des emplacements des bracons ;
- Les assemblages poutres - poteaux de rive, et poutre - poutre sont considérés parfaitement rigides et suffisamment résistants pendant toute la durée de calculs du fait d'une rigidité plus importante au voisinage immédiat des assemblages due à une plus lente montée en température par rapport aux autres parties du portique ;
- Le chargement mécanique est considéré constant sur toute la durée de l'exposition au feu ;

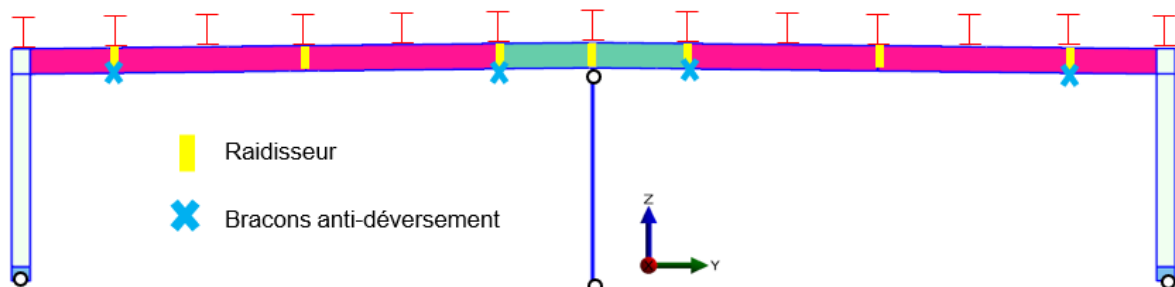


Figure 31 : Conditions aux limites – modèle portique singulier

La réponse structurale du portique est présentée ci-après.



Figure 32 : Déformation visuelle du portique sous le feu ISO à $t=788s$ (exagérée : x5)

Les déplacements des points indiqués sur la figure 32 sont présentés ci-après.

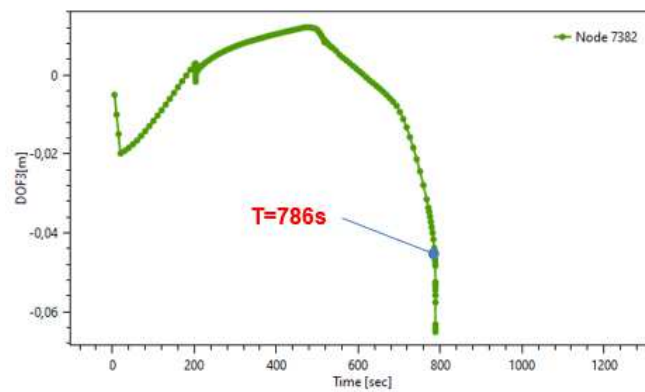


Figure 33 : Déplacement selon Z du nœud 7382 – feu ISO

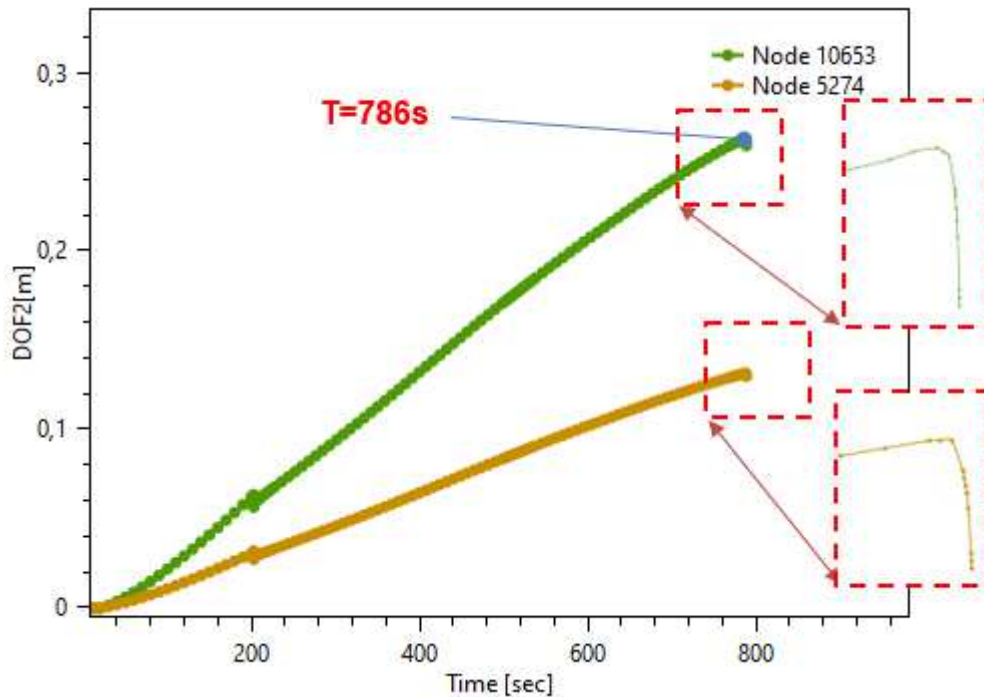


Figure 34 : Déplacement selon Y des nœuds 10653 et 5274 – feu ISO

La figure ci-avant montre que la poutre PRS perd sa résistance après 13 minutes 8 s. Comme dans le cas du portique courant, une rotule plastique est observée à proximité de l'assemblage poutre - poteau de rive. A noter que le moment fléchissant le plus important se trouve à ce niveau.

Les poteaux restent stables au feu pendant le temps de calcul (13 minutes 8 s). La perte de résistance de la poutre PRS conditionne la ruine du portique.

7.4 Poteaux

La perte de résistance des poteaux n'a pas été observée pendant le temps de calcul (560 s) du modèle présenté dans la section § 7.2. Pour vérifier le degré R15 des poteaux, des analyses par élément sont retenues pour les poteaux centraux (HEA 240) et les poteaux de rive (IPE 600).

7.4.1 Poteaux centraux HEA 240

La zone de charges mécanique appliquée sur un poteau central est de 15 m x 18 m comme le montre la figure suivante.



Figure 35 : Repérage d'un poteau central avec sa zone de charge mécanique

Les conditions aux limites sont présentées dans la figure suivante.

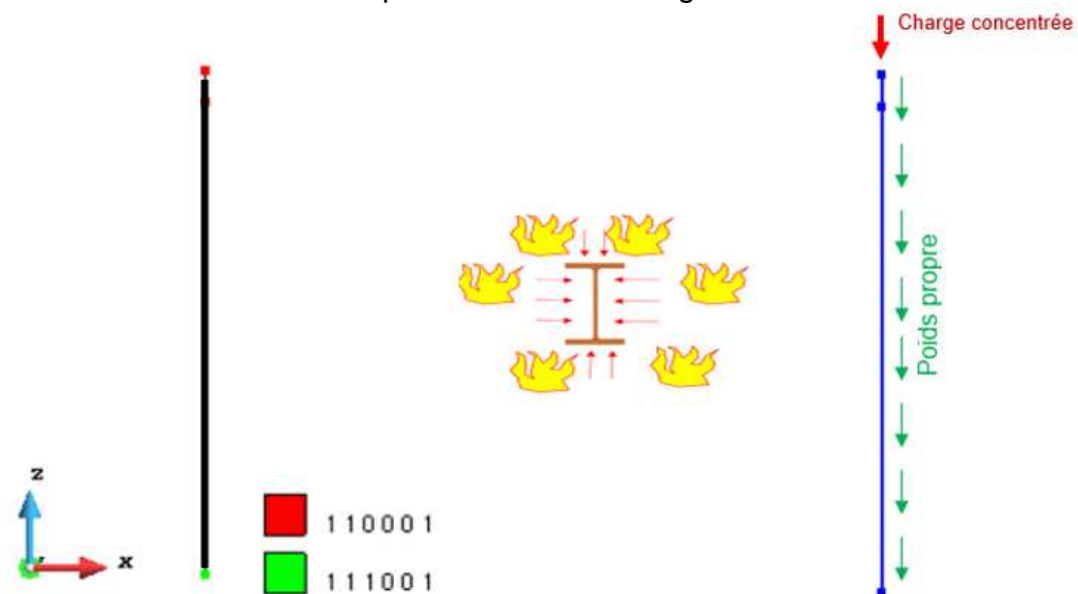


Figure 36 : Conditions aux limites – poteaux HEA 240 sous feu ISO

La réponse thermomécanique est présentée dans la figure suivante.

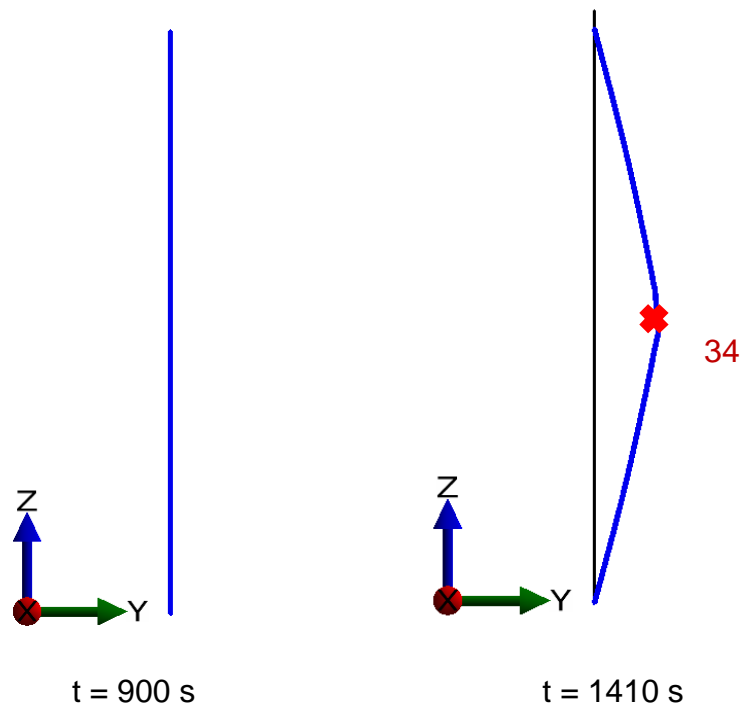


Figure 37 : Déformation visuelle du poteau à différents instants – poteau HEA 240 – feu ISO

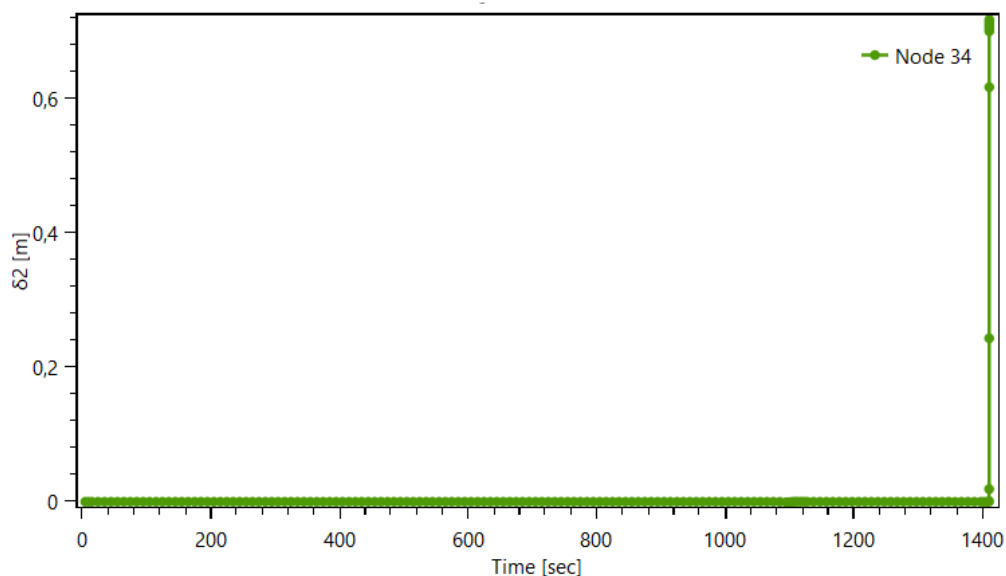


Figure 38 : Déplacement selon Y du point 34 – feu ISO

Les résultats montrent que le flambement du poteau sous action thermomécanique se produit à 1410 secondes. Les poteaux centraux HEA 240 assurent donc le degré R15.

On peut en déduire que les autres poteaux centraux en HEB 340 (poteaux type 2), ayant une section plus importante et plus résistante au feu, assurent également au moins le degré R15.

7.4.2 Poteaux de rive IPE 600

La zone de charges mécanique appliquée sur un poteau central est de 15 m x 9 m comme le montre la figure suivante.



Figure 39 : Repérage d'un poteau de rive IPE600 et sa zone de charge mécanique

Les conditions aux limites sont présentées dans la figure suivante.

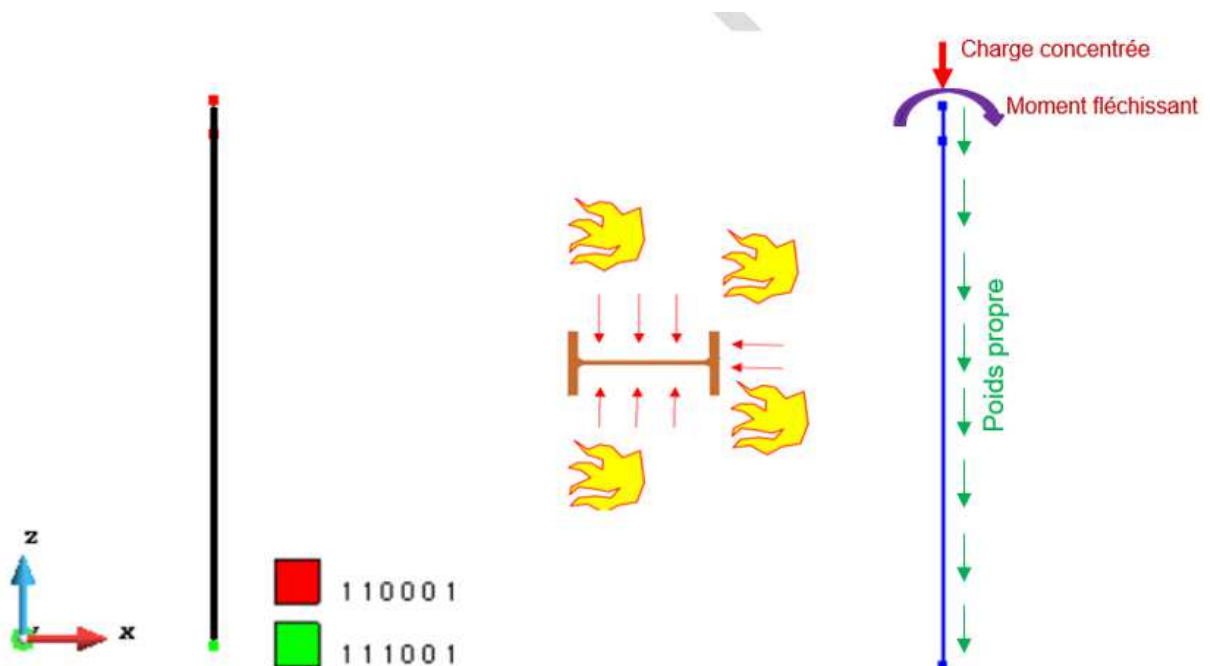


Figure 40 : Conditions aux limites – poteaux IPE 600 sous feu ISO

La réponse thermomécanique est présentée dans la figure suivante.

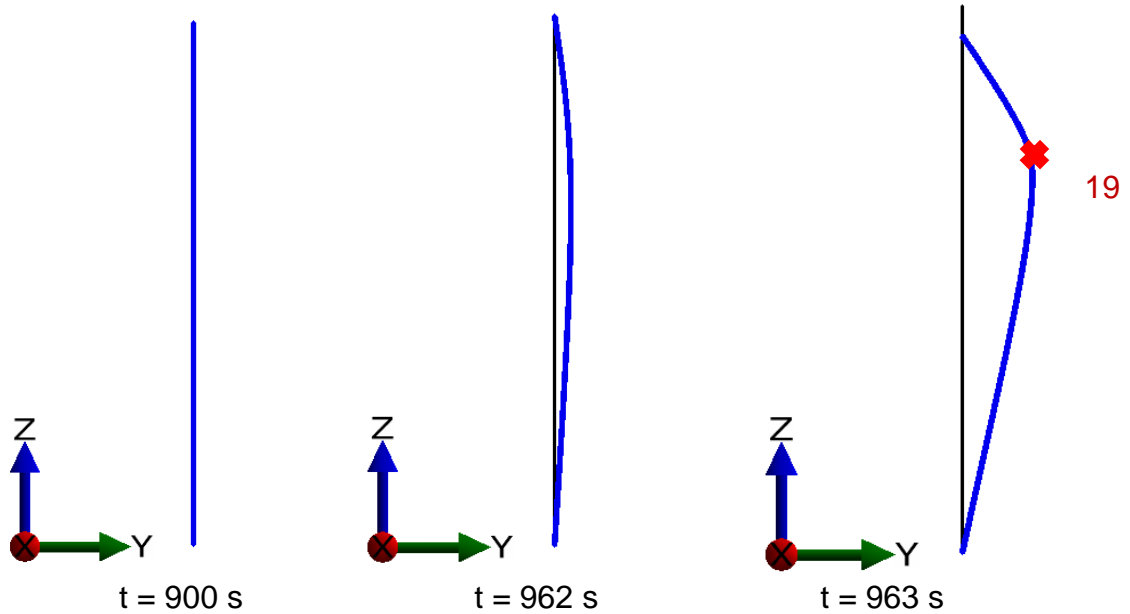


Figure 41 : Déformation visuelle du poteau à différents instants – poteau IPE 600 – feu ISO

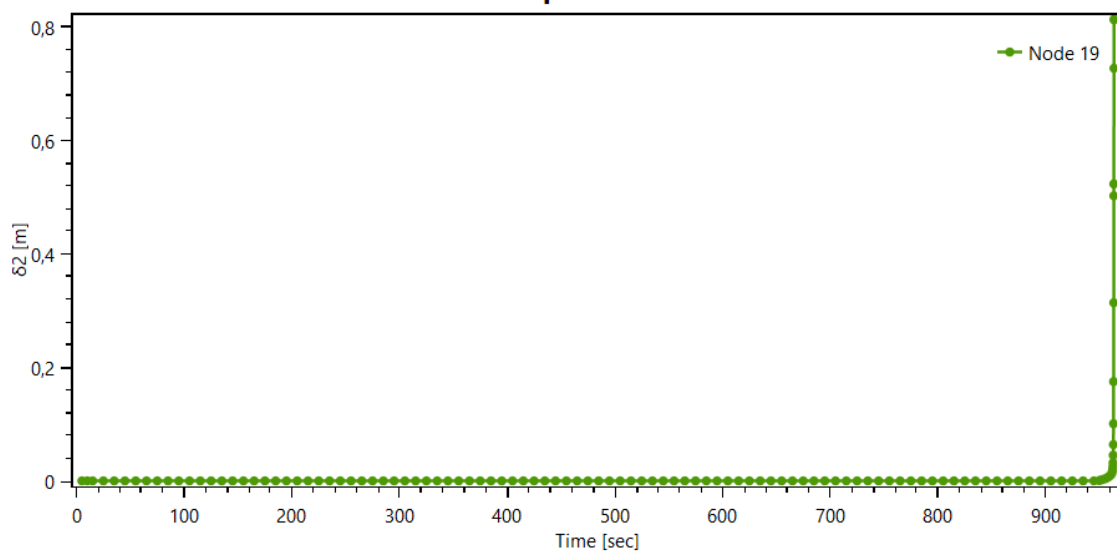


Figure 42 : Déplacement selon X du point 2 – feu ISO

Les résultats montrent que les poteaux IPE 600 assurent à minima le degré R15. La perte de résistance se produit par flambement à environ 16 minutes.

