

Référence : 18-002045-JGI-ACH
Affaire : SA-17-002358

ANALYSE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE DE L'ENTREPOT DE LA SOCIETE BERRY TUFT SITUE AU POINCONNET (36) - TRANCHE 1

Rapport d'étude

Client demandeur BERRY TUFT

Référence et date de commande Bon de commande du 29/06/2017

Projet Entrepôt Berry Tuft au Poinçonnet (36)

Date : 06 février 2019
Indice de révision : A
Nombre de pages : 59

Auteur(s) :
Jérémie GIRARD
Audrey CHAMPON
Julien VIALE

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	06/02/2019	Version initiale

SOMMAIRE

1. Introduction.....	5
2. Documents de référence	6
2.1. Documents fournis par le client	6
2.2. Documents de référence	6
2.3. Autres	6
3. Description du bâtiment étudié.....	7
3.1. Description générale.....	7
3.2. Description de la structure.....	7
4. Objectifs de sécurité et méthodologie d'étude.....	15
4.1. Objectifs de sécurité et exigences associées.....	15
4.2. méthodologie d'étude	15
5. Calculs de développement du feu	16
5.1. Méthodologie	16
5.2. Outils de modélisation	16
5.2.1. Outils de modélisation des effets locaux	16
5.2.2. Outils de modélisation des effets globaux	17
5.3. Définition du scénario incendie	17
5.4. Hypothèses de modélisation	19
5.5. Résultats des sollicitations thermiques	20
5.5.1. Hall 1.....	20
5.5.2. Hall 2.....	24
5.5.3. Hall 3.....	27
6. Hypothèses de calcul thermiques et thermomécaniques.....	31
6.1. Hypothèses de modélisation	31
6.1.1. Modèles réalisés.....	31
6.1.2. Sections des éléments.....	33
6.1.3. Matériaux	33
6.2. Conditions de chargement des éléments.....	34
6.2.1. Charges appliquées sur la structure.....	34
6.2.2. Combinaison de charges.....	34
6.3. Conditions aux limites.....	34
6.4. Échauffement des éléments.....	34
6.4.1. Éléments non protégés.....	34
6.4.2. Prise en compte des murs coupe-feu.....	35
7. Etude du comportement au feu de la structure	36
7.1. Étude du modèle longitudinal – halls 1, 2 et 3	36
7.1.1. Départ de feu dans le hall 1	36
7.1.2. Départ de feu dans le hall 2.....	37
7.1.3. Départ de feu dans le hall 3.....	39
7.2. Étude des modèles transversaux – halls 2 et 3	41
7.2.1. Hall 2.....	41
7.2.1.1. Position des départs de feu étudiés.....	41
7.2.1.2. Scénario 1	41
7.2.1.3. Scénario 2.....	44

7.2.1.4. Scénario 3.....	46
7.2.2.Hall 3.....	48
7.2.2.1. Positions des départs de feu étudiés.....	48
7.2.2.2. Scénario 1.....	49
7.2.2.3. Scénario 2.....	52
7.2.2.4. Scénario 3.....	55
7.3.Synthèses des différentes études.....	58
8. Conclusions.....	59

1. INTRODUCTION

L'entreprise BERRY TUFT SAS prévoit l'exploitation d'un entrepôt de stockage situé sur la commune du Poinçonnet (36). Dans un premier temps (phase 1), seule une partie du bâtiment existant, initialement à usage industriel, sera exploitée (Halls 1, 2 et 3, objet de la présente étude). Pour cela, il est prévu une modification de l'agencement du bâtiment afin de créer 3 cellules de stockage sous les rubriques d'enregistrement 1510, 1530, 2662, 2663, 2925, 2910, 4734 et 4718. L'arrêté du 11 avril 2017 est applicable, avec la création de cellules de surface pouvant approcher 12000 m². La figure suivante présente la configuration du bâtiment avec un repérage des zones concernées par les deux phases de travaux.

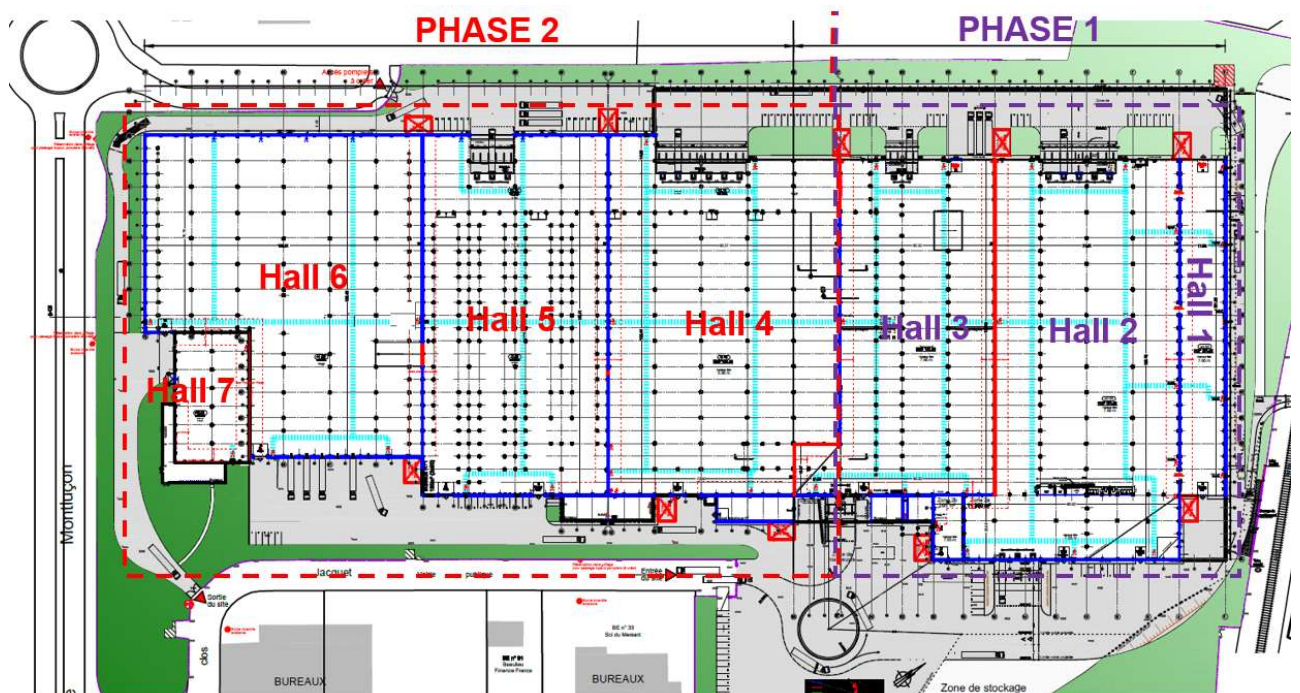


Figure 1-1 : Plan d'implantation des bâtiments et localisation de la zone soumise à enregistrement ICPE.

L'arrêté du 11/04/2017 [21] applicable aux entrepôts couverts relevant du régime de l'autorisation au titre de la rubrique n° 1510 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement donne dans le paragraphe 4 de l'annexe II les prescriptions relatives à la structure, parmi lesquelles on retrouve :

1. Stabilité au feu : l'ensemble de la structure est à minima R 15 pour des hauteurs ne dépassant pas 13,7 m ;
2. Mode de ruine : les dispositions constructives visent 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 compartimentage, ni l'effondrement de la structure vers l'extérieur de la cellule en feu.