On peut en déduire que les autres poteaux de rive (poteaux de type 4 et 5), ayant une section IPE renforcée, assurent également le degré R15 à minima.

7.5 Contreventement

Les contreventements sont jugés stables au feu pendant 15 minutes (R15) sur la base des analyses suivantes :

- Les contreventements sont dimensionnés à froid (ELU froid) pour reprendre les efforts dus à l'action du vent avec un coefficient de pondération de 1,5 tandis qu'un coefficient de 0,2 est retenu pour la vérification au feu. Le niveau de chargement des contreventements à l'incendie est donc de $0,2/1,5 = 0,134$.
- La température de la courbe ISO 834 à 15 minutes est de 739 °C. Par conséquent, la température des éléments de structure reste inférieure à 739 °C. Le coefficient de réduction de la limite d'élasticité pour l'acier échauffé à 739 °C est de 0,18, soit supérieur au niveau de chargement.

7.6 Conclusions sur la résistance sous feu normalisé

Hormis les poutres PRS, l'ensemble des éléments de structure porteuse du bâtiment en objet de l'étude atteint le niveau R15 requis (résistance sous feu ISO 834).

8 COMPORTEMENT AU FEU REEL DE LA STRUCTURE

Cette section présente les résultats des analyses thermiques ainsi que la réponse structurale de la structure du bâtiment dans le cas des scénarios étudiés.

Sur la base des considérations ci-après, seules les files des portiques (poteaux et poutres PRS) jouant un rôle décisif sur les modes de ruine sont étudiées dans cette partie de comportement au feu réel :

- Les pannes et les contreventements assurent le niveau R15 (résistance 15 minutes sous feu normalisé ISO 834) ;
- Sur l'ensemble des scénarios étudiés, les niveaux de températures des gaz sont moins importants ou équivalents comparés aux niveaux de température de la courbe de feu normalisé ISO 834 pendant les 15 premières minutes. La tenue au feu réel des pannes et des contreventements est donc assurée pendant à minima 15 minutes ;
- La question de compatibilité entre le comportement au feu et l'évacuation des personnes ainsi que l'intervention des secours demeure donc dans le comportement au feu des portiques principaux.

8.1 SC1 : départ de feu dans le stockage rack du magasin 2

8.1.1 Puissance de l'incendie et action thermique sur la structure

Pour rappel, le scénario SC1 correspond à un départ de feu dans le magasin 2 comme le montre la figure suivante.

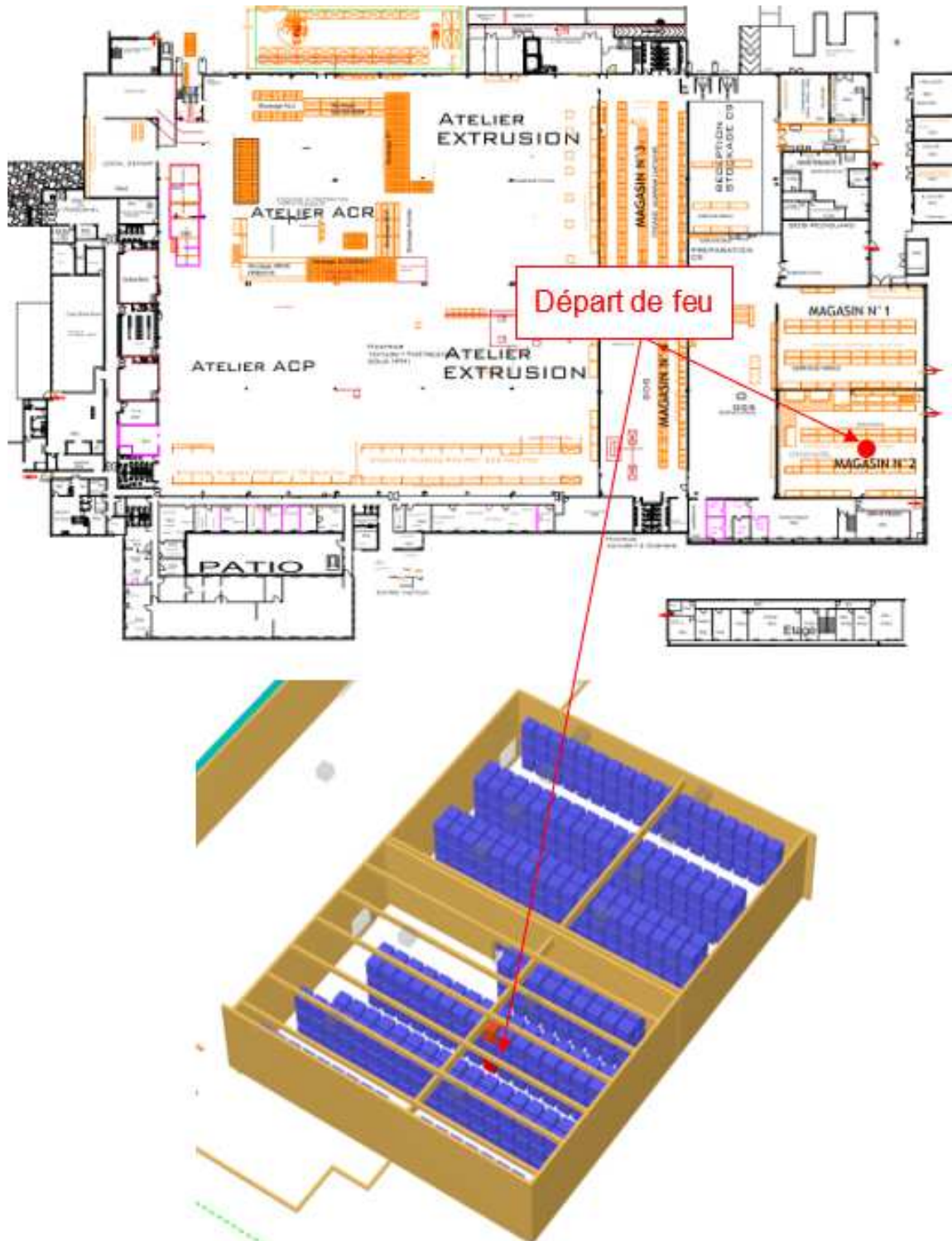


Figure 43 : Départ de feu du scénario SC1

La puissance de l'incendie du scénario SC1 est illustrée dans la figure suivante. Un phénomène de sous-ventilation est constaté à partir de 15 minutes environ et nécessite de considérer à partir de ce temps des hypothèses conservatrices afin de garantir le caractère pénalisant et représentatif du calcul (voir figure 49).

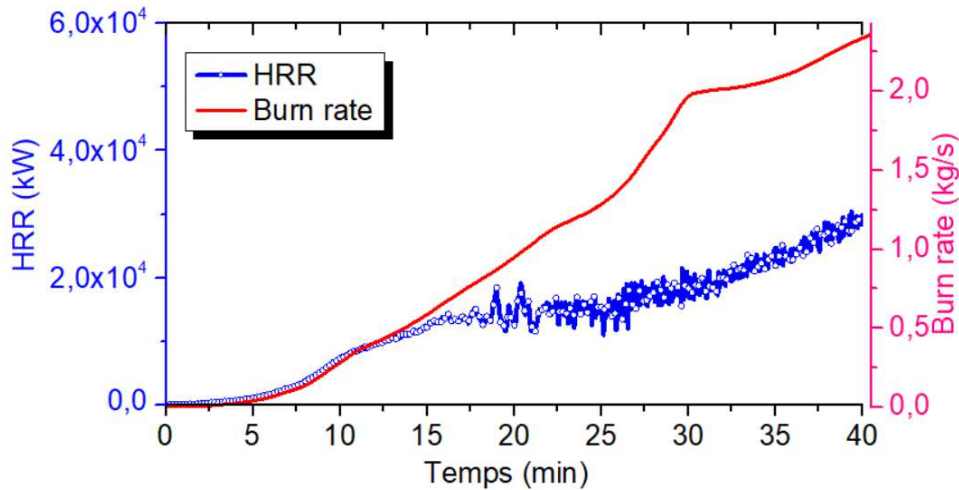


Figure 44 : Puissance de l'incendie - SC1

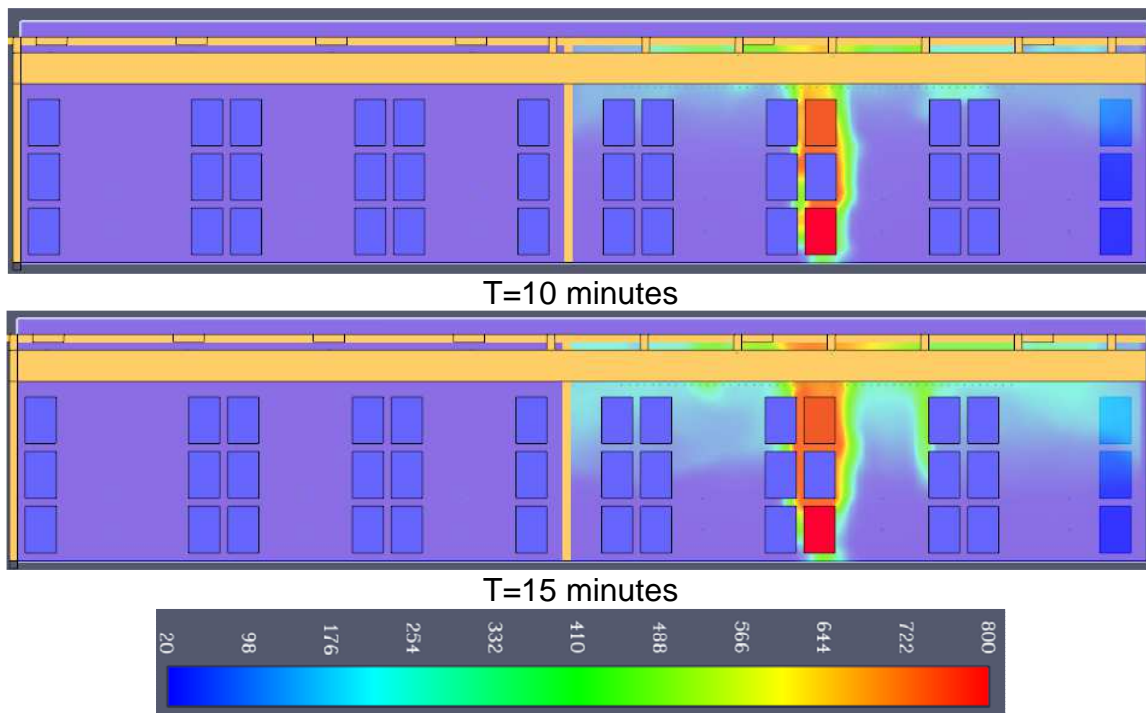


Figure 45 : Profils de températures d'une coupe traversant le foyer - SC1

L'évolution des températures des capteurs placés dans un rayon de 5 mètres, au niveau de la poutre PRS est présentée sur les figures suivantes.

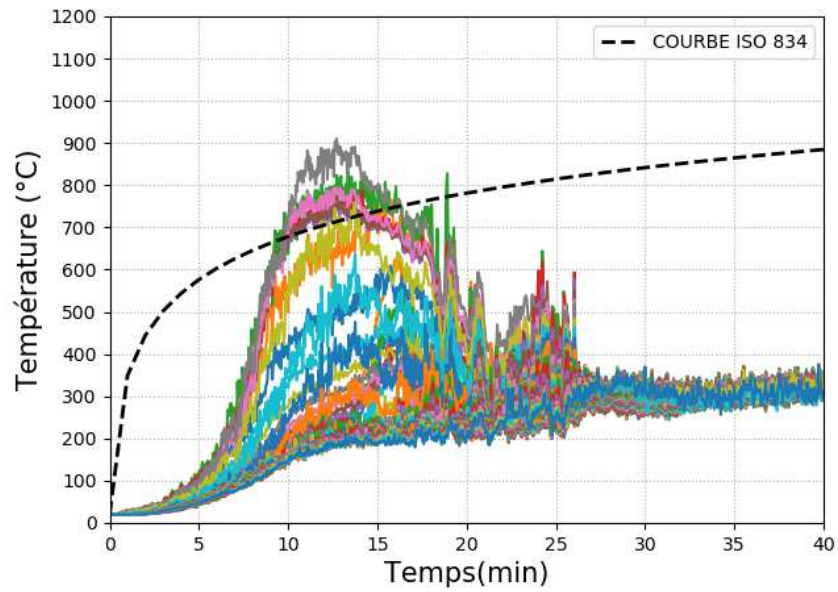


Figure 46 : Températures de gaz au niveau de la poutre PRS – SC1

Le portique étudié est le seul situé dans la zone des magasins 1 et 2. Il est repéré sur la figure suivante.

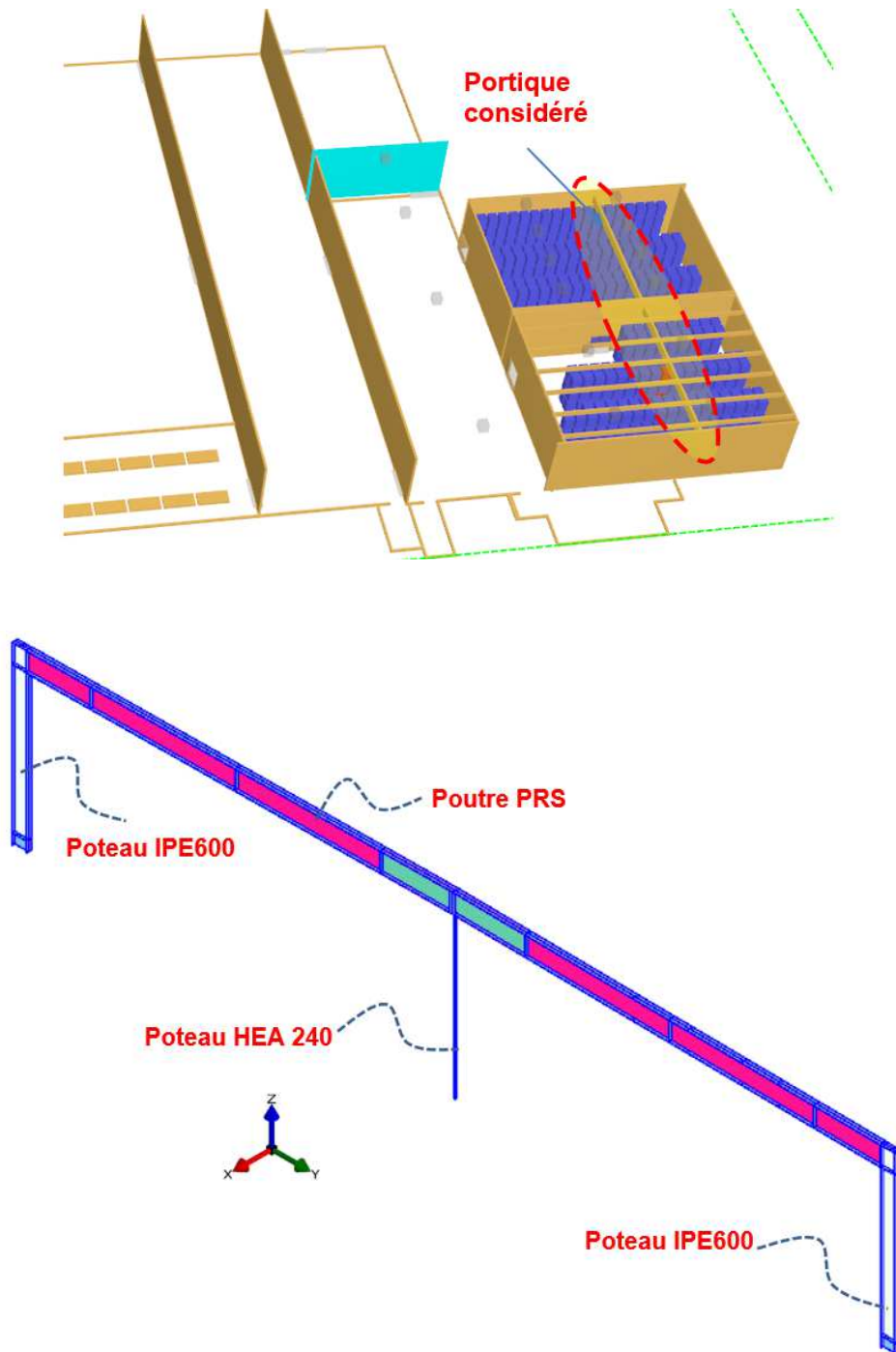


Figure 47 : Portique étudié dans le cas du scénario SC1

Compte tenu du départ de feu retenu, différentes zones de contraintes thermiques sont identifiées comme le montre la figure suivante.

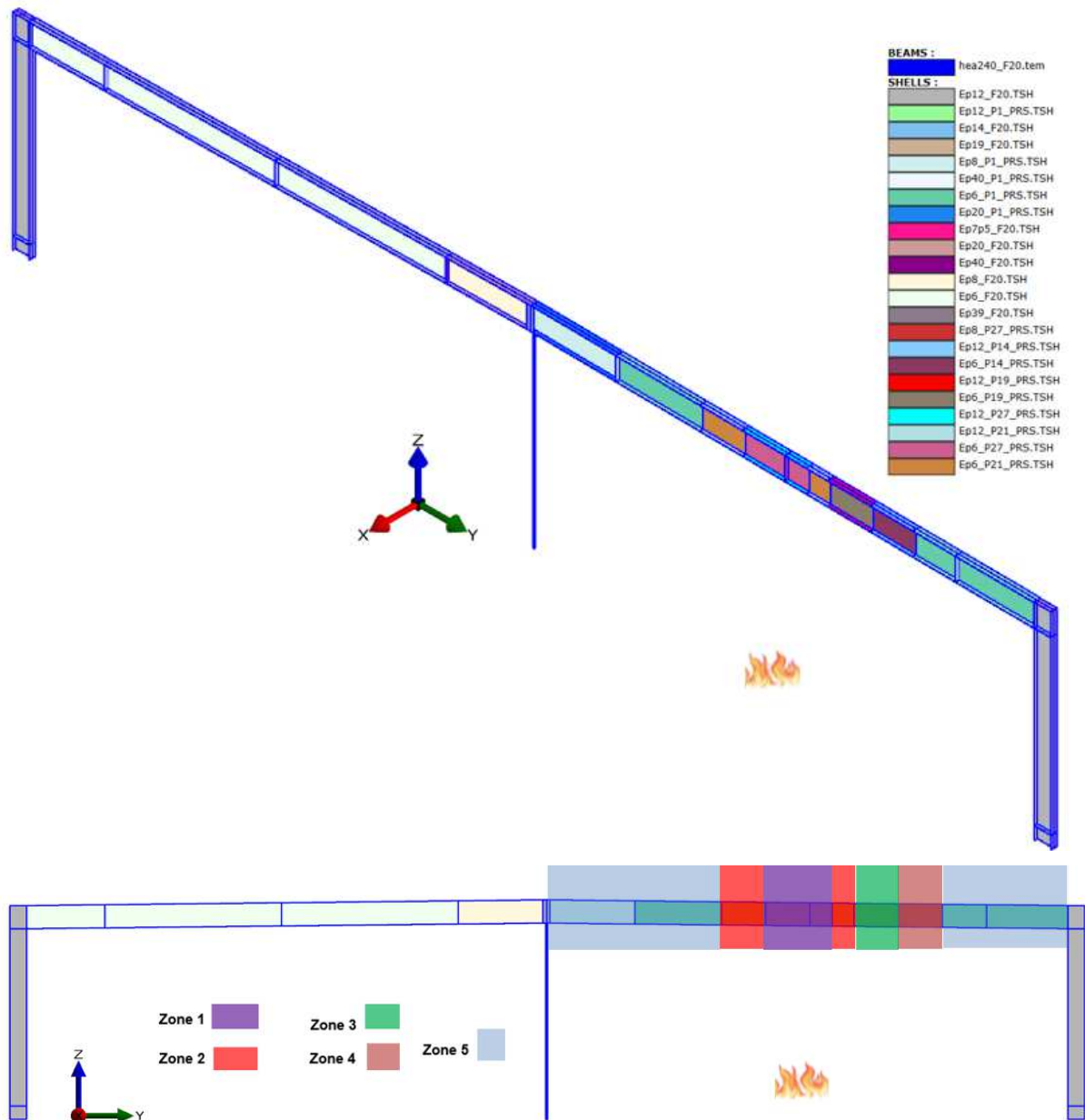


Figure 48 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC1

Les actions thermiques sur les zones définies sur la figure ci-avant sont présentées sur la figure suivante. Les éléments situés hors de ces zones sont considérés comme restant à froid.