Dans ce contexte, Berry Tuft a sollicité Efectis France pour la réalisation de l'étude du mode de ruine de la structure, **limitée au non effondrement de la structure vers l'extérieur (comme indiqué par la maîtrise d'ouvrage, l'ouvrage fait l'objet d'une dérogation concernant la ruine chaîne inter-cellule).**

Le présent rapport présente donc les résultats de l'étude réalisée par Efectis concernant le non effondrement vers l'extérieur des structures des halls 1, 2 et 3. La vérification de la tenue au feu normalisé R15 est réalisée par le charpentier en charge de la reprise et des renforcements de la structure.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [1] CMP – Existant implantation – Ind C – 21/02/18
- [2] CMP – Existant ensemble – Ind B - 21/02/18
- [3] CMP – Principes renforcements portiques – Ind E – 03/05/18
- [4] CMP – Empannage existant – Ind A – 15/02/18
- [5] CMP – Principe ajout poteau – Ind A – 03/05/18
- [6] CMP – Ensemble CVTS – Ind A – 14/03/18
- [7] CMP – Ensemble stabilité vertical – Ind D – 03/10/18
- [8] CMP – Renfort file 13/16 – EXE – Ind A – 03/05/18
- [9] CMP – Hypothèses de charges – Note de calcul – Ind 3 – 13/05/18
- [10] CCS Ouest – Charpente métallique – Ind A – 30/07/17
- [11] SITEC – Dossier technique n°18-710 – Bardage – Ind 0 – 13/06/18
- [12] Architech-PUR – Plan de masse projet et défense incendie – Ind A – 11/06/18
- [13] CMP – Ensemble file 4 a 20 et BG à BL – Ind A – 28/06/18

2.2. DOCUMENTS DE REFERENCE

- [14] NF EN 1990 et Annexe Nationale : « Eurocode 0 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures », mars 2003 et NF EN 1990/NA Décembre 2011 ;
- [15] NF EN 1991-1-1 et Annexe Nationale « Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-1 : Actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments », Mars 2003 et NF P06-111-2 Juin 2004
- [16] NF EN 1991-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-2 : Actions sur les structures exposées au feu » Juillet 2003 et NF EN 1991-1-2/NA Février 2007;
- [17] NF EN 1991-1-3 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-3 : Actions sur les structures – Charges de neige » Avril 2004 et NF EN 1991-1-3/NA Mai 2007
- [18] NF EN 1991-1-4 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-4 : Actions sur les structures – Actions du vent » Novembre 2005 et NF EN 1991-1-4/NA Mars 2008 ;
- [19] NF EN 1993-1-1 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 : Calcul des structures en acier– Partie 1.1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », Octobre 2005 et NF EN 1993-1-1/NA (31 Août 2013)
- [20] NF EN 1993-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 : Calcul des structures en acier– Partie 1.2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Novembre 2005 et NF EN 1993-1-2/NA (Octobre 2007)
- [21] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

2.3. AUTRES

- [22] LENAS – Logiciel de simulation du comportement mécanique des structures métalliques soumises à un incendie – Article de la Revue de la Construction Métallique n°3 (1999) et Rapport de validation et de justification n°INC-98/171-GF/IM.
- [23] CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 5) User's Guide
- [24] CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 5) Technical Reference Guid
- [25] Fire Safety Engineering, Requirements Governing Algebraic Formulas: Fire Plumes. ISO TC 92/SC 4. July 2004
- [26] Fire Safety Engineering, Requirements Governing Algebraic Formulas: Ceiling Jet Flows. ISO TC 92/SC & 4/WG9 N19 Rev6. July 2004
- [27] Echanges de mails avec le BET Armacerce concernant les raideurs des murs coupe-feu

3. DESCRIPTION DU BATIMENT ETUDIE

3.1. DESCRIPTION GENERALE

L'étude réalisée par Efectis France porte sur un entrepôt situé sur la commune du Poinçonnet (36). Il est prévu en première phase une modification de l'agencement du bâtiment afin de créer 3 cellules de stockage, de superficie respective de 2 331 m² (hall 1), 11 655 m² (hall 2) et 8 178 m² (hall 3).

La figure suivante présente l'agencement prévu du bâtiment après modification :



Figure 3-1 : Agencement prévue du bâtiment après modifications

Les cellules créées seront séparées par des murs coupe-feu 2h (REI 120).

3.2. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE

La structure existante du bâtiment est métallique. Dans le cadre des travaux de modifications, la toiture existante est remplacée par un nouveau complexe. Afin de pallier les surcharges engendrées par la nouvelle toiture, des renforcements ont été effectués sur la structure métallique existante.

Par ailleurs, du fait des différentes phases de constructions et des modifications apportées, la structure dans les cellules étudiées est différente suivant les zones. La figure suivante montre la disposition des cellules et les zones d'extension et de démolition réalisées.

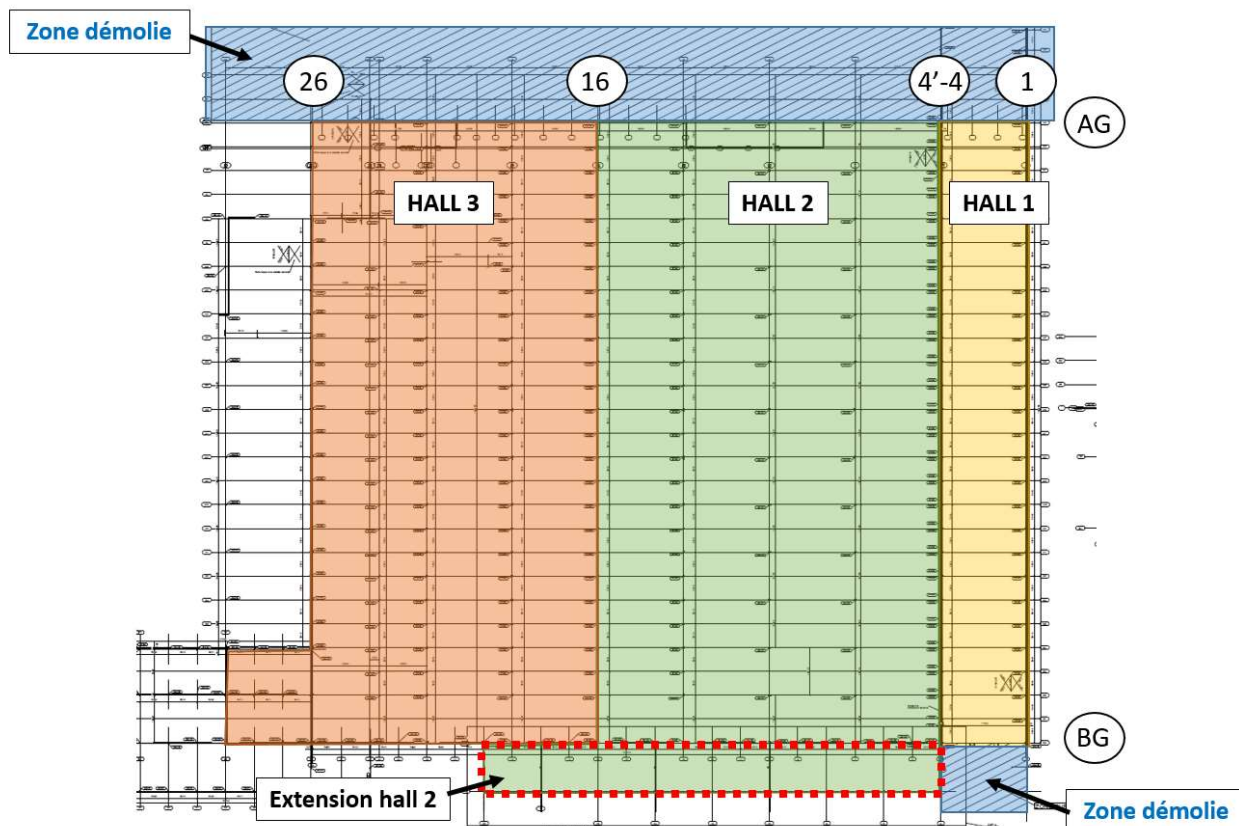


Figure 3-2 : Disposition des cellules et modifications prévues

Des murs en béton cellulaire sont présents sur les files 1, 4, 16 et 26. Ces murs sont supposés assurer le degré d'isolement réglementaire entre cellules.

- Structure du hall 1 :

La structure du hall 1 est composée d'une série de 27 portiques d'une travée, situés entre les files AG et BG. Les poutres principales ont une portée de 17,67m et sont espacées de 5,01m. Les pannes sont réalisées à partir de profilés IPE 100 et sont espacées d'environ 1m.

Les poteaux de ces portiques sont liaisonnés en tête, en file 4, aux poteaux du hall 2 (file 4') par le biais de tiges filetées au travers du mur coupe-feu situé entre les halls 1 et 2, comme vu sur place et confirmé à l'oral par l'entreprise Viano BTP. Efectis a donc, conformément aux échanges avec les entreprises, pris en considération une liaison par deux tiges filetées M16 de classe 8.8. Il convient que l'entreprise s'assure de la présence et des caractéristiques de ces éléments sur l'ensemble des poteaux courants de la file 4.



Présence de 2 tiges filetées de liaison avec les poteaux du hall 2

Figure 3-3 : Hall 1 – Portique et mur coupe-feu séparatif avec le hall 2.

La figure suivante montre les différents types de profilés utilisés sur la structure du hall 1 :

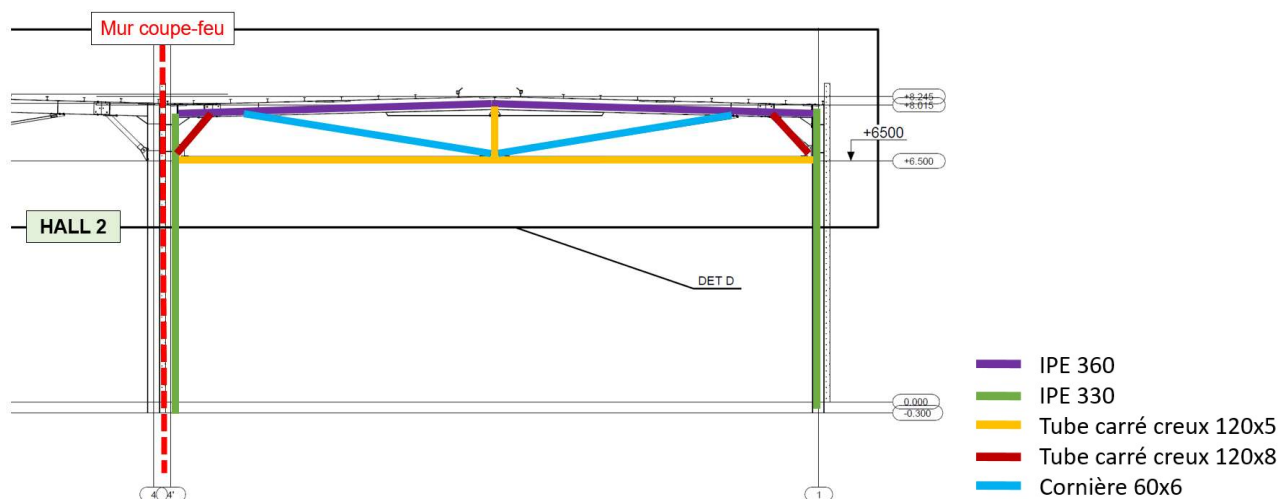


Figure 3-4 : Vue en élévation du portique principal du hall 1

- Structure des halls 2 et 3 :

La structure principale des halls 2 et 3 est composée d'une série de portiques situés entre les files AG et BG. Ces portiques, continus sur les halls 2 et 3, sont constituées de 8 travées entre les files 4' et 26.

Le mur coupe-feu situé en file 16 est placé du côté du hall 2. Par ailleurs, les poteaux du hall 2 sont brochés en tête sur le mur coupe-feu situé entre les halls 1 et 2.

Les figures suivantes présentent la structure du portique principal des halls 2 et 3 :

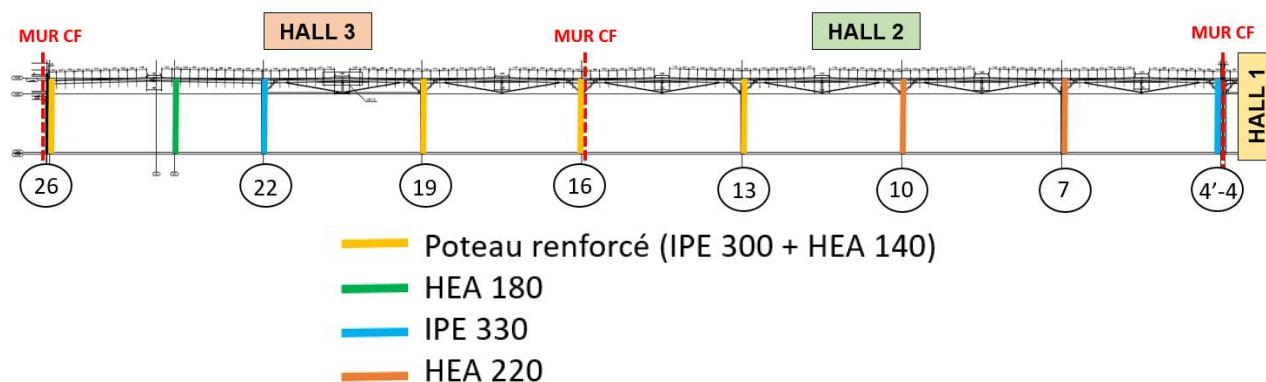


Figure 3-5 : Vue en élévation du portique principal des halls 2 et 3

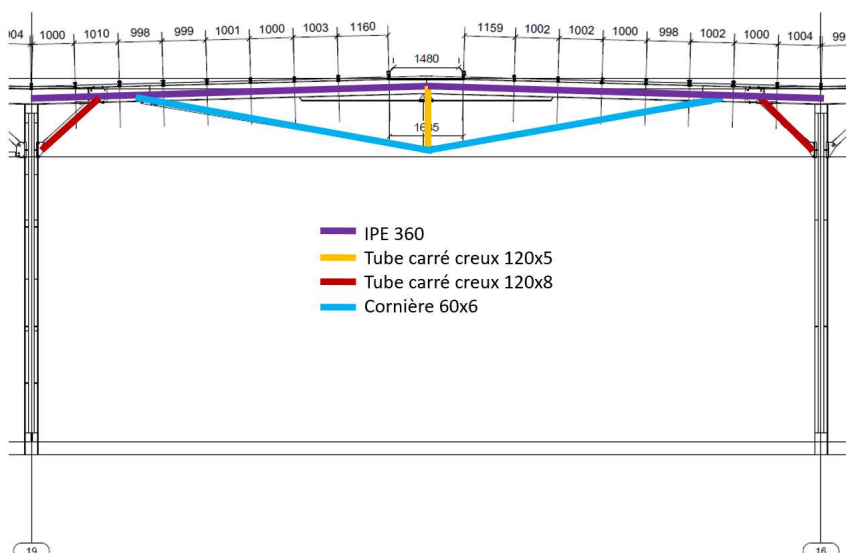


Figure 3-6 : Détail des renforcements des poutres utilisés entre les files 4' et 19.