Il est à noter que, dans une démarche sécuritaire, les actions thermiques sont maintenues à partir du moment de sous-ventilation jusqu'à la fin de l'analyse thermomécanique.

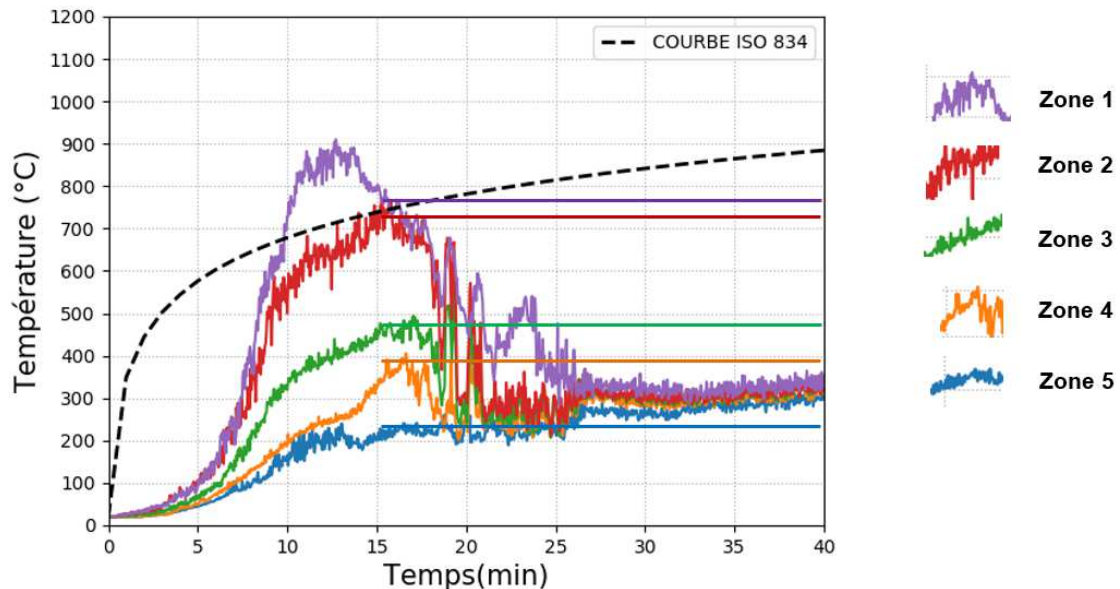


Figure 49 : Action thermique sur la structure

8.1.2 Modélisation de la réponse structurale

Les conditions aux limites suivantes considérées pour le modèle du portique dans le cas du scénario SC1 sont les mêmes présentées dans la section §7.3.

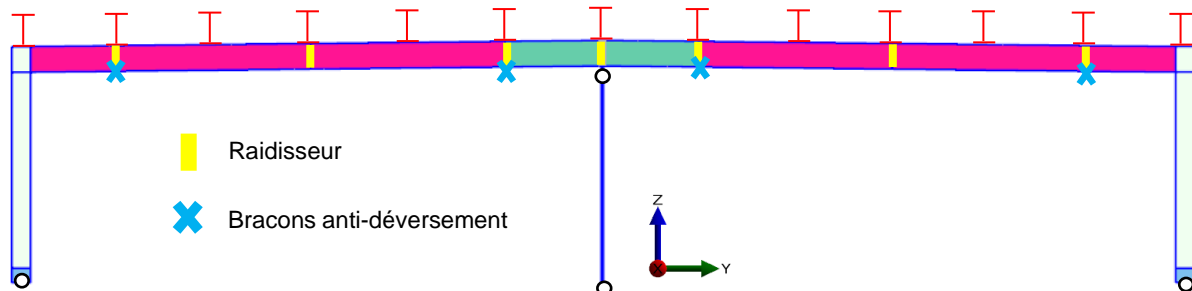


Figure 50 : Conditions aux limites - modèle portique magasins 1 et 2 - SC1

La figure suivante montre la réponse structurale du portique sous action thermomécanique dans le cas du scénario SC1.

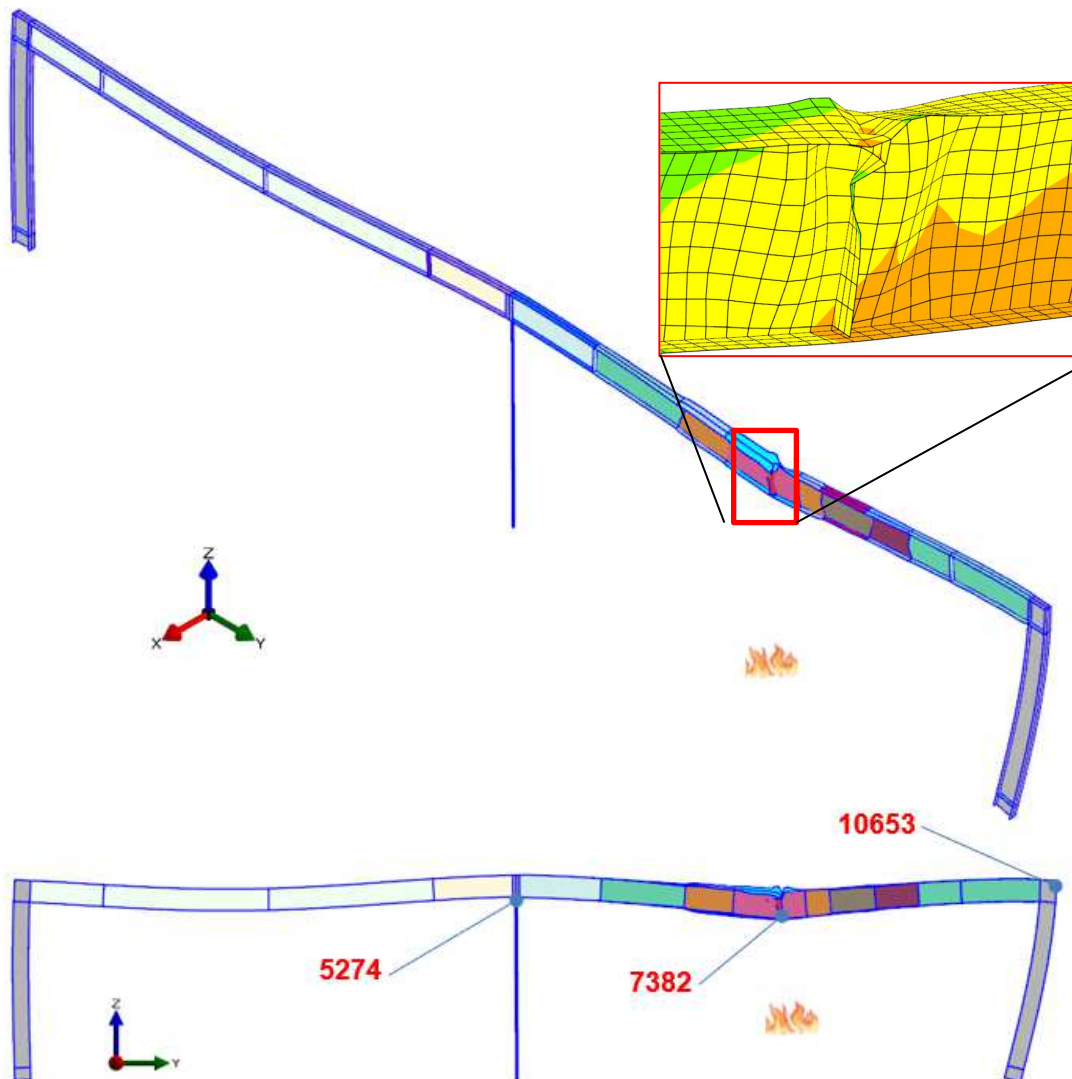


Figure 51 : Déformation visuelle du portique principal à 1046 s (exagérée : x20) - SC1

Les déplacements des points identifiés sur la figure ci-avant sont présentés dans les figures suivantes.

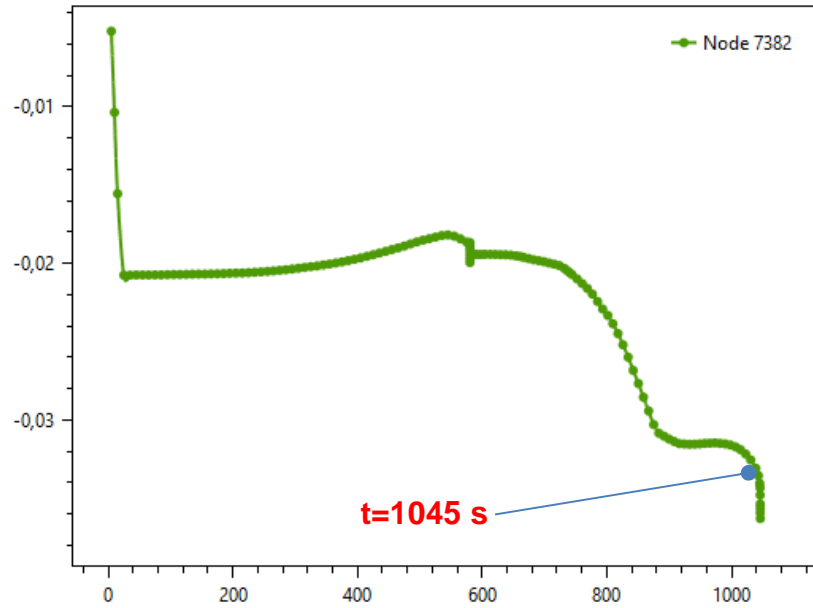


Figure 52 : Déplacement selon Z du nœud 7382 – SC1

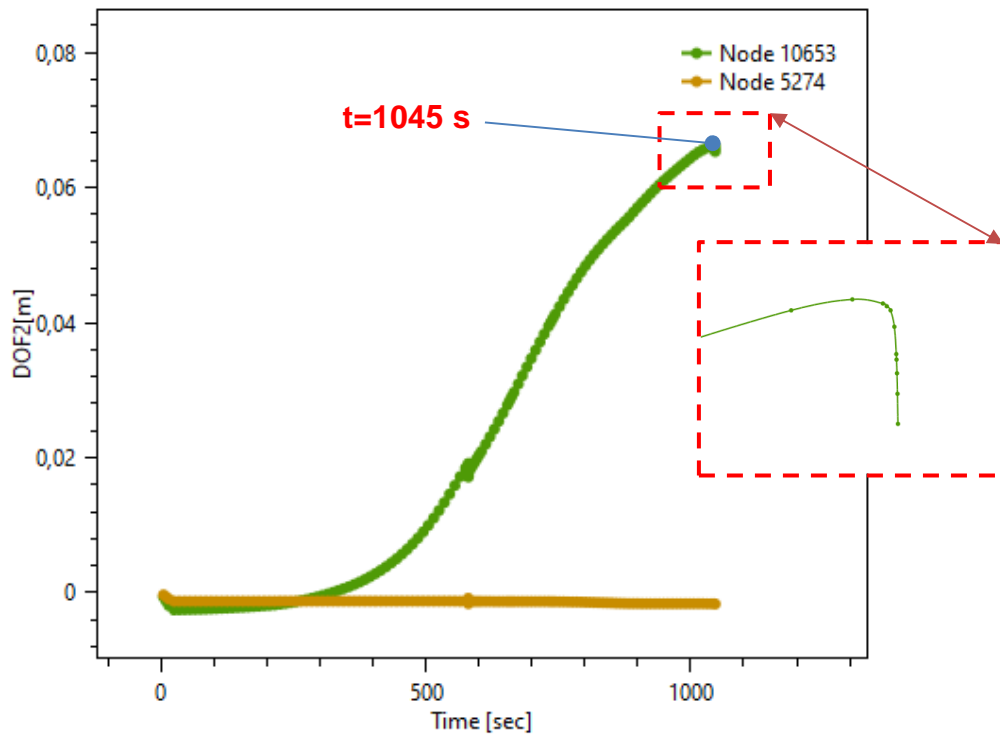


Figure 53 : Déplacement selon Y des nœuds 10653 et 5274 - SC1

Les résultats montrent que le portique assure une stabilité au feu réel pendant 17 minutes environ. A 17 minutes 26 s, la perte de résistance de l'acier dans la zone au droit du foyer conduit à la ruine de la poutre PRS (formation d'une rotule plastique à mi-travée de la poutre + voilement local).

Les déplacements des têtes de poteaux selon l'axe Y permettent de conclure que la structure a tendance à s'effondrer vers l'intérieur après une phase de poussée (liée à la dilatation thermique de la poutre).

8.1.3 Synthèse des résultats du comportement au feu de la structure dans le cas du scénario SC1

La tenue au feu réel : environ 17 minutes

Risque de ruine vers l'extérieur : écarté

Le comportement au feu réel de la structure dans le cas du scénario SC1 est **compatible avec l'évacuation en sécurité des personnes et l'intervention des secours.**

8.2 SC2 : départ de feu au niveau des racks de l'atelier

8.2.1 Puissance de l'incendie et action thermique sur la structure

Pour rappel, le scénario SC2 correspond à un départ de feu au pied d'un rack de stockage des plaques PVC dans la zone des ateliers comme le montre la figure suivante.



Figure 54 : Départ de feu du scénario SC2

La puissance de l'incendie du scénario SC2 est illustrée dans la figure suivante. Un phénomène de sous-ventilation est constaté à partir de 20 minutes environ.

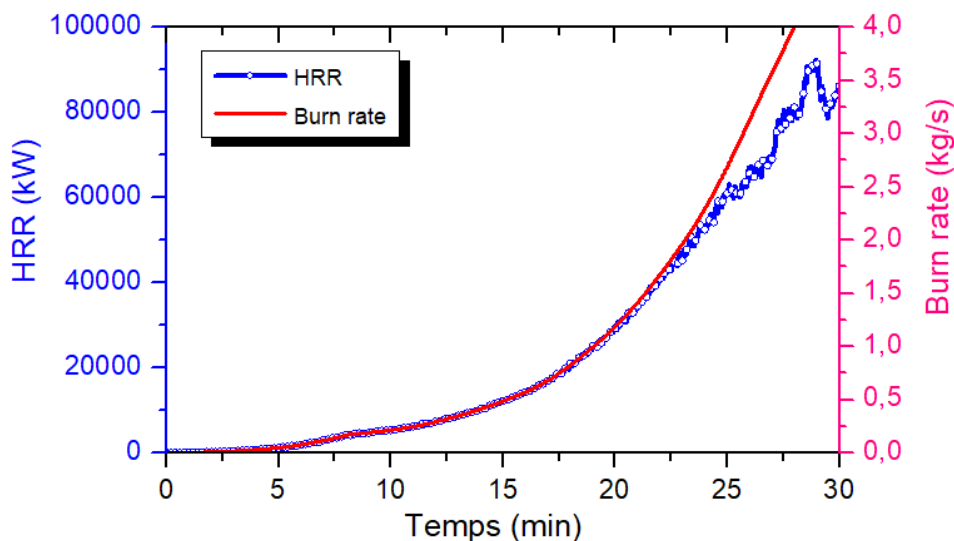


Figure 55 : Puissance de l'incendie - SC2

L'analyse du comportement au feu de la structure de l'entrepôt porte sur l'analyse du portique le plus sollicité thermiquement. Cette file est repérée sur la figure suivante.

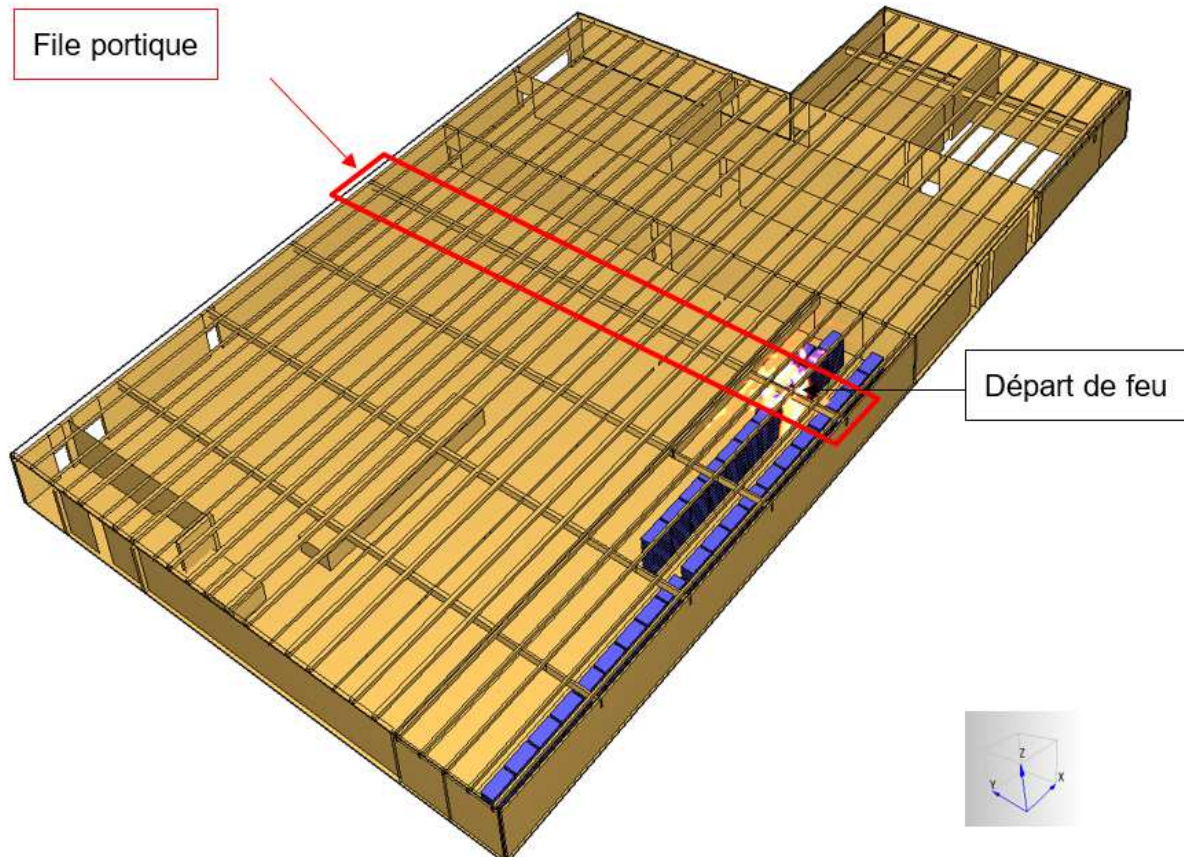


Figure 56 : File de structure retenue pour l'analyse thermomécanique – SC2

Sur la base de la cinétique de l'incendie simulé ainsi que des mesures obtenues par les capteurs numériques de température, les différentes zones de contraintes thermiques ainsi que l'action thermique retenue pour chaque zone sont déterminées et illustrées sur les figures suivantes.