Entre les files 19 et 22, la poutre est renforcée de la même façon que la poutre du hall 1 (voir Figure 3-4). Entre les files 22 et 27, les poutres principales sont réalisées à partir de profilés IPE 360 et ne sont pas renforcées [10].

Les poteaux situés sur les files 13, 16, 19 et 26 sont initialement constitués de profilés IPE 300. Suite aux modifications réalisées, ces poteaux sont renforcés par l'ajout d'un profilé HEA 140, comme présenté sur la figure suivante :

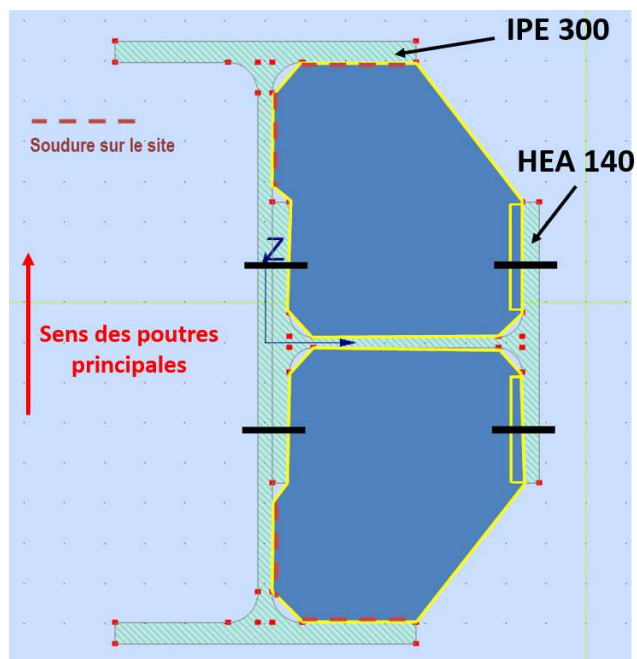


Figure 3-7 : Détail du poteau IPE 300 renforcé d'un HEA 140

Les pannes sont réalisées à partir de profils IPE 100 et sont espacées d'environ 1m.

- Contreventements :

Plusieurs stabilités verticales sont situées de part et d'autre de la structure dans les halls 1, 2 et 3. La figure suivante montre l'emplacement de ces stabilités, ainsi que leur géométrie et les profils utilisés pour chacune d'entre elles :

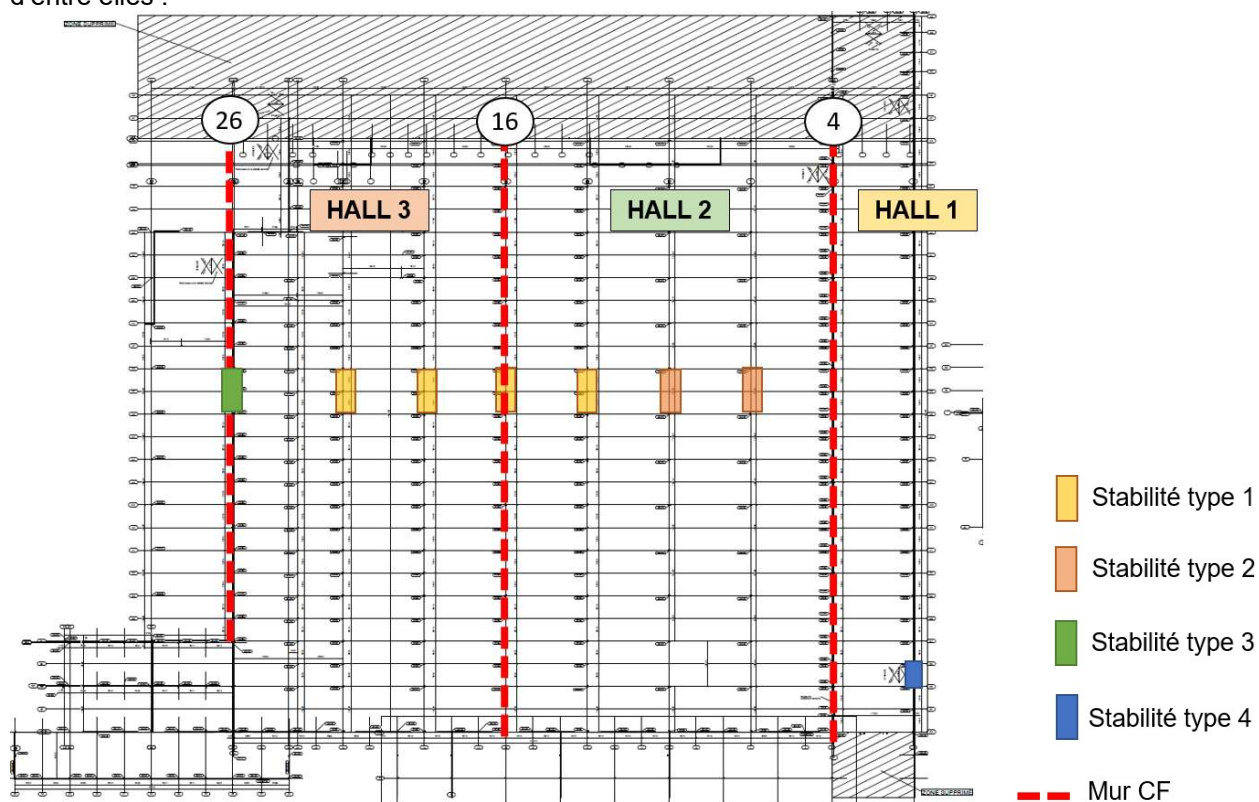
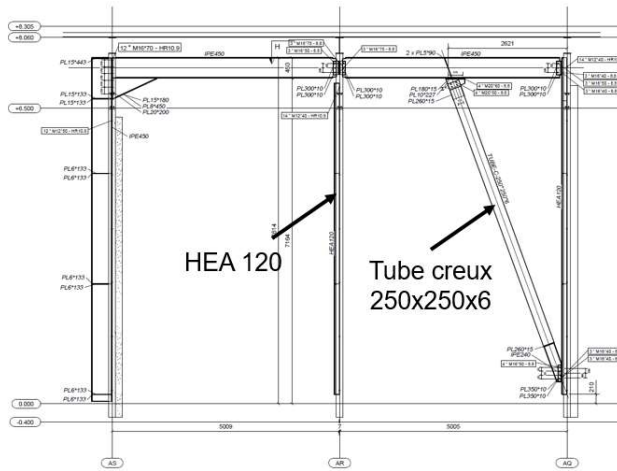
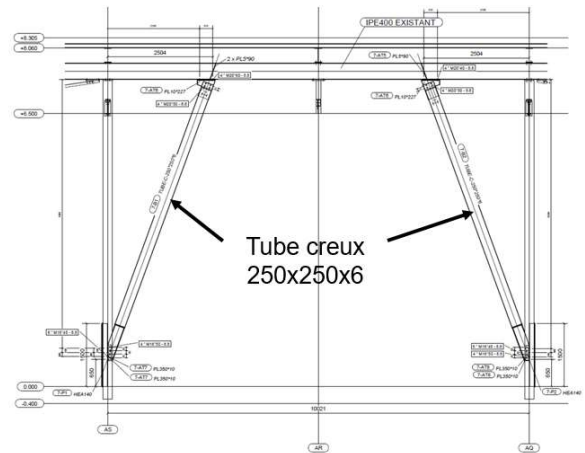


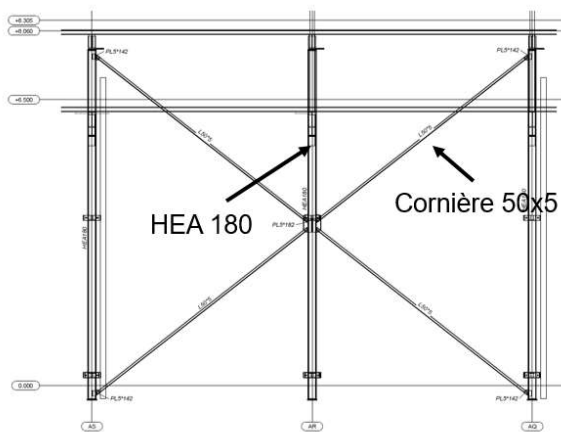
Figure 3-8 : Emplacement des stabilités verticales – Halls 1 à 3



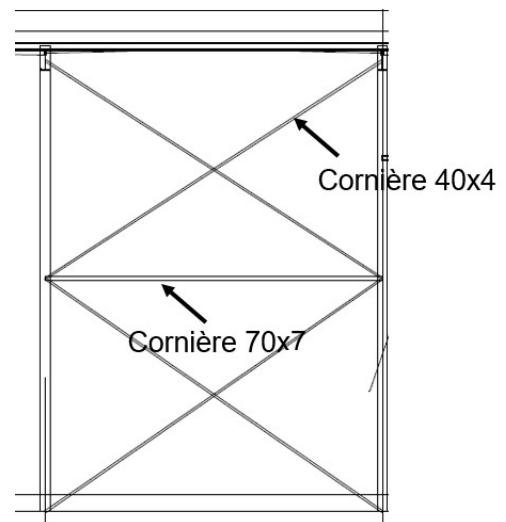
Stabilité de type 1



Stabilité de type 2



Stabilité de type 3



Stabilité de type 4

Figure 3-9 : Détails de la composition des stabilités verticales

La structure des halls 1 à 3 est également munie de poutres au vent en toiture. La figure suivante montre l'emplacement de ces poutres au vent, ainsi qu'un détail des profilés utilisés pour chacune d'entre elles :

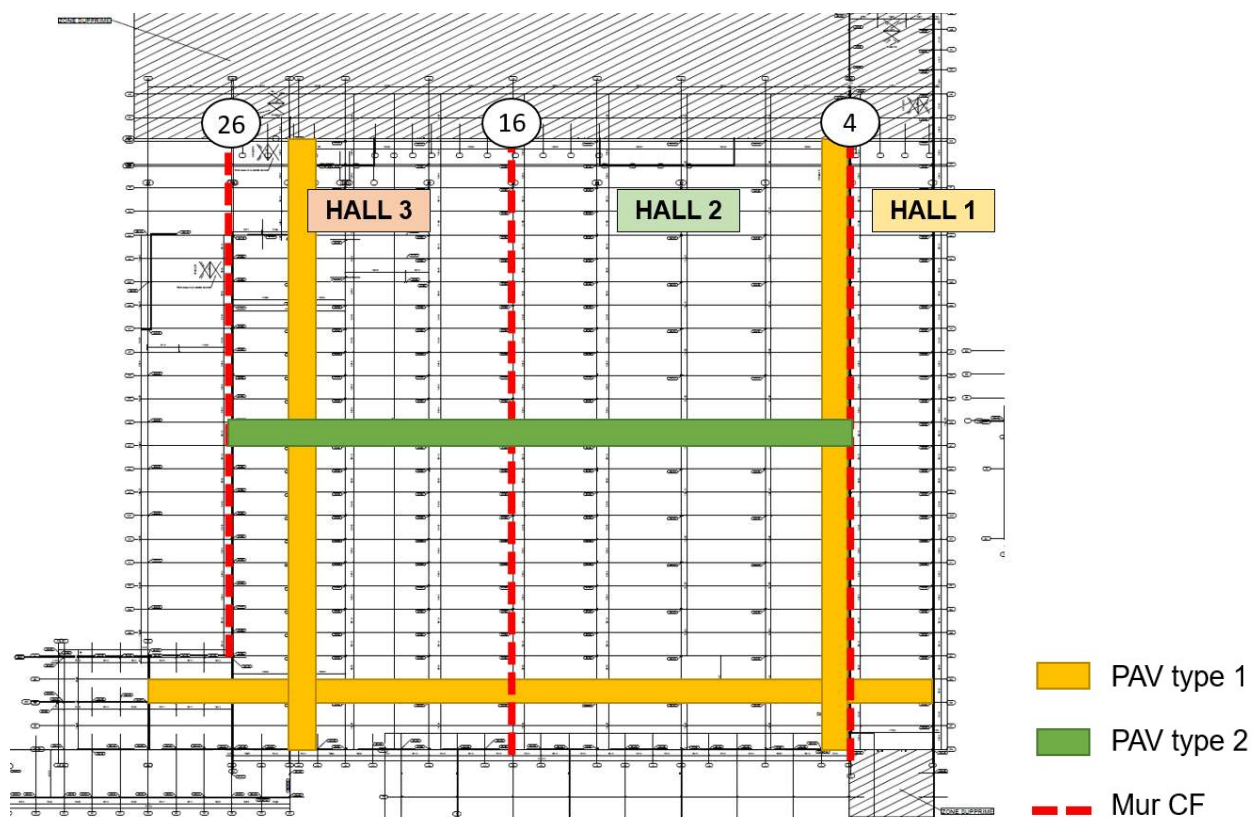


Figure 3-10 : Emplacement des poutres au vent – Halls 1 à 3

Il est à noter que tout ou partie des murs des files 16 et 26 sont constitués de parpaing de 20 cm d'épaisseur solidaires des portiques. Il est donc considéré un blocage parfait de ces files parallèlement à leur direction. Egalement, les murs en béton cellulaires en file 1 et 4 du hall 1 assurent le contreventement et la stabilisation du hall dans le sens de sa longueur, d'après les éléments transmis par le bureau d'étude technique [27]. Il a donc été considéré un blocage parfait de ces files, dans leur direction, compte tenu de la longueur et de la raideur des parois contreventante.