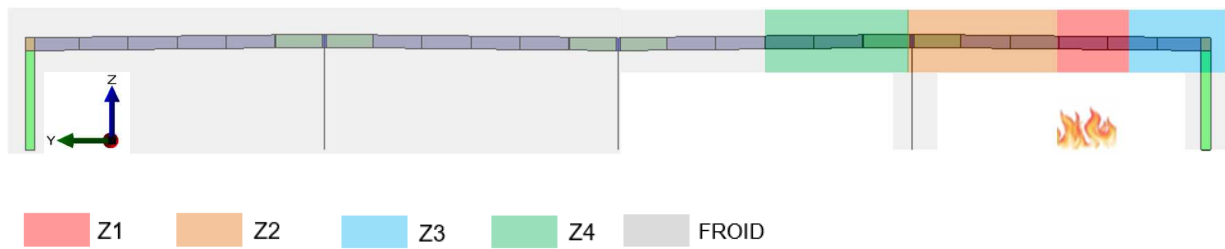


Figure 57 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC2

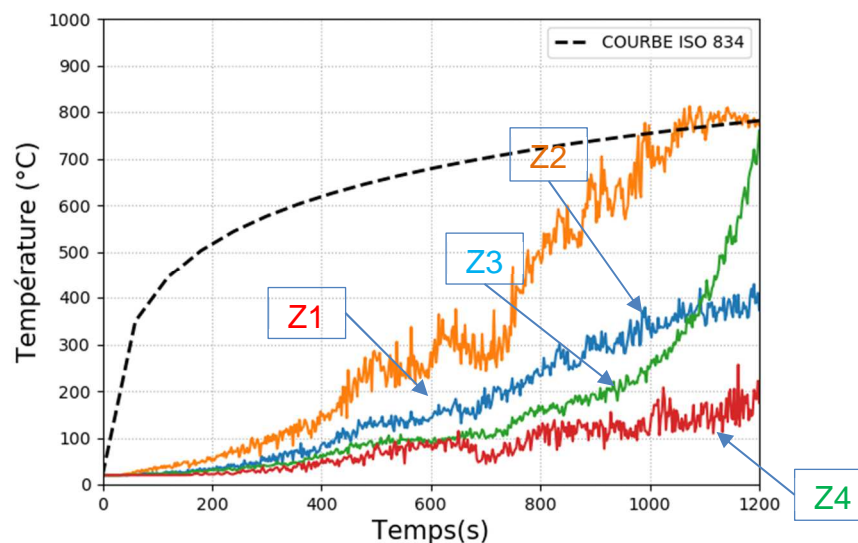


Figure 58 : Action thermique sur le portique principal (file 7) - SC2

Il convient également de noter que dans le cas où la première ruine n'est pas observée pendant les 20 premières minutes (avant que le phénomène de sous-ventilation se produise), les actions thermiques seront maintenues à partir de ce temps jusqu'à la fin des calculs (démarche sécuritaire).

Les actions des zones de 1 à 4 sont utilisées pour évaluer l'agression thermique des éléments de structure en prenant en compte des propriétés thermiques de l'acier conformément à la norme Eurocode 3, partie 1-2 [3].

La modélisation thermomécanique de la structure de l'entrepôt est réalisée à l'aide du code SAFIR (code à éléments finis). Les résultats de cette analyse sont présentés dans les sections ci-après.

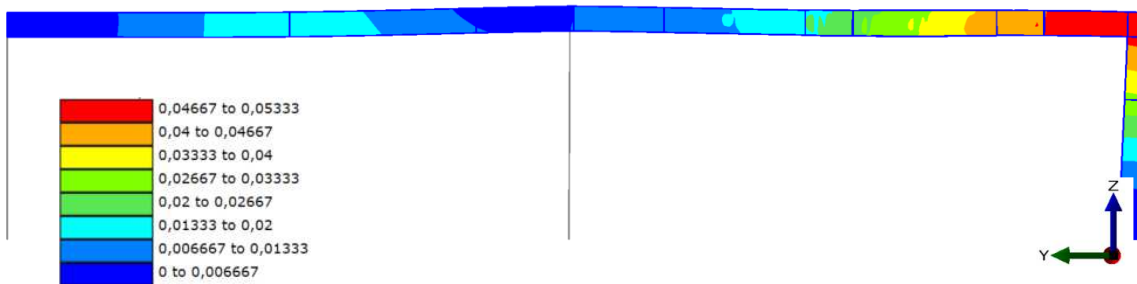
8.2.2 Modélisation de la réponse structurale du portique file 7

Pour gagner du temps de calcul, seule la moitié du portique est modélisée. L'autre moitié peu agressive par l'incendie (côté entre la file A et la file C) est représentée par un blocage de déplacement selon l'axe Y au niveau de la tête du poteau située dans la file C. Cette hypothèse est dimensionnante car le blocage amplifie les effets de second ordre sur la poutre, notamment dans la zone au droit du foyer.

Les autres conditions aux limites sont similaires à celles présentées dans la section § 7.2.

Le résultat de la modélisation thermomécanique du portique est présenté ci-dessous. Les figures suivantes illustrent la déformation visuelle à différents instants, à savoir à 905 s et 1015 s (moment de ruine).

t = 905s



t = 1015s

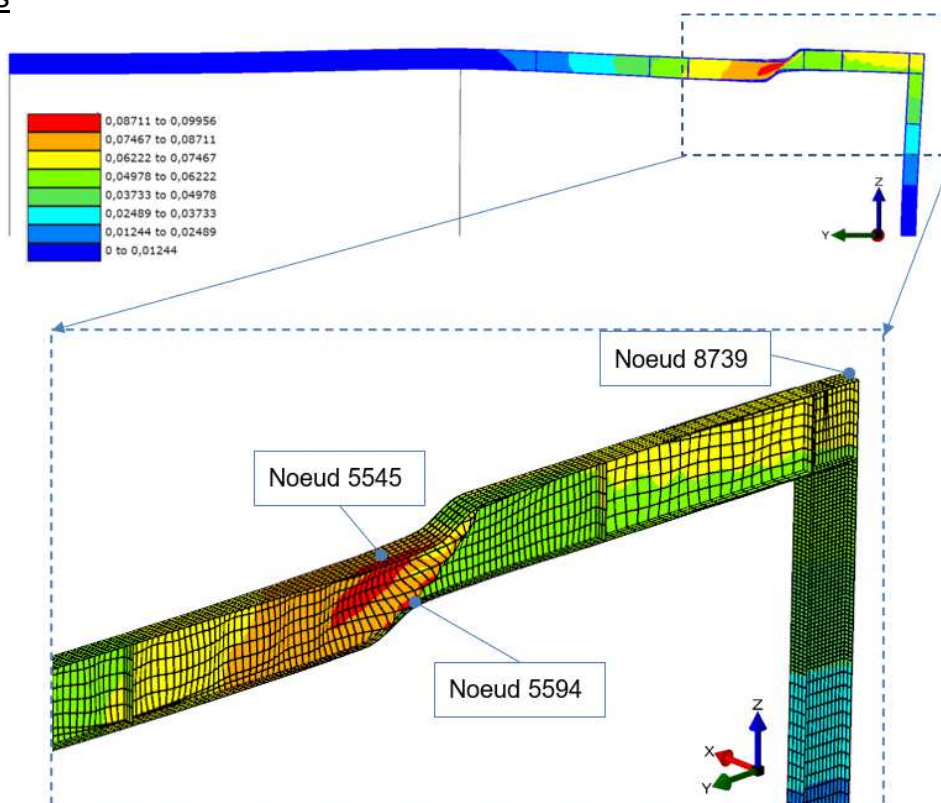
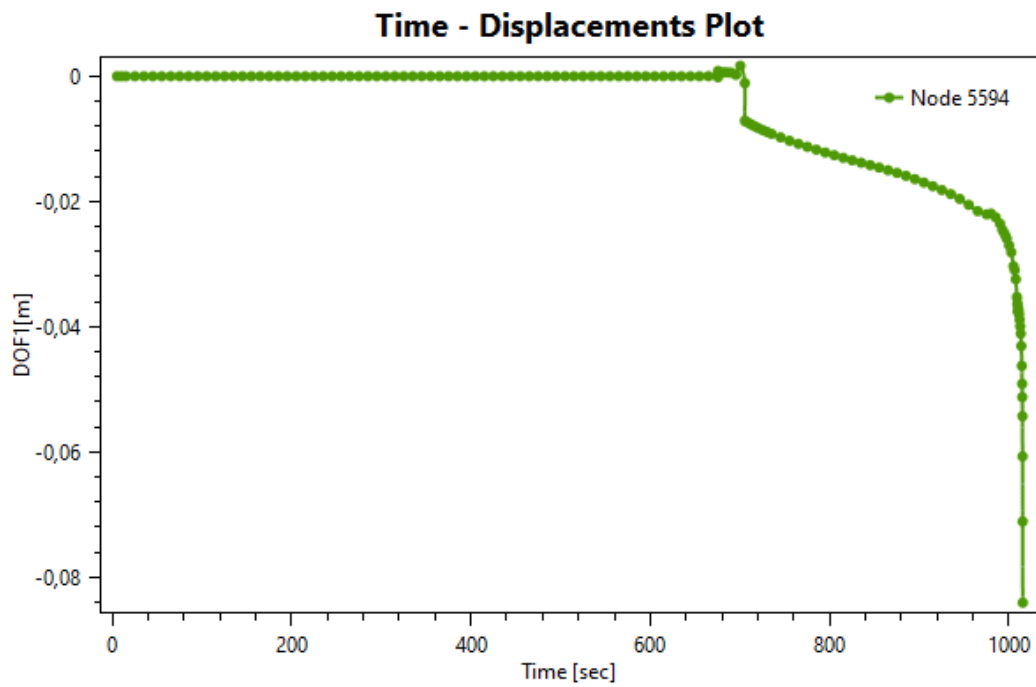
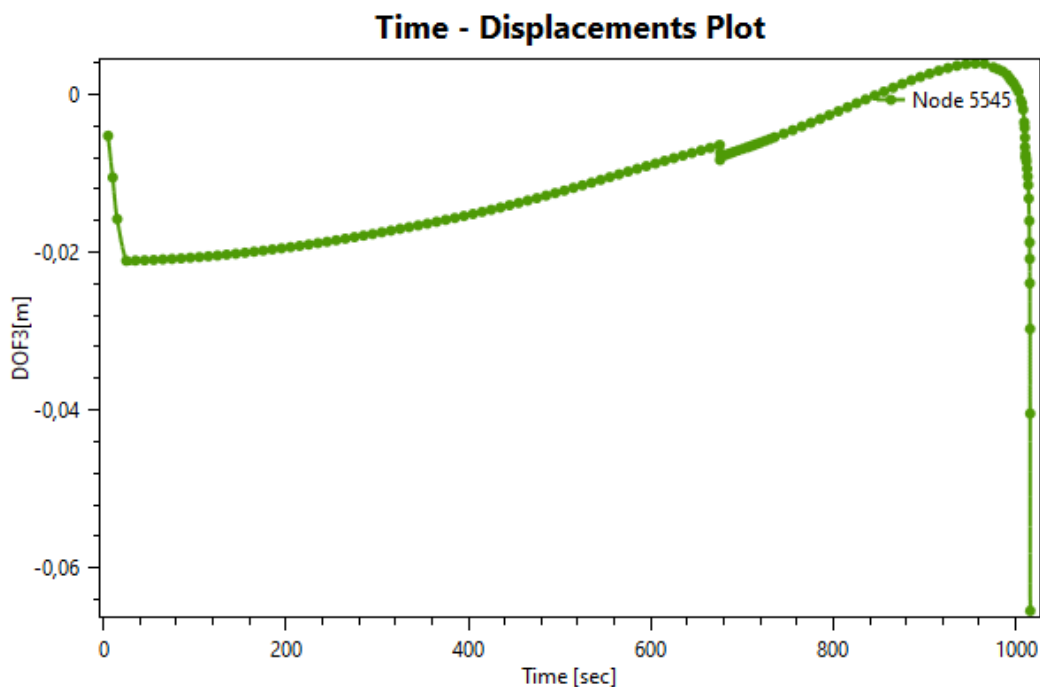


Figure 59 : Déformation visuelle du portique (exagéré de 5 fois) – SC2

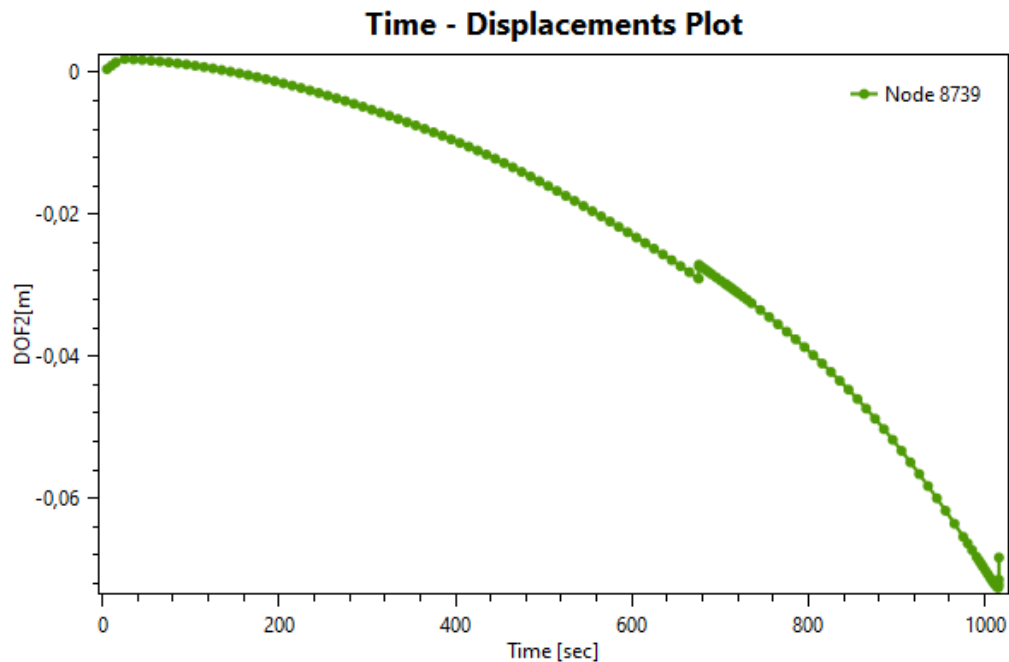
Les déplacements des nœuds indiqués sur la figure 59 sont illustrés sur les figures ci-après.



Déplacement selon X du nœud 5594



Déplacement selon Z du nœud 5545



Déplacement selon Y du nœud 8793

Figure 60 : Déplacement des nœuds indiqués dans la figure 59 – SC2

On constate que la déformée de la poutre PRS se produit principalement dans la zone au droit du foyer. Le phénomène de voilement local a été observé à 700 s environ et s'est développé pour conduire à un phénomène de déversement à 1015 s. La poutre perd donc sa stabilité à ce moment.

Le déplacement selon Y de la tête d'un poteau de rive montre la tendance de l'effondrement de la structure vers l'intérieur après une phase de poussée due à la dilatation thermique de la poutre principale.

8.2.3 Synthèse des résultats du comportement au feu de la structure dans le cas du scénario SC2

La tenue au feu réel : 16 minutes 55 s

Risque de ruine vers l'extérieur : écarté

Le comportement au feu réel de la structure dans le cas du scénario SC2 est **compatible avec l'évacuation en sécurité des personnes et l'intervention des secours.**

8.3 SC3 : départ de feu au niveau de la mezzanine centrale de l'atelier (mezzanine 1)

8.3.1 Puissance de l'incendie et action thermique sur la structure

Le départ de feu du scénario SC3 est rappelé sur la figure suivante.

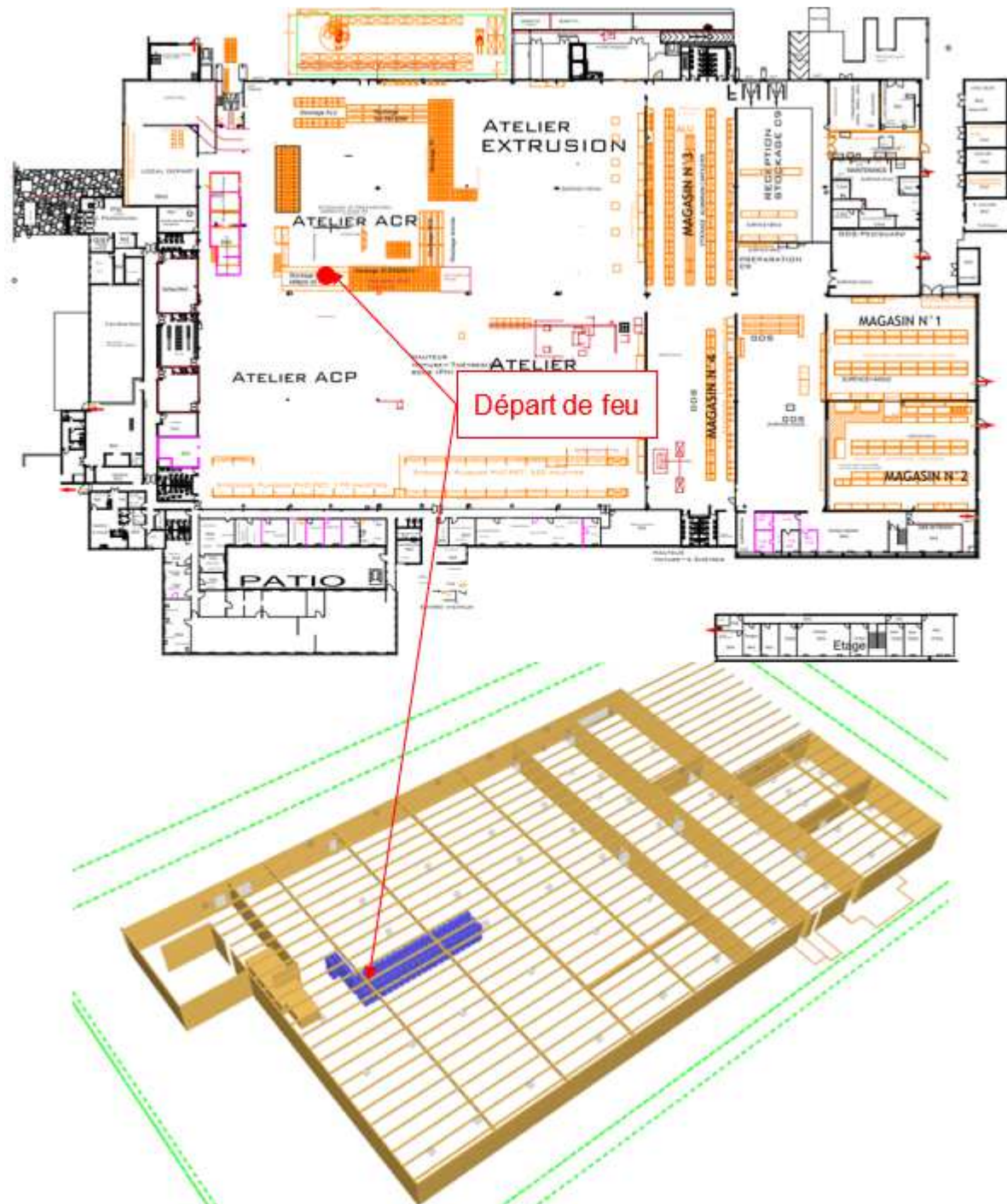


Figure 61 : Départ de feu du scénario SC3

La puissance de l'incendie du scénario SC3 est illustrée dans la figure suivante. Le phénomène de sous-ventilation n'est pas observé pendant le temps de simulation.