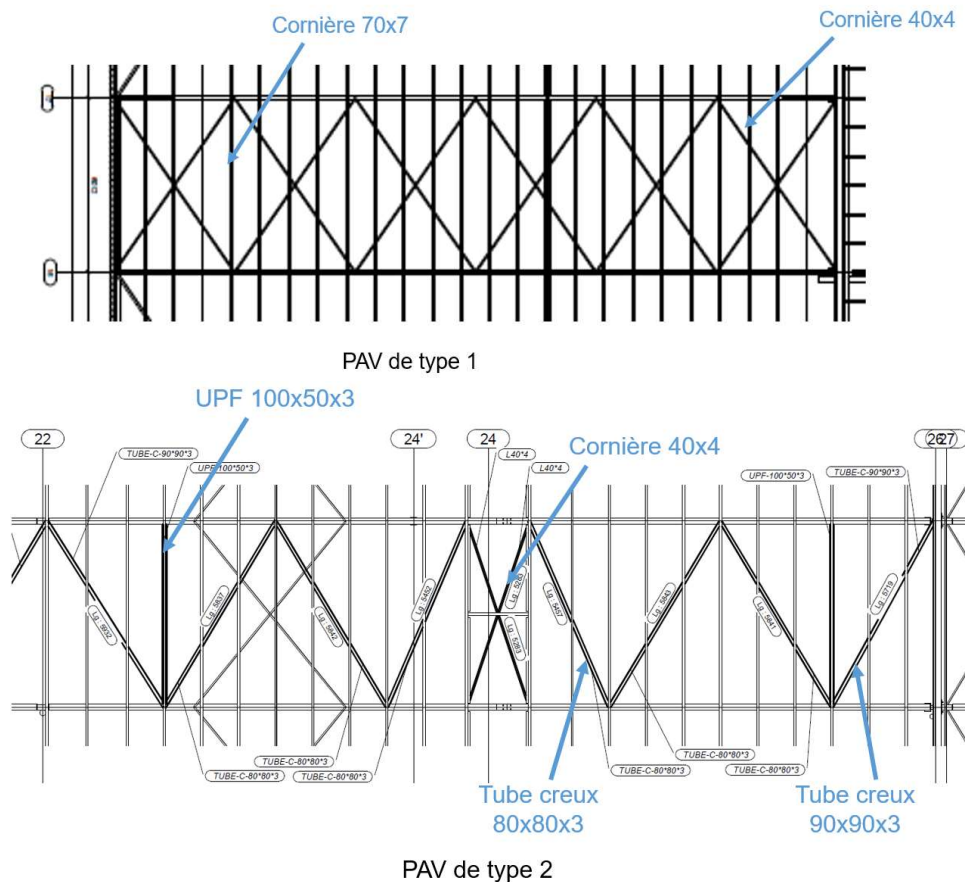


Figure 3-11 : Détails de la composition des poutres au vent

La figure suivante présente l'emplacement des stabilités verticales et des poutres au vent sur l'extension du hall 2 :

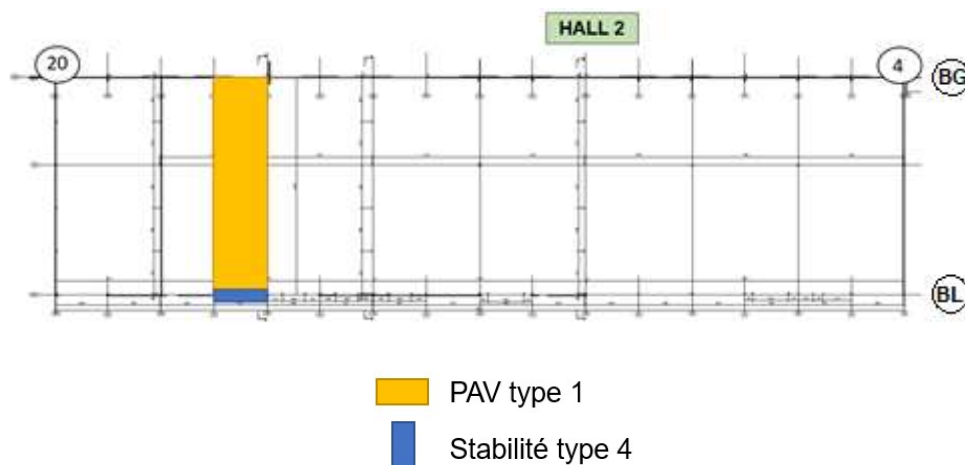


Figure 3-12 : Emplacement des stabilités verticales et des poutres au vent – Extension hall 2

Les façades en file BG et BL sont également réalisées en béton cellulaire, apportant une rigidité importante de cette zone parallèlement à ces files.

4. OBJECTIFS DE SECURITE ET METHODOLOGIE D'ETUDE

4.1. OBJECTIFS DE SECURITE ET EXIGENCES ASSOCIEES

Les trois cellules de stockage créées font l'objet d'une demande d'autorisation sous les rubriques 1510, 1530, 2662, 2663, 2925, 2910, 4734 et 4718. L'arrêté du 11 avril 2017 est applicable.

Conformément à la demande de BERRY TUFT SAS, l'étude réalisée par Efectis France vise uniquement à vérifier le non-effondrement de la structure vers l'extérieur.

4.2. METHODOLOGIE D'ETUDE

L'étude réalisée par Efectis pour vérifier les objectifs de non effondrement vers l'extérieur est décomposée en plusieurs phases parmi lesquelles :

1. Définition des scénarios d'incendie réel :
En fonction des caractéristiques du stockage et de sa localisation par rapport aux éléments porteurs de la structure des scénarios d'incendie réel sont définis. Ils sont judicieusement choisis en fonction de la configuration de la cellule et du schéma structurel.
2. Modélisation du développement de l'incendie :
Pour chaque scénario d'incendie réel défini dans la phase précédente, les champs de températures en fonction du temps dans les halls sont déterminés à partir de modèles de développement du feu. Ces champs de température sont évalués en prenant en compte les moyens de désenfumage prévus pour le bâtiment (le cas échéant).
3. Modélisation de l'échauffement des structures :
Cette phase consiste à déterminer l'évolution en fonction du temps de la température dans les éléments de structure.
L'échauffement est déterminé à l'aide des modèles de calcul définis dans les Eurocodes (Eurocode 3 partie 1-2 pour les structures en acier [20]).
4. Modélisation du comportement au feu mécanique des structures :
Cette phase consiste à évaluer le comportement au feu en situation d'incendie réel de la structure porteuse à l'aide d'un logiciel thermo-élasto-plastique aux éléments finis **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en considérant les lois de comportement définies dans l'Eurocode 3 Partie 1-2.
La structure est donc modélisée par parties représentatives, puis à partir de l'évolution de la température dans les éléments de structure, son comportement au feu est étudié pour chaque scénario ou emplacement de feu.
5. Examen des résultats au regard des exigences réglementaires :
Dans cette ultime étape, seront examinées les exigences de non ruine vers l'extérieur en fonction des résultats obtenus dans l'étape précédente.

5. CALCULS DE DEVELOPPEMENT DU FEU

5.1. METHODOLOGIE

Pour étudier le comportement thermomécanique de la structure, une combinaison entre les feux localisés et généralisés est utilisée. On suppose que le feu se développe près d'un poteau, les sollicitations thermiques générées par le feu localisé sont appliquées au voisinage de ce poteau. Les sollicitations thermiques des feux généralisés sont appliquées dès lors qu'elles deviennent prépondérantes par rapport au feu localisé. Les localisations les plus critiques sont déterminées pour étudier la stabilité au feu des structures.

5.2. OUTILS DE MODELISATION

5.2.1. Outils de modélisation des effets locaux

Dans le cas des feux localisés, on choisit de calculer les températures proches du foyer qui sont susceptibles de solliciter directement les éléments de structures situés à proximité (en particulier les poteaux). On détermine à partir d'un jeu d'équations algébriques et des caractéristiques d'une source de chaleur, la distribution du champ de température dans la zone au voisinage du foyer.

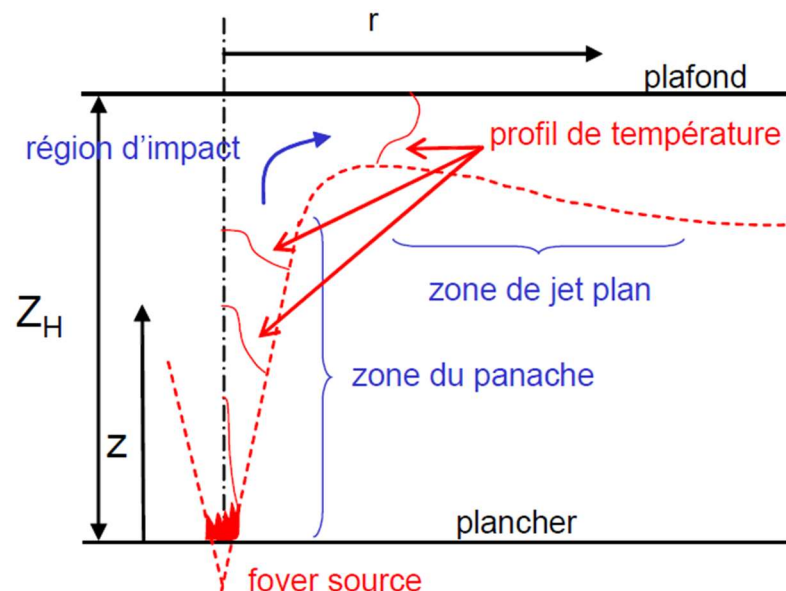


Figure 5-1 : représentation des écoulements en panache et sous plafond

Les formulations algébriques sont basées sur deux théories :

- Le développement d'un panache axisymétrique soumis aux forces de poussée pour le calcul des températures dans le panache de fumée [25];
- Les écoulements de jets chauds impactant et pariétaux pour le calcul du profil de température sous plafond [26].

5.2.2. Outils de modélisation des effets globaux

Dans le cas des feux généralisés, on recherche les effets thermiques sur l'ensemble des structures. Le champ de température dans le bâtiment est estimé à partir du modèle de zones CFAST [23][24] développé par le NIST. Ce modèle résout les équations de bilan d'énergie et de masse appliquées à des zones de propriétés homogènes qui sont définies sur la base d'hypothèses de stratification parfaite. Ces zones sont donc définies sur la base de plusieurs compartiments qui sont divisés en une zone chaude (de fumées et de gaz chauds) et une zone froide (pouvant également contenir des produits de la combustion).

Cet outil de calcul a été adapté et validé au sein d'Efectis France pour la simulation d'incendies dans de nombreux bâtiments (entrepôts, salles de spectacles, hangars, ...).

Il est mis en œuvre dans un domaine de calcul représentant la cellule qui peut être subdivisée en compartiments utiles à l'étude. Le code permet de considérer les différents ouvrants (entrant et sortant).

Le modèle de zones fournit, en fonction du temps, les principaux paramètres suivants pour chaque compartiment :

- La température des gaz chauds (couche supérieure) ;
- La température des gaz frais (couche inférieure) ;
- La hauteur de l'interface entre la couche supérieure et inférieure.

Ces paramètres dépendent essentiellement du débit calorifique du foyer, de la géométrie des cellules et des ouvertures en partie haute et basse.

5.3. DEFINITION DU SCENARIO INCENDIE

De nombreux scénarios de feu peuvent être envisagés au sein d'une cellule. Ils doivent prendre en compte les situations les plus probables au regard du stockage, de la configuration de la cellule. Un stockage de type rack est pris en compte pour l'étude du développement du feu. Ce type de stockage conduit à des cinétiques de développement plus rapide que des stockages « masse ».

On retiendra différents scénarios de feu définis en termes de localisation (position, hauteur...) et de cinétique de l'incendie (nature des produits, charge calorifiques, vitesse de développement, etc...). Pour cette étude, on considère systématiquement qu'un feu localisé dans un premier temps va se propager jusqu'à une généralisation à l'ensemble de la cellule. On s'intéresse ici à des scénarios fortement développés pouvant entraîner une ruine de la structure.

L'inflammation débute par l'ignition d'une palette. La propagation du feu de proche en proche s'effectue lorsque le feu s'est bien développé sur toute la palette. L'incendie se propage aux palettes situées au-dessus, favorisé par l'espacement entre les palettes et la convection qui échauffe préalablement les cartons. L'inflammation des faces externes atteint ensuite les produits conditionnés. On peut obtenir alors une propagation verticale rapide du feu, sur tous les niveaux.

La vitesse de cinétique théorique de feu est alors considérée proportionnelle au temps tel que le débit $Q=(t/\alpha)^2$, avec t le temps en seconde et α le coefficient de cinétique en $s/MW^{0.5}$. À titre indicatif, la Figure 5-2 donne la vitesse de cinétique de l'incendie pour les cas de développements de feu médium ($\alpha=300 s/MW^{0.5}$: typique de locaux de bureaux), rapide ($\alpha=150 s/MW^{0.5}$: typique de commerces) et très rapide ($\alpha=75 s/MW^{0.5}$: typique de produits très inflammables et de stockage en grande hauteur).

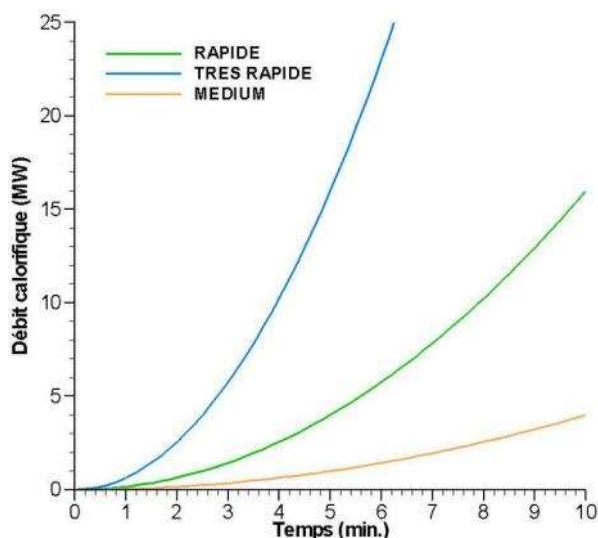


Figure 5-2 : Comparaison de différentes cinétiques d'incendie théoriques

Le bâtiment dispose de plusieurs cellules séparées par des éléments coupe-feu. On propose d'étudier un scénario dans chacune des cellules.

Le stockage n'étant pas connu, on considère un stockage de matériaux principalement en plastique stockés dans des racks. Pour ce type de matériau et de stockage, une cinétique rapide de développement du feu est prise en compte.

5.4. HYPOTHESES DE MODELISATION

Les modélisations des cellules étudiées avec CFAST sont représentées en Figure 5-3 ci-dessous.