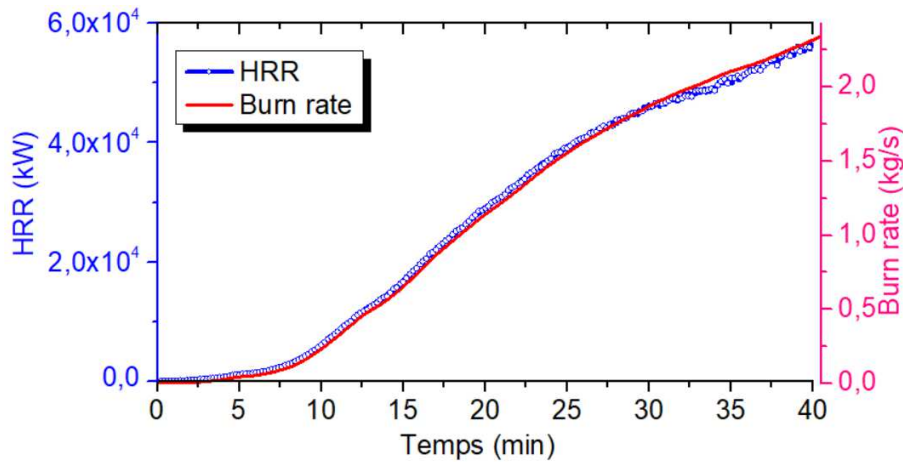


Figure 62 : Puissance de l'incendie – SC3

Les profils de températures selon des coupes traversant le foyer sont présentés dans les figures suivantes.

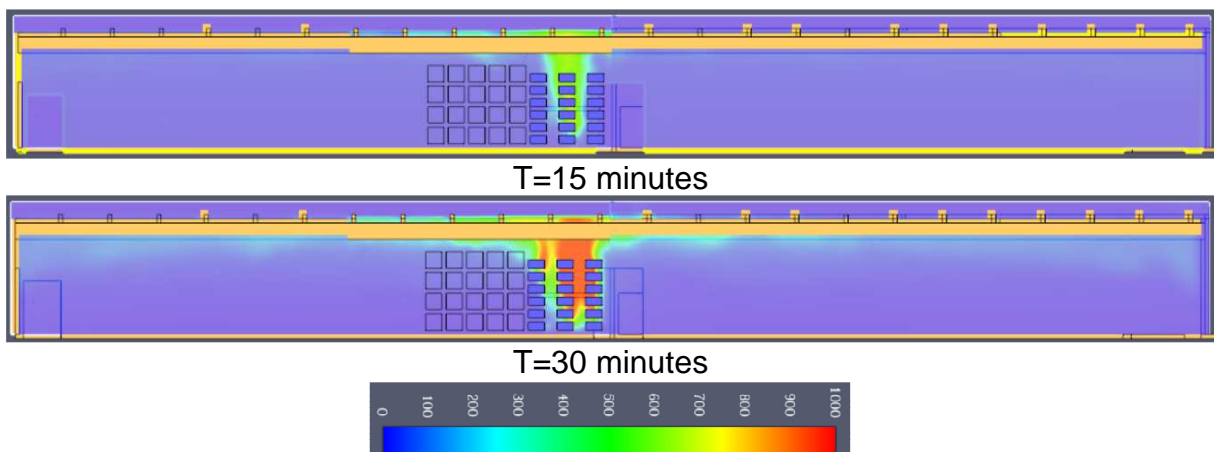


Figure 63 : Profils de températures selon une coupe transversale - SC3

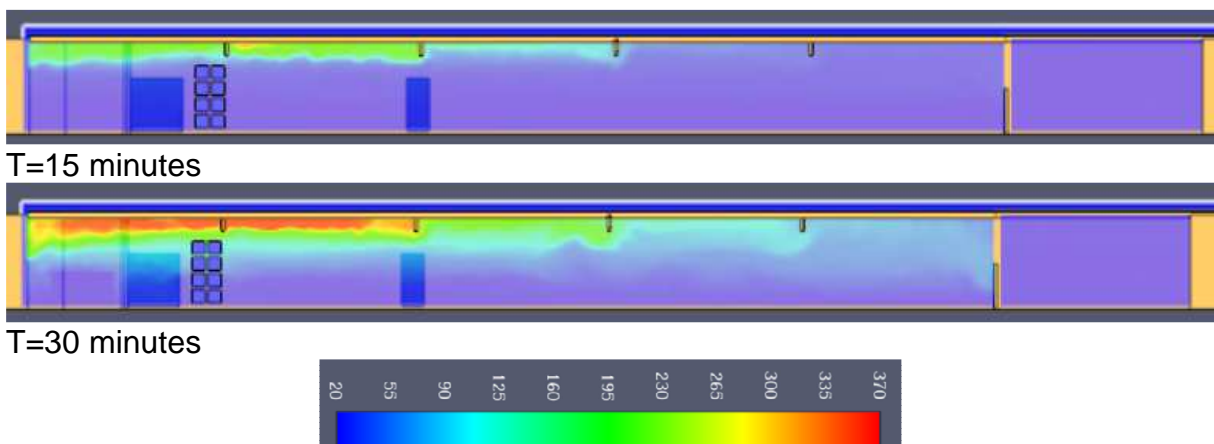


Figure 64 : Profil de températures selon une coupe longitudinale - SC3

Sur la base des profils de température présentés sur les figures ci-avant ainsi que des mesures obtenues par les capteurs numériques de température, les différentes zones de contraintes thermiques ainsi que l'action thermique retenue pour chaque zone sont déterminées et illustrées sur les figures suivantes.

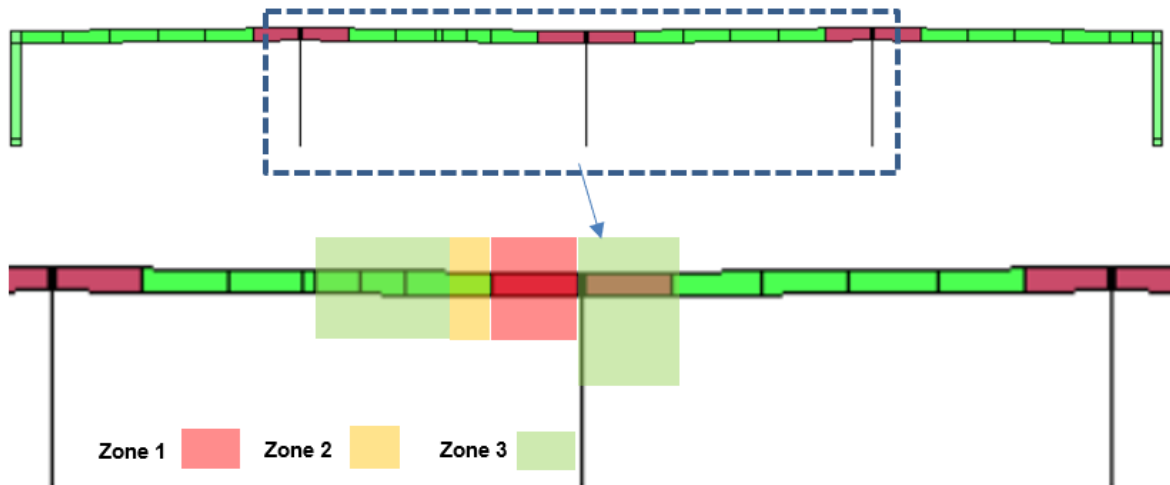


Figure 65 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC3

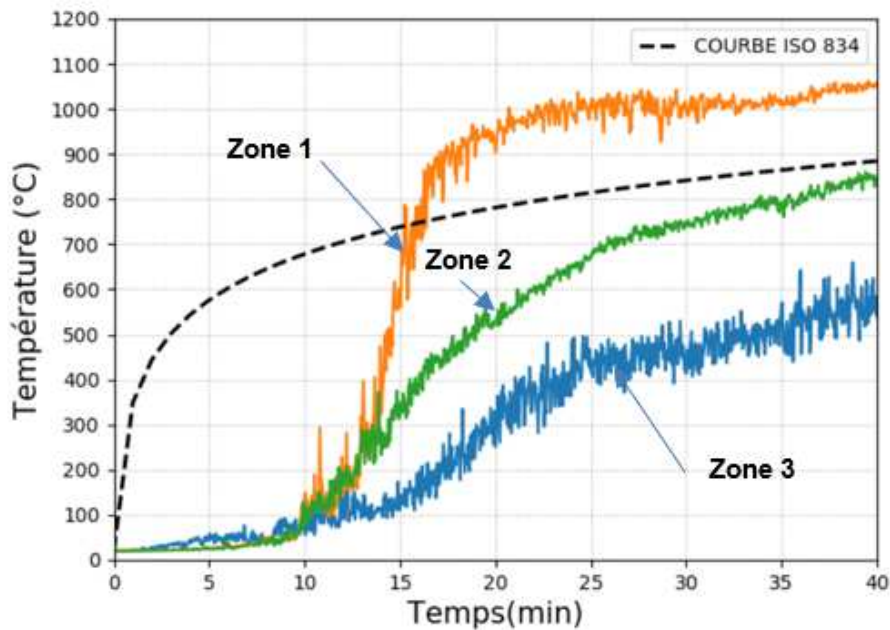


Figure 66 : Action thermique sur le portique principal (file 4) – SC3

8.3.2 Modélisation de la réponse structurale du portique file 4

La file complète du portique le plus sollicité thermiquement est considéré dans le modèle comme le montre la figure suivante.

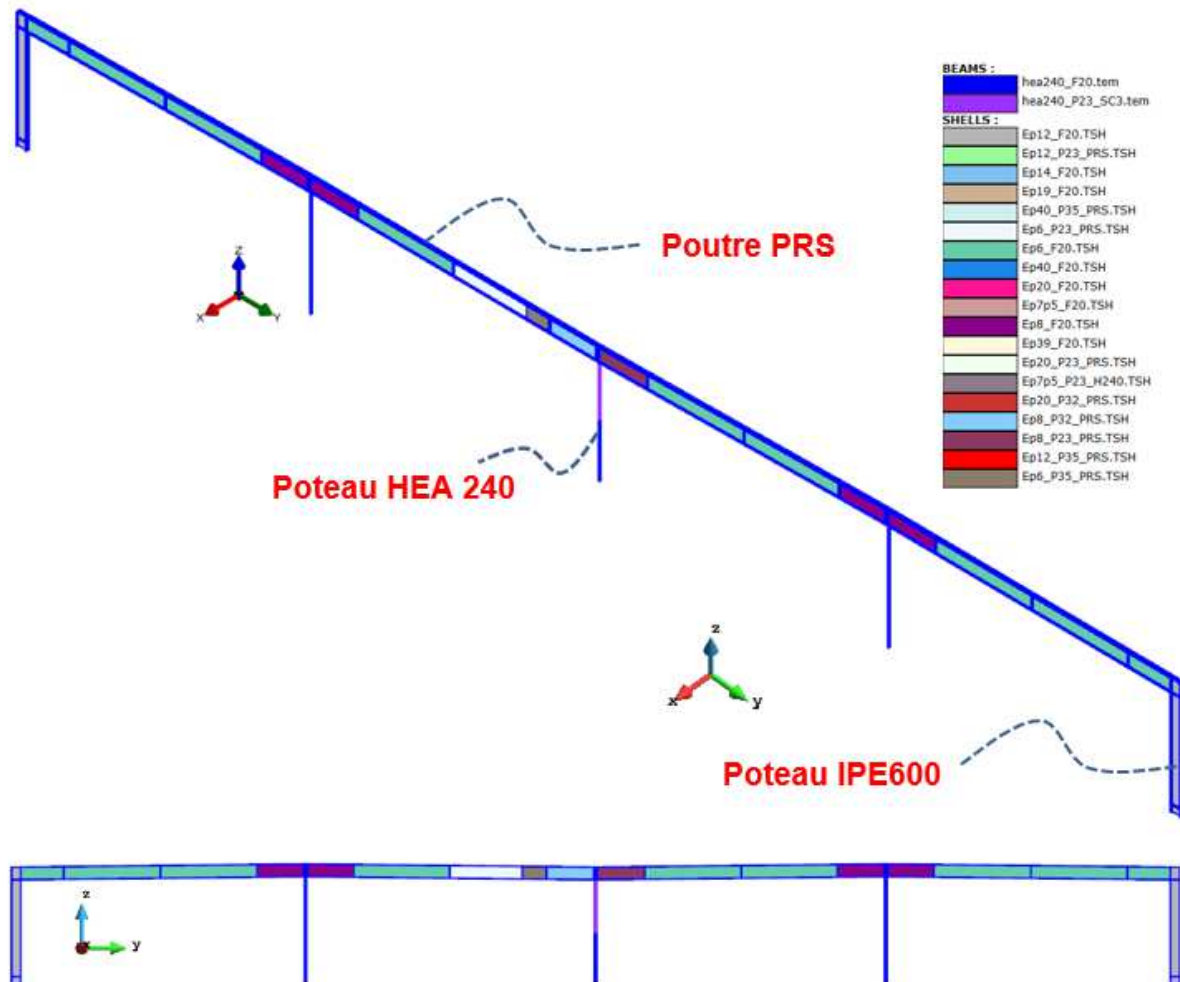


Figure 67 : Modèle du portique courant file 4 - SC3

La déformation visuelle du portique est présentée dans la figure suivante.

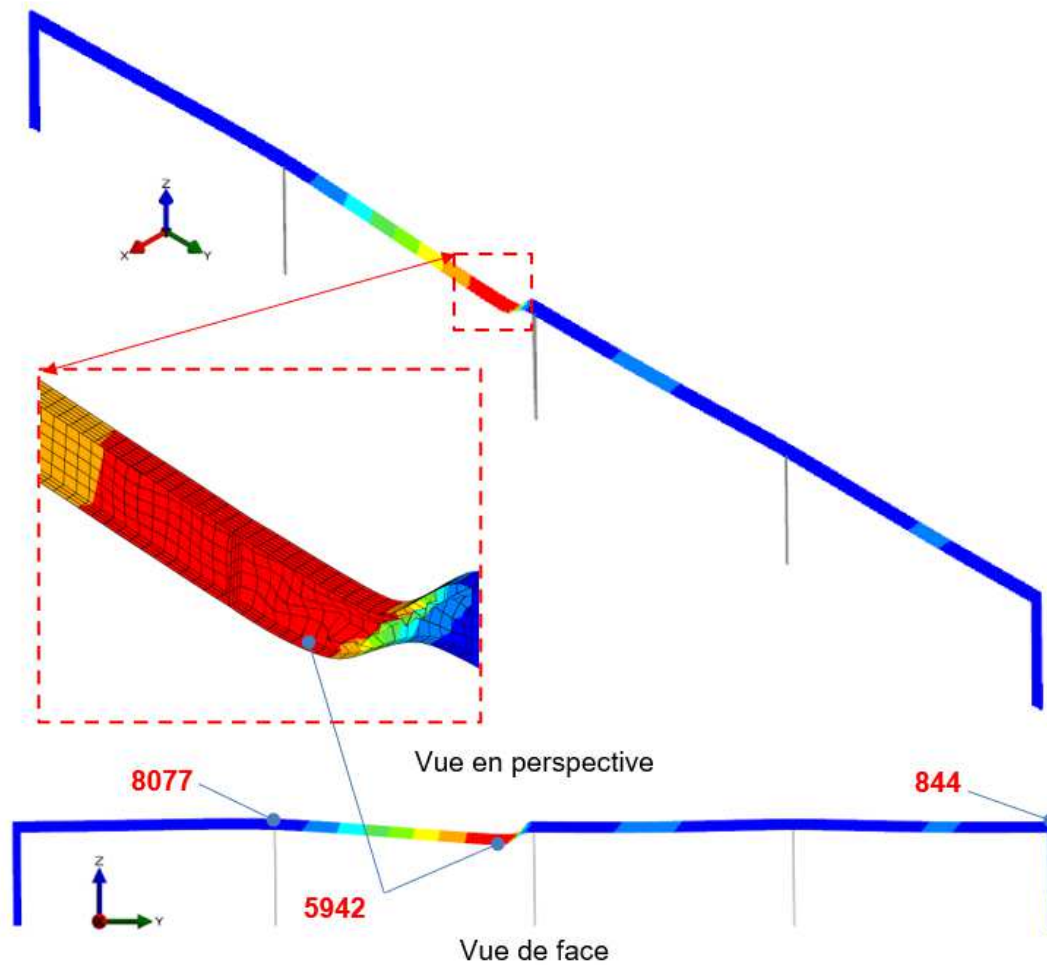


Figure 68 : Réponse structurale du portique à $t=1127$ s (exagéré : x3) - SC3

Les déplacements des points indiqués sur la figure ci-avant sont présentés dans les figures suivantes.

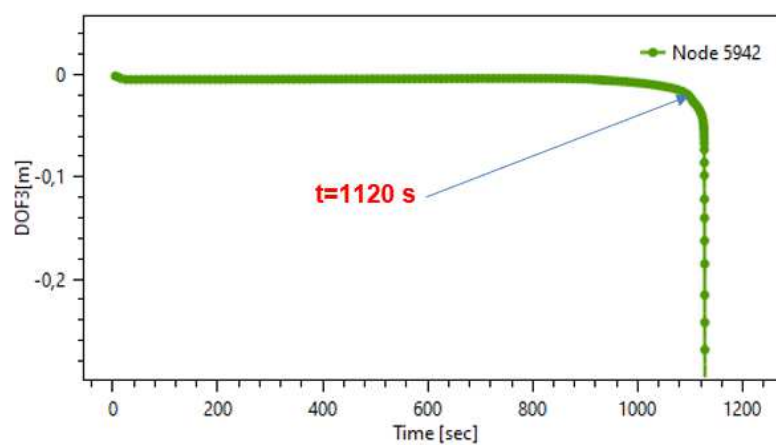


Figure 69 : Déplacement selon Z du nœud 5942 – SC3

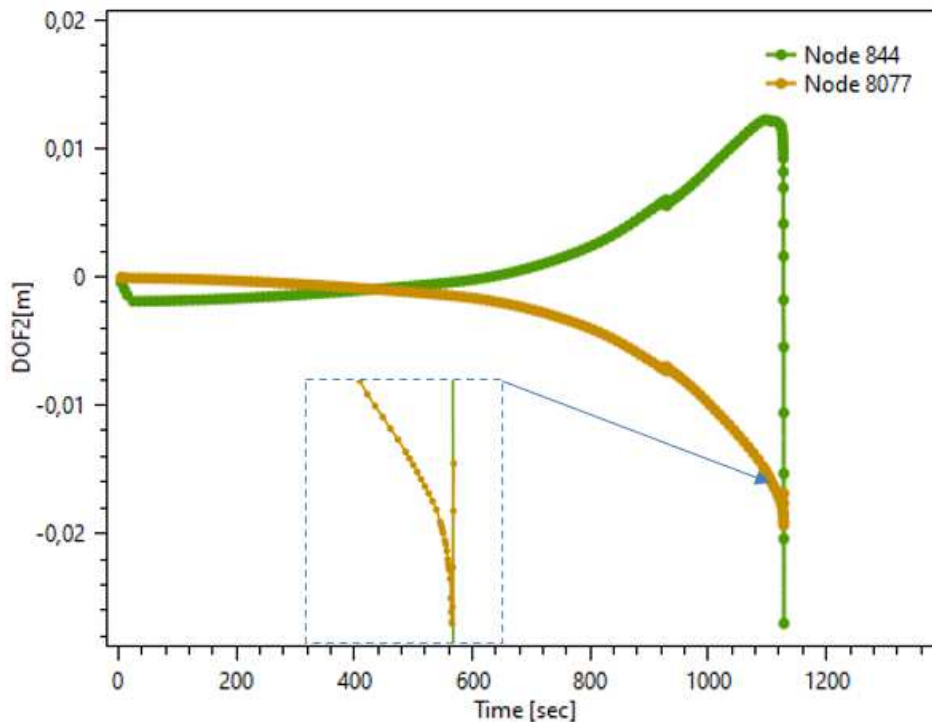


Figure 70 : Déplacement selon Y des nœuds 844 et 8077- SC3

On constate que la déformée de la poutre PRS se produit principalement dans la zone au droit du foyer. Les poteaux restent stables pendant toute la durée du calcul.

La poutre PRS perd sa résistance à 1120 secondes et entraîne la ruine du portique. Les déplacements horizontaux des nœuds 844 et 8077 montrent une tendance à l'effondrement vers l'intérieur du bâtiment.

8.3.3 Synthèse des résultats du comportement au feu de la structure dans le cas du scénario SC3

La tenue au feu réel : 18 minutes 40 s

Risque de ruine vers l'extérieur : écarté

Le comportement au feu réel de la structure dans le cas du scénario 3 est **compatible avec l'évacuation en sécurité des personnes et l'intervention des secours.**

8.4 SC4 : départ du feu au niveau du rack à proximité de la mezzanine 1

8.4.1 Puissance de l'incendie et action thermique sur la structure

Le départ de feu du scénario SC4 est rappelé sur la figure suivante.

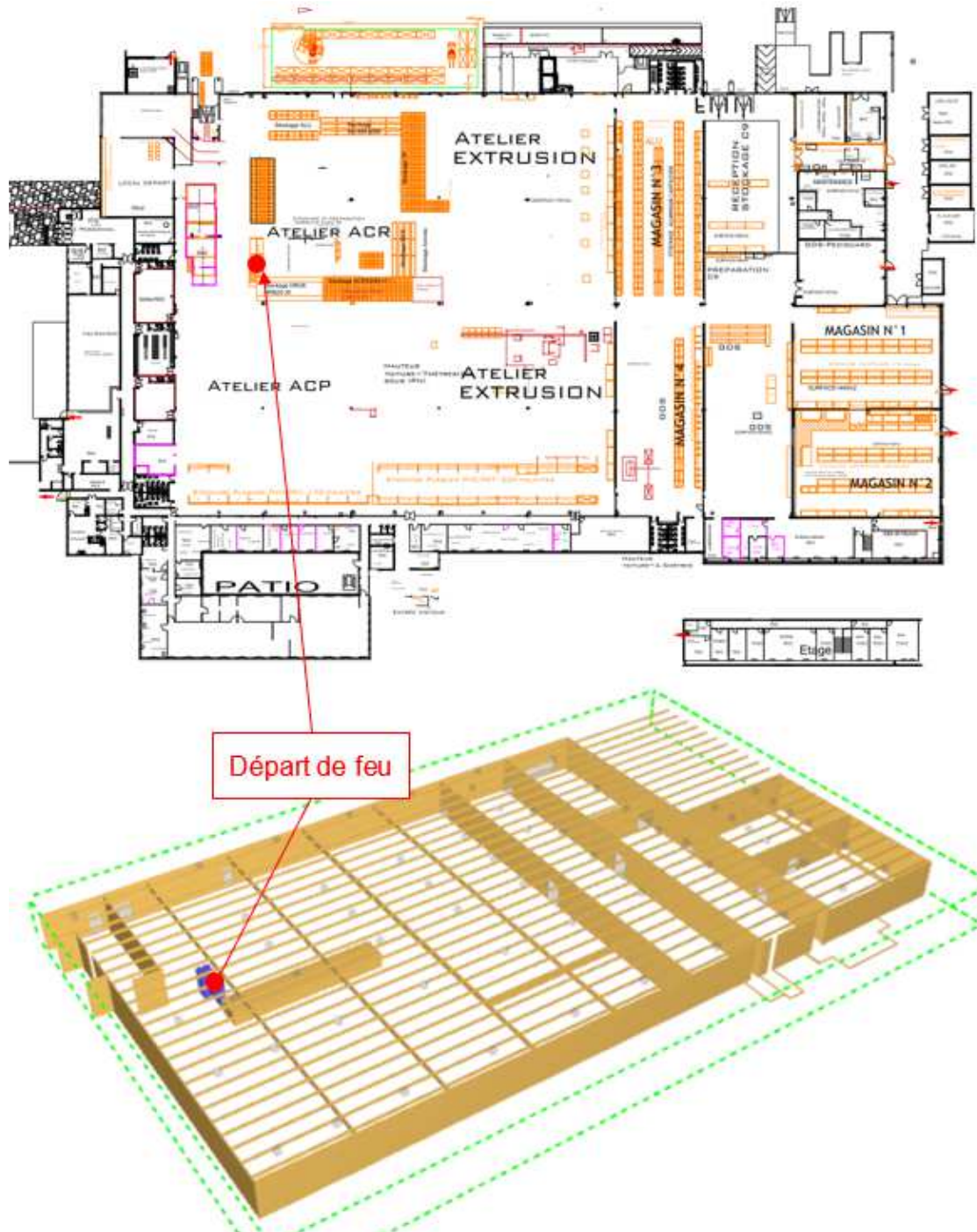


Figure 71 : Départ de feu du scénario SC4

La puissance de l'incendie du scénario SC4 est illustrée dans la figure suivante. Le phénomène de sous-ventilation n'est pas observé pendant le temps de simulation.

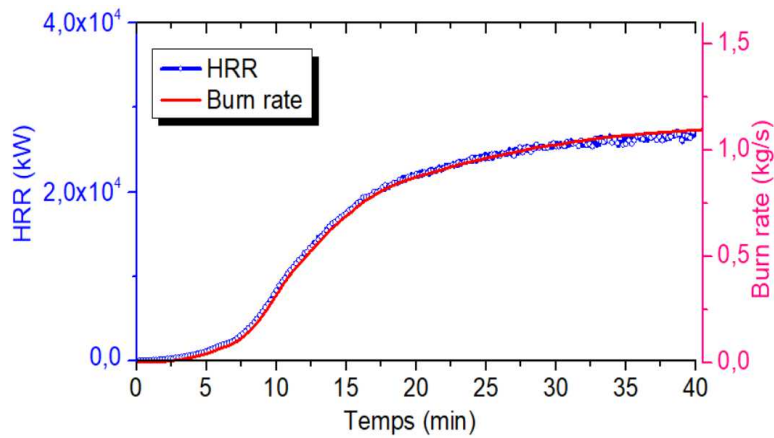


Figure 72 : Puissance de l'incendie – SC4

Les profils de températures selon des coupes traversant le foyer sont présentés dans les figures suivantes.

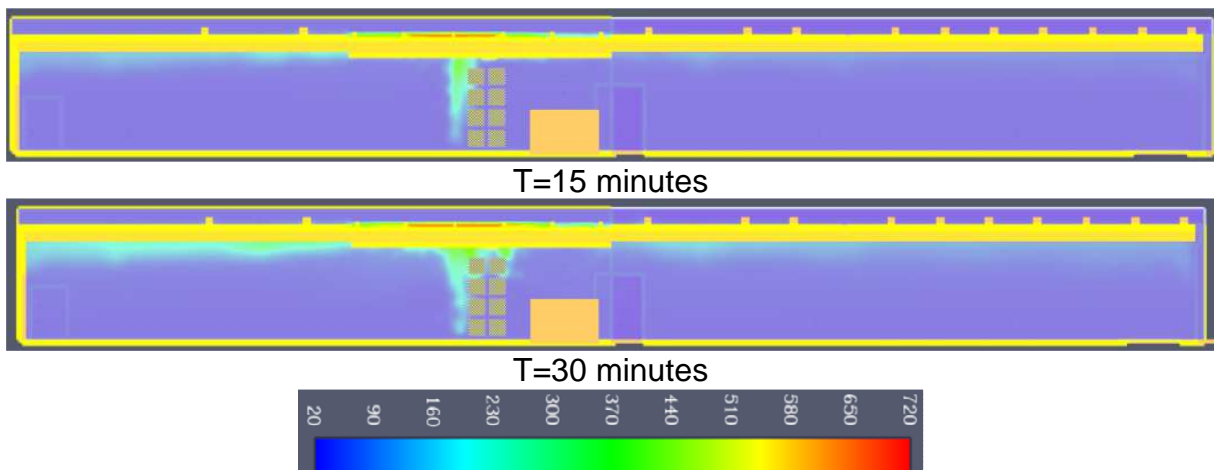


Figure 73 : Profil de températures selon une coupe transversale – SC4

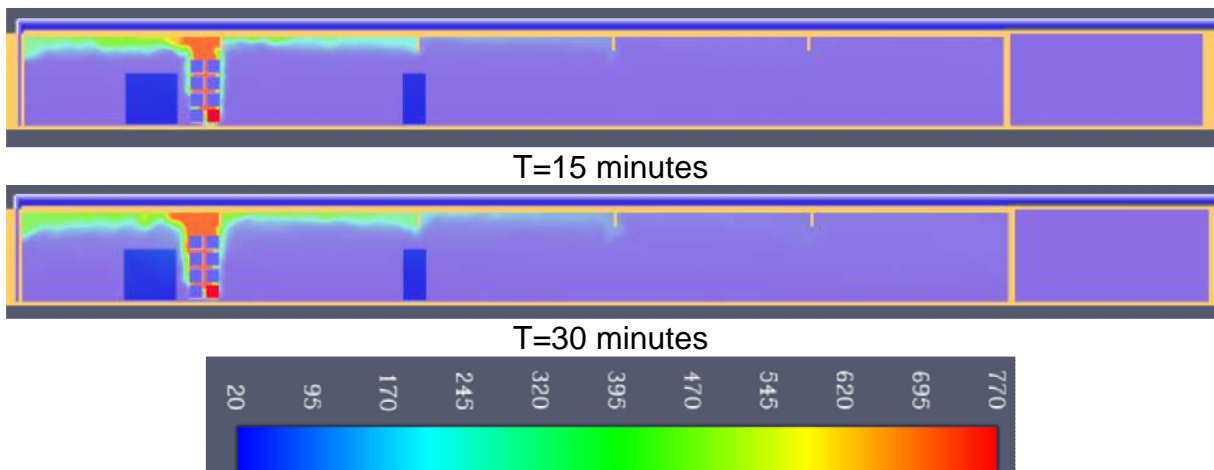


Figure 74 : Profil de température selon une coupe longitudinale – SC4

Sur la base des profils de température présentés sur les figures ci-avant ainsi que des mesures obtenues par les capteurs numériques de température, les différentes zones de contraintes thermiques ainsi l'action thermique retenue pour chaque zone sont déterminées et illustrées sur les figures suivantes.

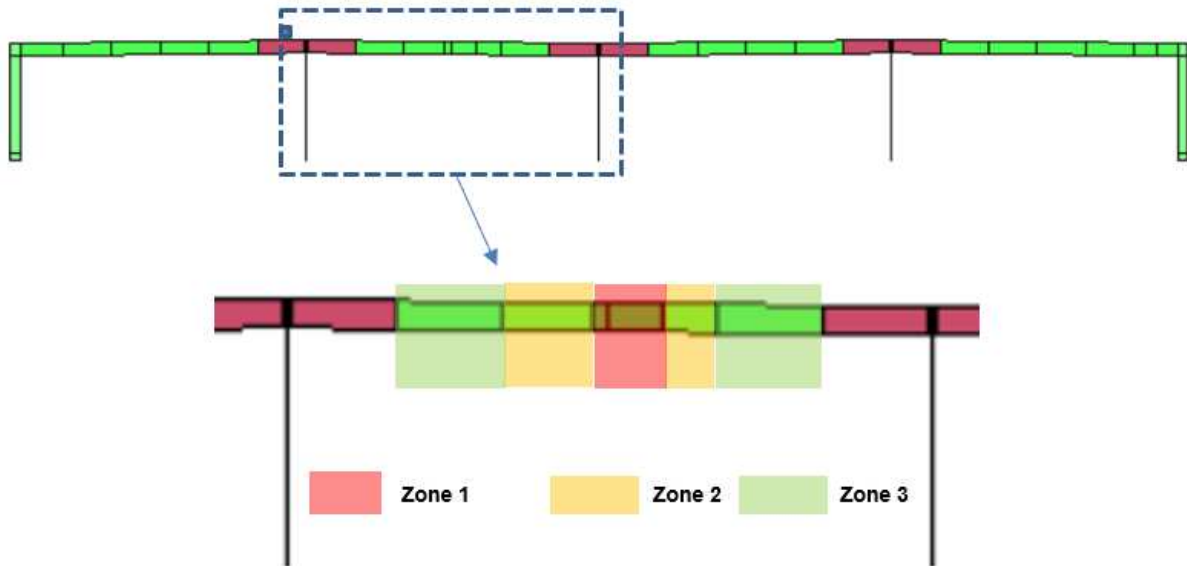


Figure 75 : Identification des zones de contraintes thermiques – SC4

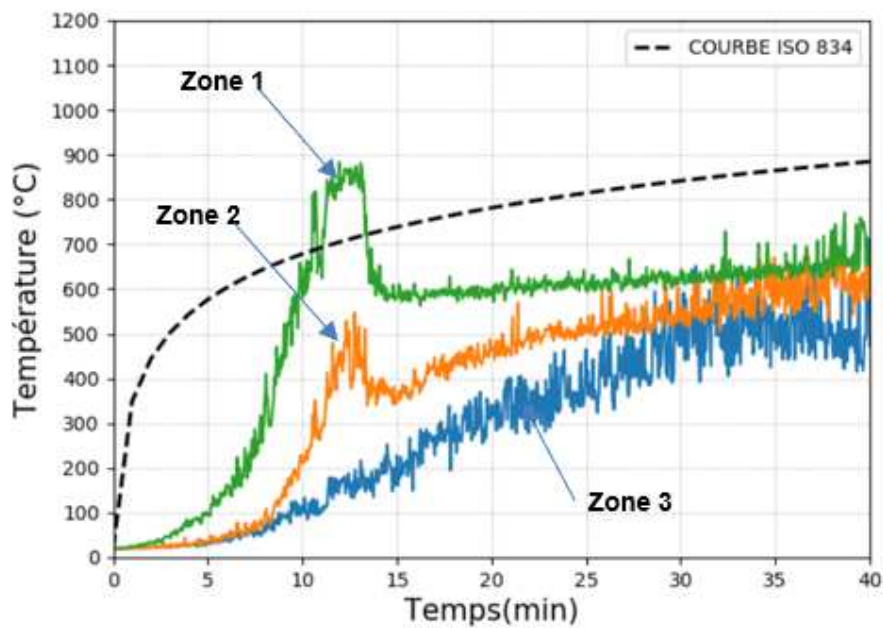


Figure 76 : Action thermique sur le portique principal (file 4) – SC4

8.4.2 Modélisation de la réponse structurale du portique file 4

Un modèle de structure identique à celui présenté dans le paragraphe §8.3.2 est considéré. La réponse structurale sous l'action thermomécanique du scénario SC4 est présentée ci-après.

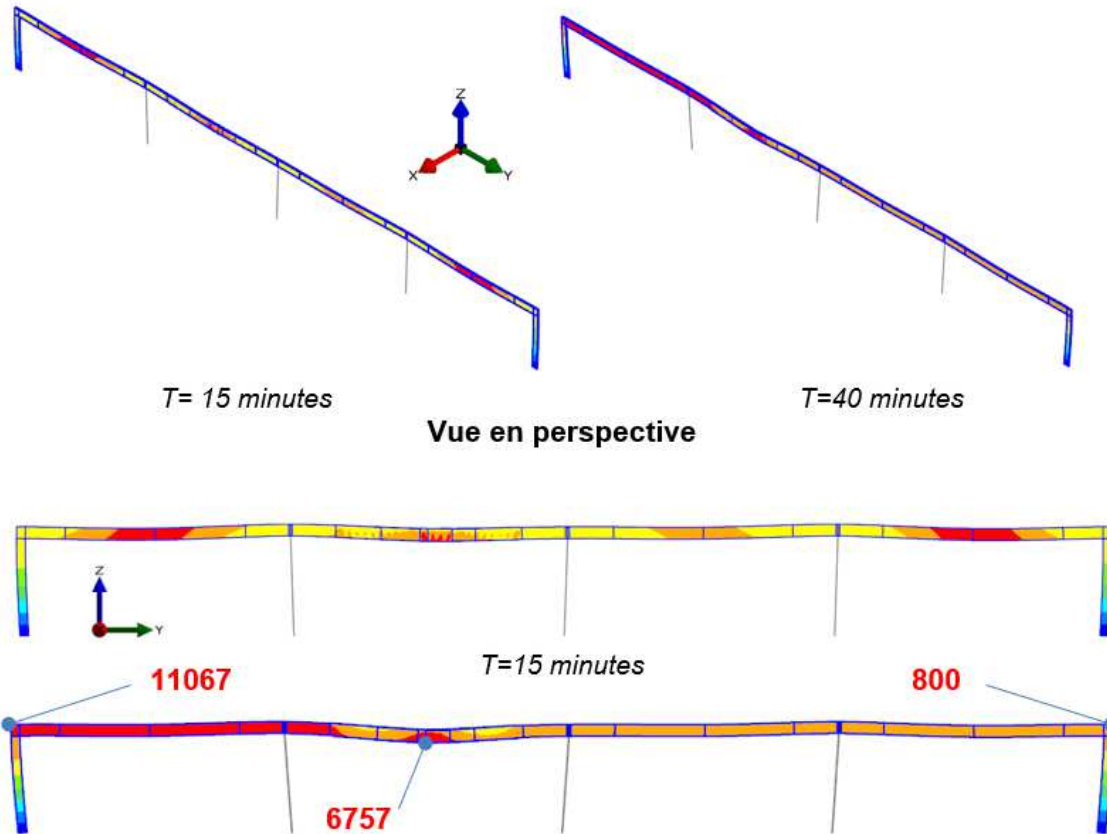


Figure 77 : Réponse structurale du portique à 40 minutes (exagéré : x10) – SC4

Les déplacements des points indiqués sur la figure ci-avant sont présentés dans les figures suivantes.

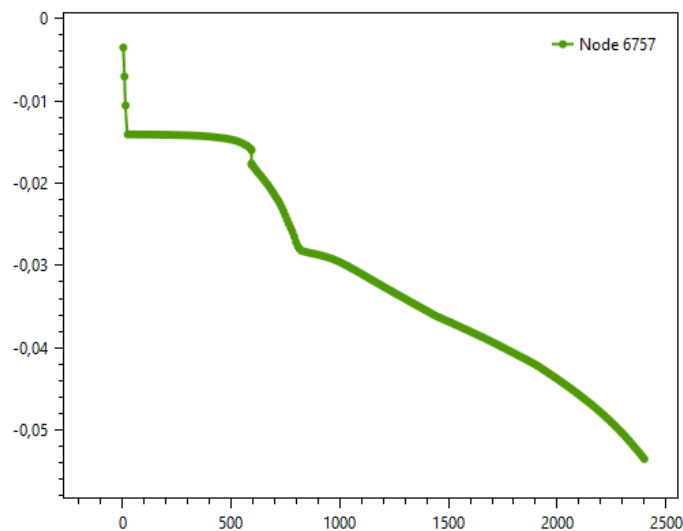


Figure 78 : Déplacement selon Z du nœud 6757 – SC4

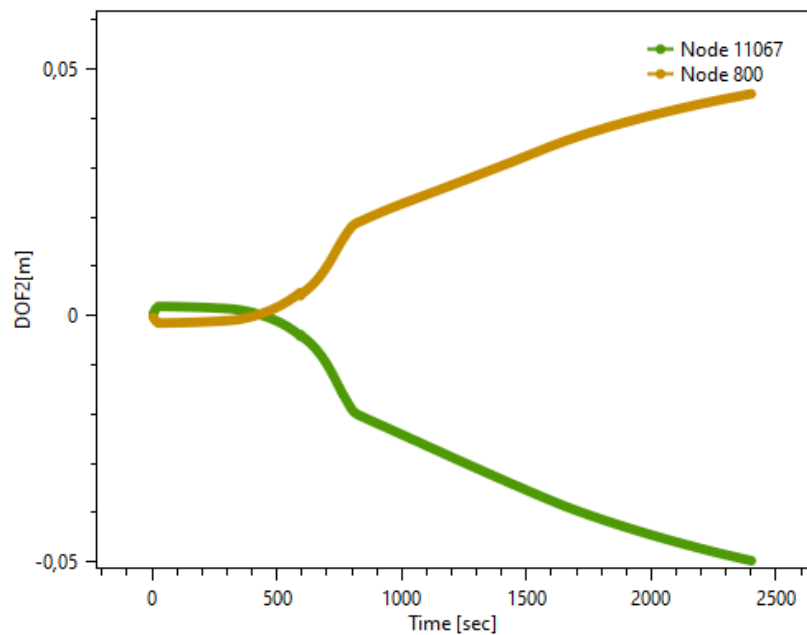


Figure 79 : Déplacement selon Y des nœuds 11067 et 800 – SC4

On remarque que la poutre n'est que légèrement déformée. Aucun voilement ou déversement n'a été constaté au niveau de la poutre PRS. De même, aucune perte de stabilité n'est observée au niveau des poteaux. La ruine du portique n'a pas été observée pendant le temps de calcul (40 minutes).

Il est toutefois à noter que, le modèle du portique considère, sur toute la durée du calcul, le maintien hors-plan du portique par la présence des pannes. La ruine de ces dernières favorise le déversement des poutres PRS et peut conduire à l'effondrement du portique. Par conséquent, la stabilité du portique est conditionnée par la stabilité des pannes.

Une analyse supplémentaire présentée ci-après est nécessaire pour pouvoir conclure sur la tenue au feu de la structure dans le cas du scénario SC4.

La figure suivante présente une courbe de la température des gaz d'un capteur placé au droit du foyer, sous une panne IPE270. La courbe de feu normalisé ISO 834 est également tracée pour comparaison.

L'analyse de la tenue au feu des pannes continues en IPE 270 présentée dans la section §7.1 montre que les pannes assurent une tenue au feu normalisé de 932 s qui correspond à un échauffement de 685 °C (température moyenne d'une section IPE 270 sous action du feu ISO 834).

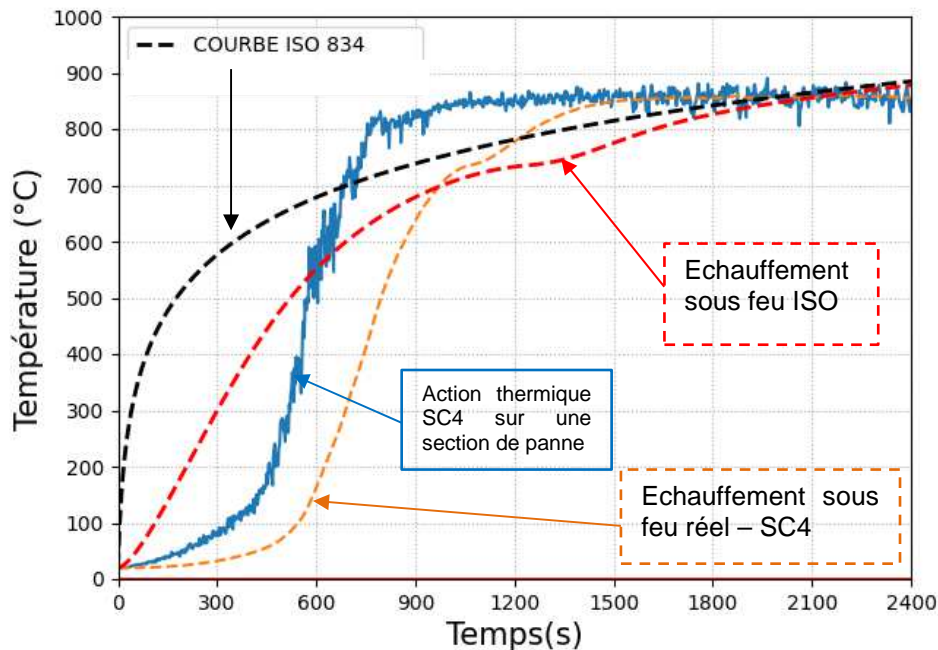


Figure 80 : Analyse de la ruine des pannes – SC4

Sous l'action thermique du scénario SC4, une section dans la zone du foyer nécessite environ 960 s pour atteindre 685 °C dans l'acier. Cela signifie que l'action thermique du scénario SC4 peut entraîner la ruine d'une ou de plusieurs pannes à environ 16 minutes. Ainsi, dans une démarche sécuritaire, on peut conclure que la ruine de la structure se produit environ 16 minutes après le départ de feu.

Quant au mode de ruine de la structure, la ruine se produit en premier lieu au niveau des pannes qui entraînerait le déversement des poutres PRS tandis que les poteaux restent stables jusqu'au déversement. Il est jugé que cette cinétique de ruine donne lieu à un effondrement de la structure vers l'intérieur.

8.4.3 Synthèse des résultats du comportement au feu de la structure dans le cas du scénario SC4

La tenue au feu réel : environ 16 minutes

Risque de ruine vers l'extérieur : écarté

Le comportement au feu réel de la structure dans le cas du scénario 4 est **compatible avec l'évacuation en sécurité des personnes et l'intervention des secours**.

8.5 SC5 : Départ de feu au niveau d'un empilement de palettes de la zone atelier, à proximité d'un poteau

8.5.1 Puissance de l'incendie et action thermique sur la structure

Pour rappel, le scénario SC5 correspond à un départ de feu à proximité d'un poteau central dans la zone des ateliers (stockage en tas des plaques de PVC). Le positionnement de ce départ de feu est illustré dans la figure ci-après.

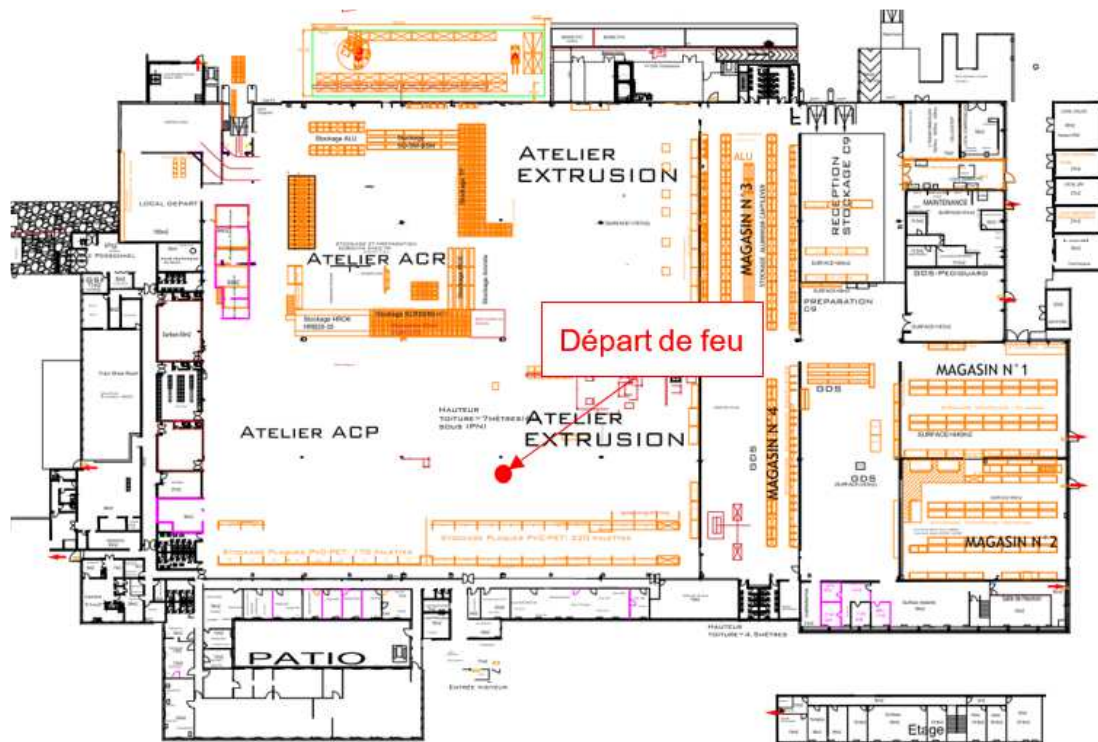


Figure 81 : Départ de feu du scénario SC5

La puissance de l'incendie du scénario SC5 est illustrée dans la figure suivante.

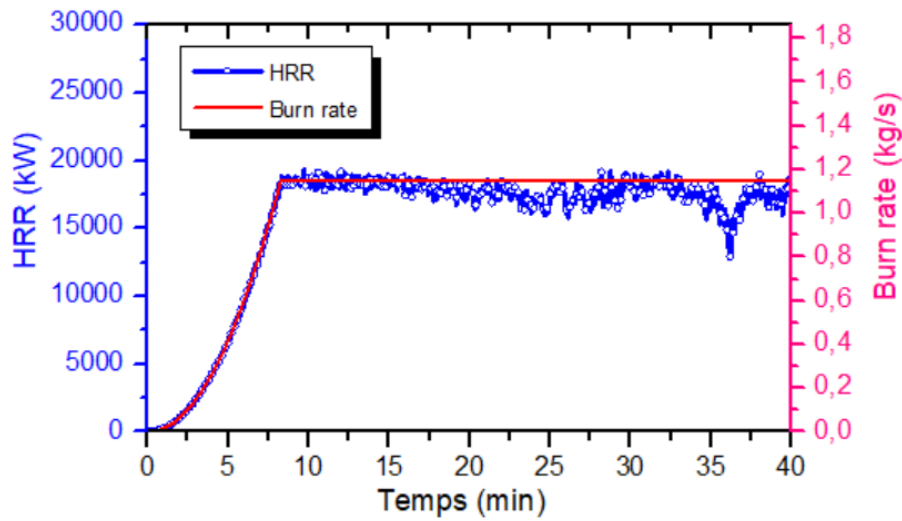


Figure 82 : Puissance de l'incendie – SC5

L'analyse du comportement au feu de la structure de l'entrepôt porte sur l'analyse de la file 6 (portique courant). Cette file est repérée sur la figure suivante.

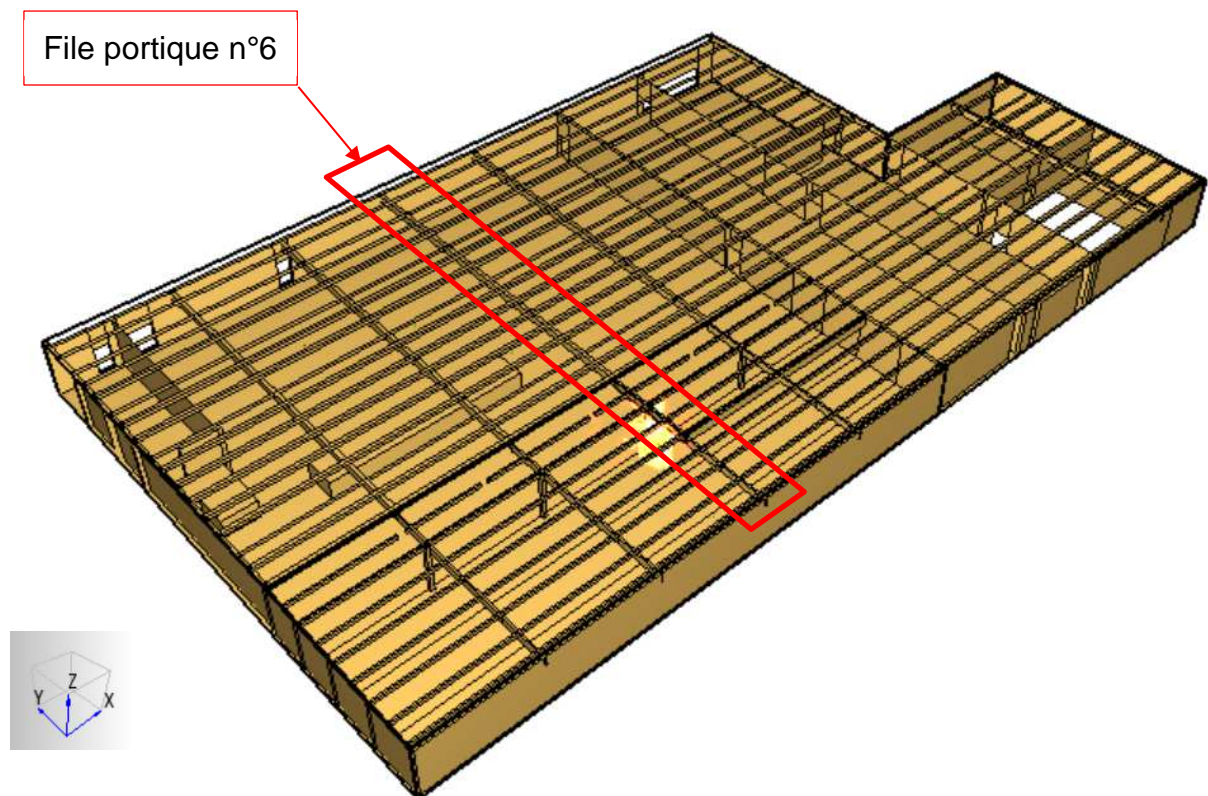
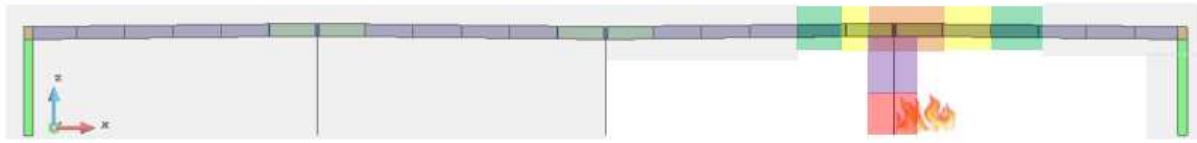


Figure 83 : File de structure retenue pour l'analyse thermomécanique – SC5

Sur la base de la cinétique de l'incendie simulé ainsi que des mesures obtenues par les capteurs numériques de température, les différentes zones de contraintes thermiques ainsi que l'action thermique retenue pour chaque zone sont déterminées et illustrées sur les figures suivantes.



Légende :



Figure 84 : Identification des zones de contraintes thermiques - SC5

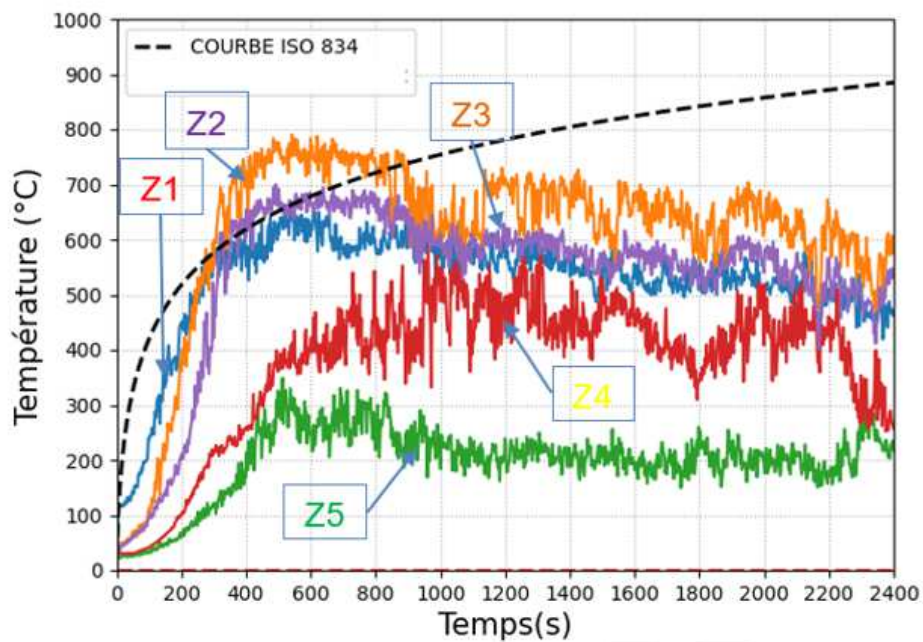
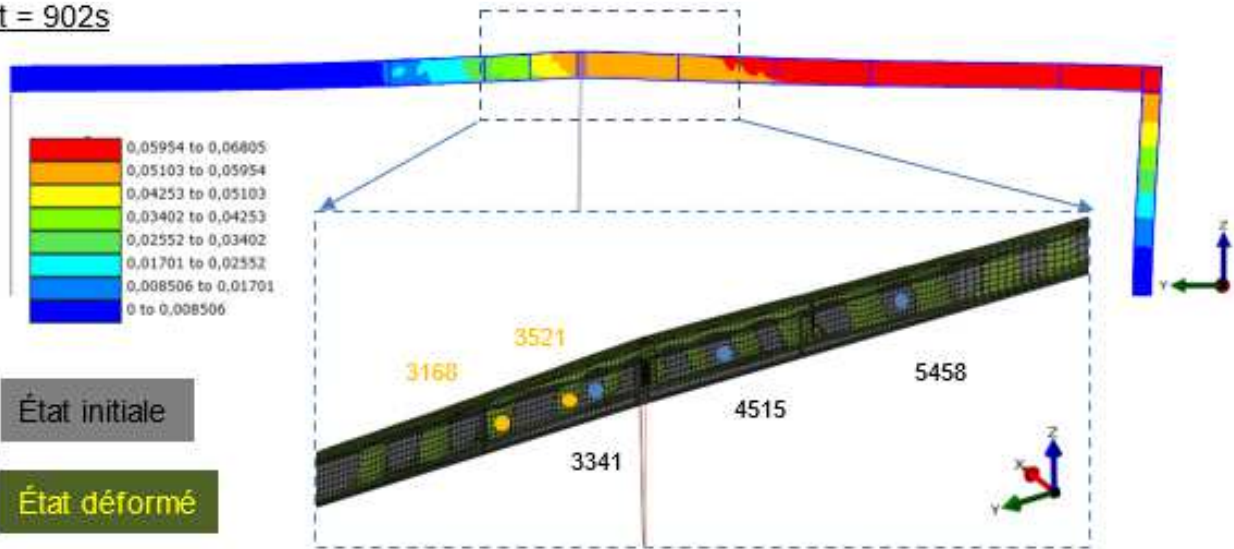


Figure 85 : Action thermique sur le portique principal (file 6) – SC5

8.5.2 Modélisation de la réponse structurale du portique file 6

Un modèle de structure identique à celui présenté dans le paragraphe §8.2.2 est considéré. La réponse structurale sous l'action thermomécanique du scénario SC5 est présentée ci-après.

t = 902s



t = 1425s

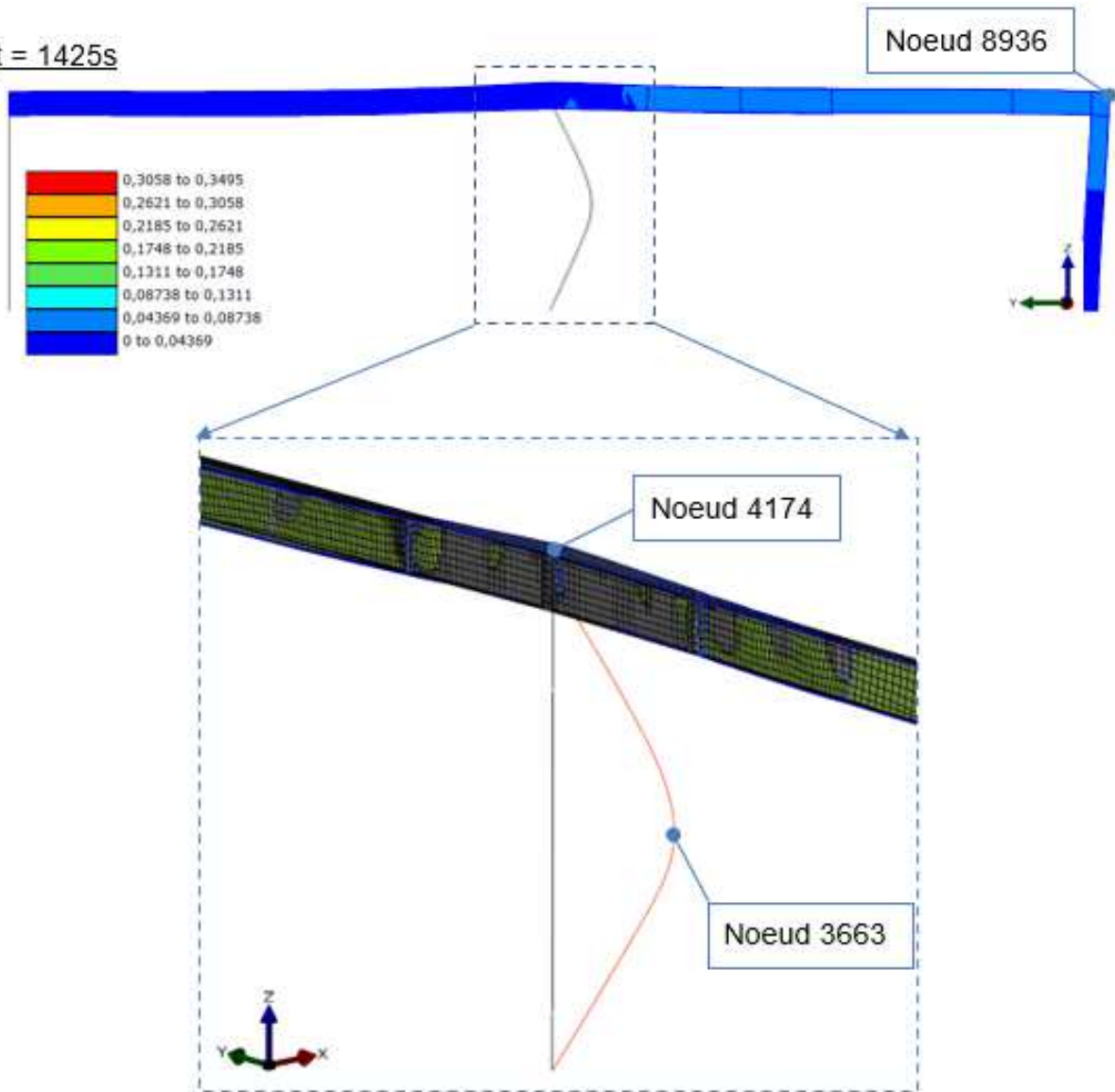


Figure 86 : Réponse structurale du portique à différents instant (exagéré : x5) - SC5

Les déplacements des points indiqués sur la figure ci-avant sont tracés et présentés dans les figures suivantes.

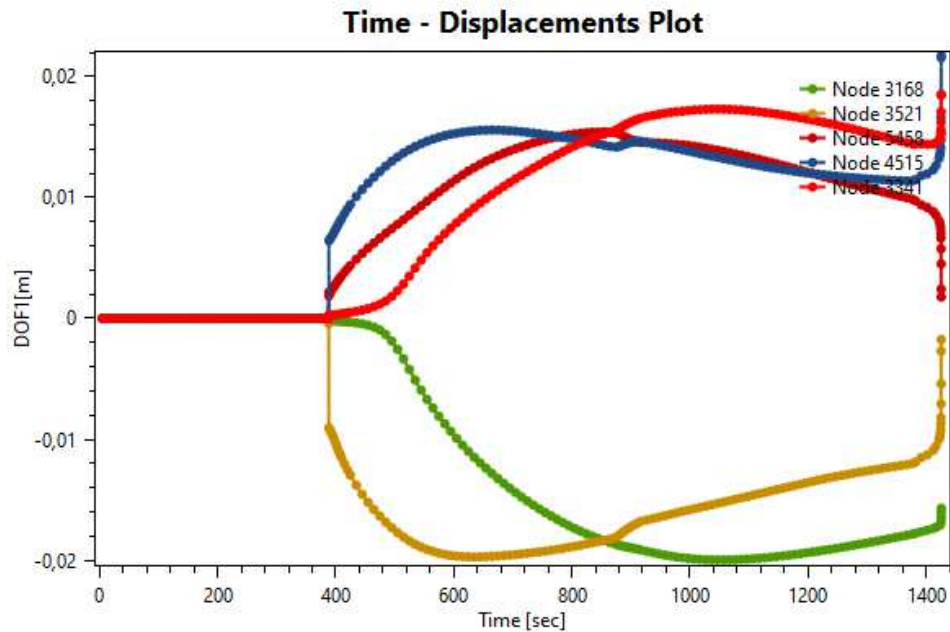


Figure 87 : Déplacement selon X des nœuds situés dans l'âme de la poutre PRS – SC5

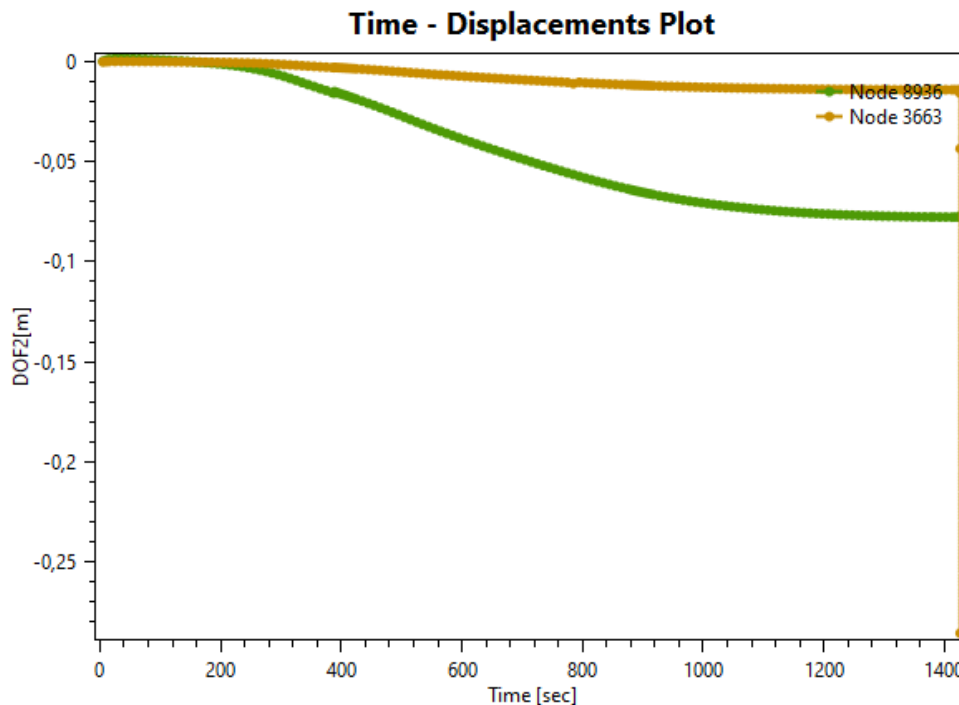


Figure 88 : Déplacement selon Y des nœuds 3663 et 8936 – SC5

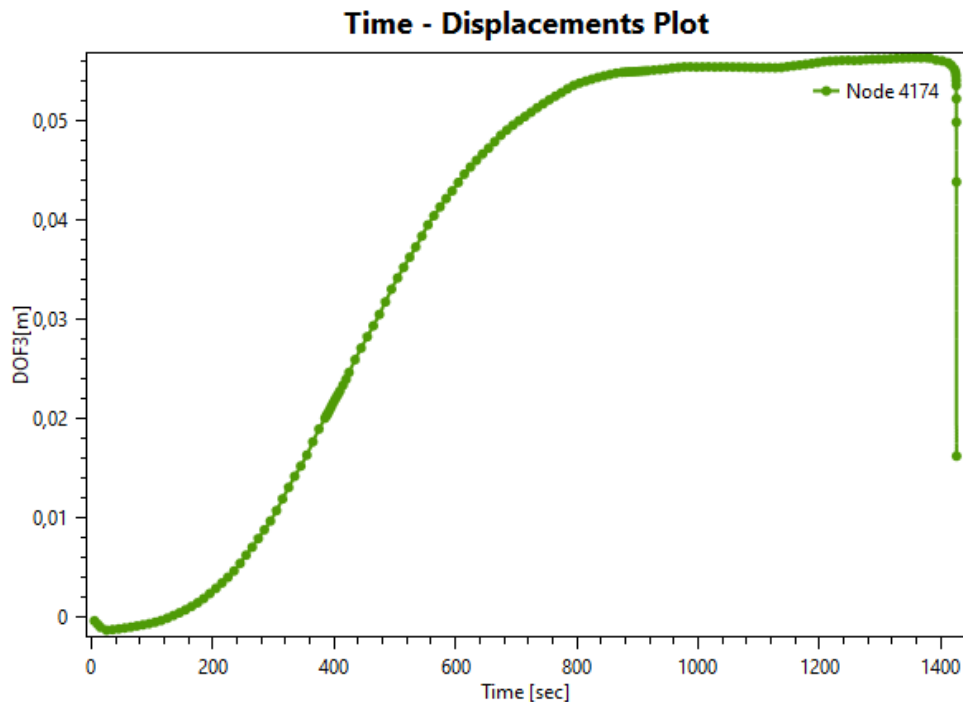


Figure 89 : Déplacement selon Z du nœud 4174 – SC5

Les résultats montrent que le phénomène de voilement se produit légèrement à 400 s (figure 87). Les déplacements hors-plans des points montrés sur la figure 87 montrent qu'aucun déversement de la poutre n'a été observé jusqu'à 1425 s. Ensuite, le poteau central en HEA240, situé au droit du foyer, s'est mis à flamber et marque la ruine du portique.

Le risque d'effondrement de la structure vers l'extérieur est écarté compte tenu du fait que le déplacement latéral de la tête du poteau de rive (point 8936, figure 88) est stabilisé à partir d'environ 1000 s.

8.5.3 Synthèse des résultats du comportement au feu de la structure dans le cas du scénario SC5

La tenue au feu réel : 23 minutes 44s

Risque de ruine vers l'extérieur : écarté

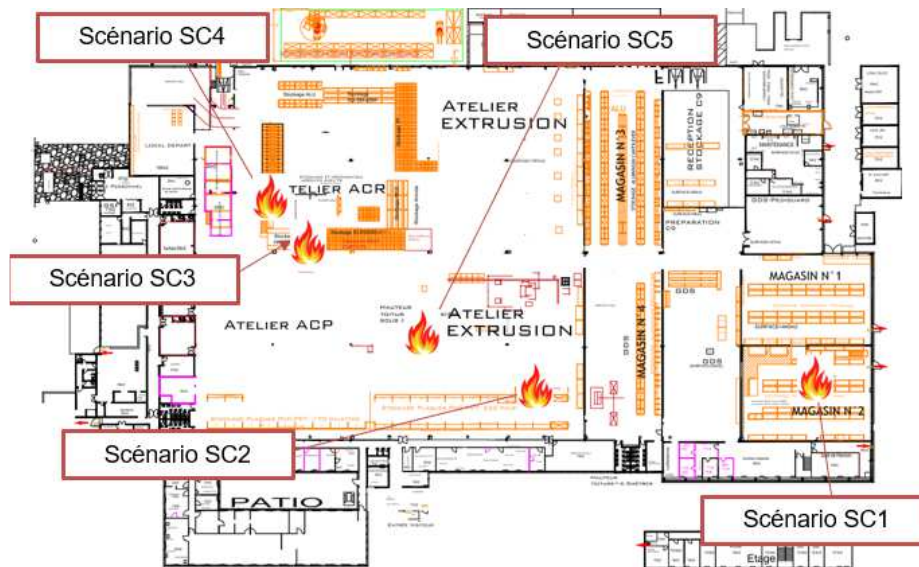
Le comportement au feu réel de la structure dans le cas du scénario 5 est **compatible avec l'évacuation en sécurité des personnes et l'intervention des secours.**

9 CONCLUSION GENERALE

La présente étude a pour objectif d'une part d'évaluer la tenue au feu de la structure métallique d'un bâtiment ICPE situé à Pacy sur Eure (27), occupé par la société CS-France et d'autre part, de vérifier si la cinétique de l'incendie ainsi que la cinétique de ruine de la structure est compatible avec les objectifs de sécurité des personnes (occupants et services de secours).

Pour cela, l'étude de la résistance au feu de l'ossature du bâtiment a été réalisée sous l'action thermique de la courbe de feu normalisé ISO 834 ainsi que les actions thermiques issues des scénarios incendie.

5 scénarios incendie ont été étudiés. Ils considèrent différents départs de feu dans les zones disposant de potentiels calorifiques importants comme le montre la figure suivante.



Conclusion de l'étude sur les conditions d'évacuation et d'intervention :

Les résultats obtenus, conformément aux hypothèses, permettent de mettre en évidence que les temps de détection sont rapides et que les temps disponibles pour l'évacuation sont longs pour l'ensemble du bâtiment. Ces éléments offrent plusieurs minutes de marge de sécurité pour l'évacuation des personnes.

- Concernant plus spécifiquement l'évacuation des mezzanines, aucun problème spécifique n'est mis en évidence, sauf si le départ de feu se situe directement dans l'une d'elle ou à proximité immédiate et venait à dégrader les conditions d'évacuation sur le seul chemin d'évacuation disponible. Les mezzanines ne disposent actuellement que d'un seul escalier permettant leur évacuation. Il a de plus été observé sur site la présence de stockage sous les escaliers que nous conseillons de supprimer pour la raison évoquée ci-avant. Les distances d'évacuation des mezzanines devront être vérifiées vis-à-vis des exigences applicables.
- Les conditions d'intervention ne sont pas remises en cause directement sur la durée des simulations. La probabilité d'occurrence d'un phénomène de type flashover pourrait cependant dégrader les conditions d'intervention à partir de temps relativement longs (plus de 11 minutes). Il est cependant rappelé que le bâtiment dispose d'un système d'extinction automatique dont les effets ne sont pas pris en compte dans les simulations. Les temps d'activation estimés de ces systèmes sont beaucoup plus courts que les temps mis en évidence ci-avant.

Conclusion de l'étude du comportement au feu de la structure :

- Sous feu normalisé ISO 834 : hormis les poutres PRS, l'ensemble des éléments de structure porteuse du bâtiment en objet de l'étude atteint le niveau R15 requis (résistance sous feu ISO 834) ;
- Sous feu réel :
 - Sur l'ensemble des scénarios étudiés (5 scénarios), la tenue au feu réel est supérieure à 15 minutes et présente donc une marge significative pour l'évacuation en sécurité des personnes.
 - Le risque d'effondrement de la structure vers l'extérieur est écarté sur l'ensemble des scénarios étudiés. La cinétique de ruine est donc compatible avec l'intervention des secours.





V.H.N. — V.D.T. P.N.D.

Groupe CNPP
LFE - Service Ingénierie de Sécurité Incendie
Pour le Directeur et par délégation
Chef de Service
Stéphanie MAETZ
Signature électronique

10 ANNEXE 1 - BIBLIOGRAPHIE

Références données d'entrée fournies par le demandeur



21/03/2022

-  AMPG 1510_version travail 020222.xlsx
-  Apave_Rapport ATEX V2 _CS_France_Construction_Specialties_France _N°_21585933_PR0038_V2.pdf
-  Plan CS Localisation chargeurs Chariots.pdf
-  Rubrique ICPE_version travail JANV22.docx


23/03/2022 :

plans d'archive version papier


25/03/2022

-  CS_FRANCE_ZONE01_indB.pdf
-  Plan CS-France pour Eurofeu.pdf

31/03/2022

-  Plan CS Localisation Skydomes et Exutoires.pdf

08/04/2022

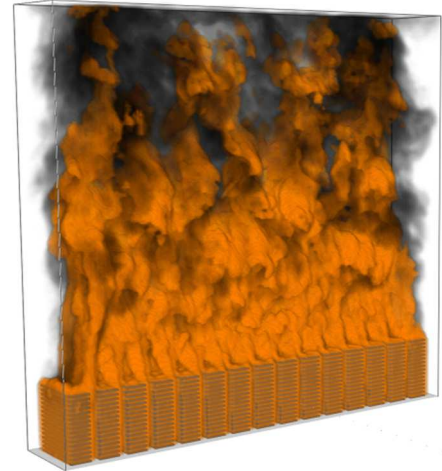
-  DIVSPE-2469-03 Dossier ISO indice L Format A0-400ème 2021.dwg

Références techniques

- [1] EN 1990:2002 - Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures.
- [2] EN 1991-1-2:2002 - Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu.
- [3] EN 1993-1-2:2005 - Eurocode 3 : Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.
- [4] «ISO 834-1. Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1 : General requirements. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.».
- [5] Europratic CTICM, Calcul suivant les Eurocodes d'un bâtiment simple en acier à l'usage des praticiens - Anthony RODIER.
- [6] *Revue CONSTRUCTION METALLIQUE CTICM N°2/2010: Revue trimestrielle 47e année.*
- [7] *CTICM, Guide de vérification du comportement au feu des bâtiments à simple rez-de-chaussée en charpente métallique, 29 novembre 2017.*
- [8] FLUMILOG, «Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt,» 2011.
- [9] NFPA® 204, *Standard for smoke and heat venting*, 2012.
- [10] «SFPE Handbook of fire protection engineering».
- [11] LCPP, *Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage*, Paris, 2017.

11 ANNEXE 2 - MODELES A CHAMPS : CODE FDS (VERSION 6.6.0)

Le code FDS (Fire Dynamic Simulator) développé au NIST est largement reconnu et utilisé en modélisation des phénomènes d'incendie. FDS est utilisé par le CNPP depuis fin 2002, dans le cadre d'études d'ingénierie de la sécurité incendie ou pour l'assistance technique à l'expertise après sinistres. Il s'agit d'un code de mécanique des fluides associé à un modèle de pyrolyse et de combustion qui permet de prédire le déplacement des fumées en prenant en compte les effets aérauliques réels (ventilations, exutoires, etc.), et de simuler le phénomène de combustion en fonction non seulement du combustible mais aussi des paramètres ambiants (flux thermiques reçus, température, concentration en oxygène, etc.).



Ce type de code dit 'code à champ' ou code de CFD (Computational Fluid Dynamics) est conçu pour respecter un principe fondamental de conservation généralisé au transport de vitesse, de chaleur et de concentration de l'ensemble des espèces chimiques qui constituent le milieu fluide modélisé. Ces variables fortement couplées doivent être estimées à des intervalles de temps et d'espace petits devant les échelles mises en jeu dans un phénomène d'incendie réel. Le principe de conservation se traduit par un ensemble d'équations discrétisées sur un réseau de points de calcul. En chacun de ces points la résolution numérique des équations donne l'accès à toutes les grandeurs physiques importantes et permet une vision aussi bien locale que globale du phénomène. En définitive la reconstitution numérique d'un incendie repose sur un ensemble complexe de phénomènes interdépendants :

- ✓ La conservation de la quantité de mouvement, qui permet de déterminer la vitesse des fumées et de l'air, ainsi que les différences de pression s'établissant dans le volume considéré ;
- ✓ La conservation de l'énergie, qui pilote et répartit les échanges thermiques sous forme de conduction, de convection ou de rayonnement ;
- ✓ Le transport des espèces réactives ou inertes coexistant dans le fluide, qui détermine le déclenchement de réactions chimiques en fonction des bilans stœchiométriques et de la température ;
- ✓ La réaction chimique de pyrolyse et de combustion qui détermine le taux de production de fumées et l'évolution du front de flammes ;
- ✓ La dissipation visqueuse via la modélisation de la turbulence, qui à partir des mouvements tourbillonnants à grande échelle pilote la dissipation d'énergie cinétique à plus petite échelle ;
- ✓ Les lois d'état du gaz qui déterminent la variation de densité de l'air et les effets convectifs à l'aplomb d'un foyer.

La résolution nécessite le maillage des bâtiments ou des locaux à étudier avec une finesse dépendant de la puissance et du temps de calcul disponible et du degré de précision recherché.

La documentation relative au logiciel FDS et sa validation est disponible sur le site du NIST : <https://pages.nist.gov/fds-smv/>