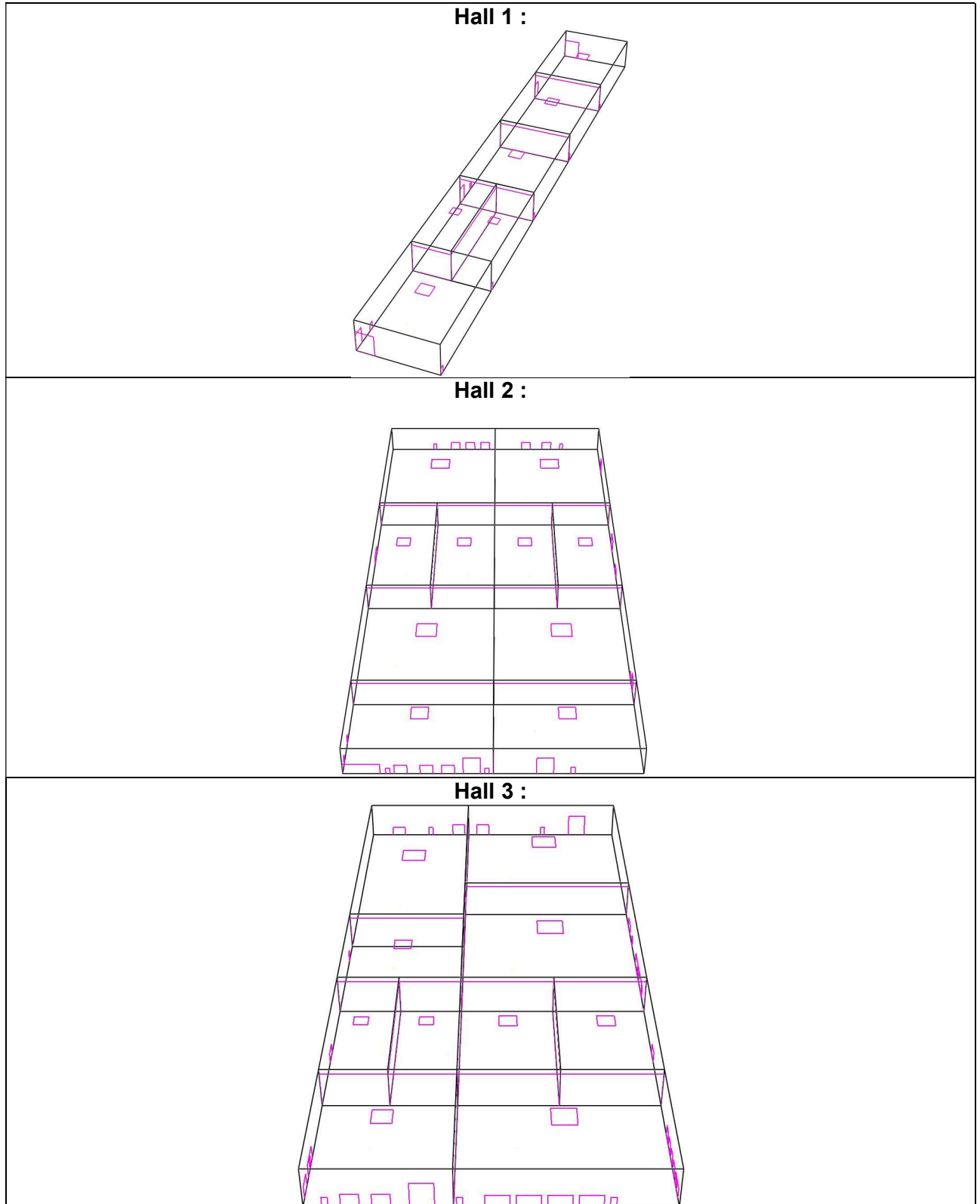


Figure 5-3 : Modélisation des cellules avec CFAST

Les cellules ont été divisées en plusieurs compartiments fictifs de manière à obtenir une discrétisation des températures dans le volume. Le volume général respecte les dimensions des cellules.

Les ouvertures sont placées en partie basse, représentent les portes d'accès aux halls. Des portes fictives ont été rajoutées afin de permettre l'apport en comburant du foyer. En effet, du fait de la non étanchéité du bardage des cellules, il est supposé que la puissance du foyer n'est pas limitée par l'oxygène.

De plus, des exutoires représentant 2% de la surface de chaque compartiment s'ouvrent lorsque la température au sein d'un canton atteint 100°C.

5.5. RESULTATS DES SOLlicitATIONS THERMIQUES

5.5.1. Hall 1

La Figure 5-4 ci-dessous présente le débit calorifique du foyer dans le hall 1 :

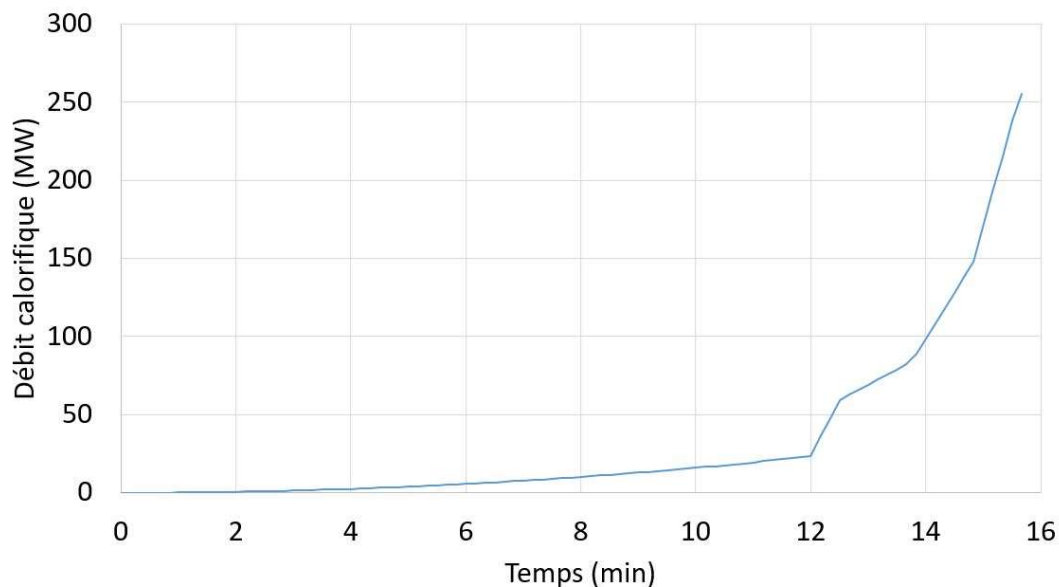


Figure 5-4 : Débit calorifique du foyer dans le hall 1

On note dans un premier temps (12 premières minutes), un développement du feu correspondant à la cinétique rapide prise en compte. Ensuite des augmentations brutales de puissance sont observées correspondant à l'allumage de surfaces importantes de combustible du fait des conditions de température atteintes dans les volumes (conditions d'embrassement généralisé).

Les courbes de température sont présentées en fonction de la hauteur et de l'éloignement radial par rapport à la position du départ de feu :

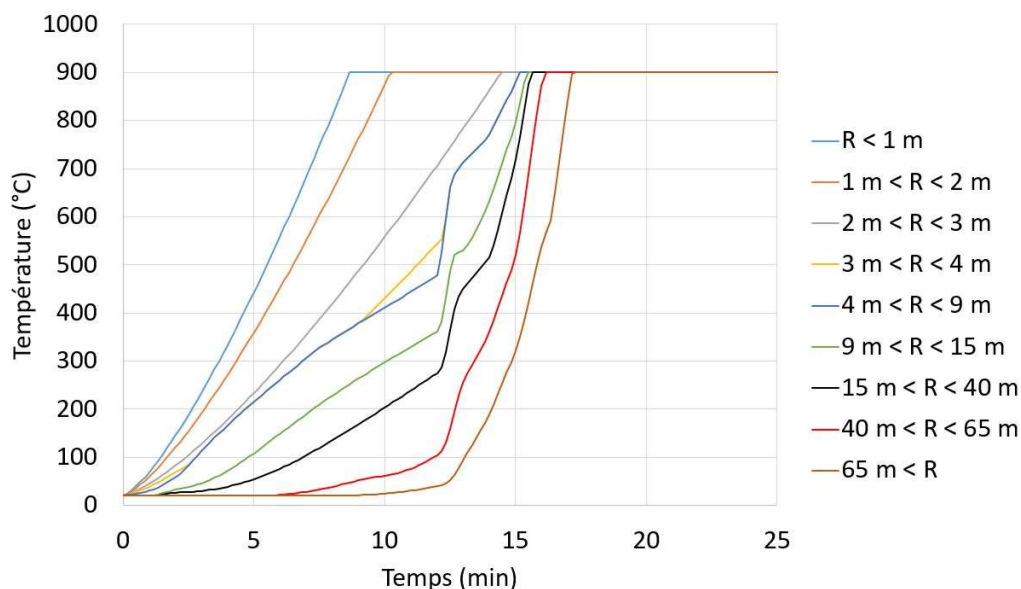


Figure 5-5 : Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement radial par rapport au foyer

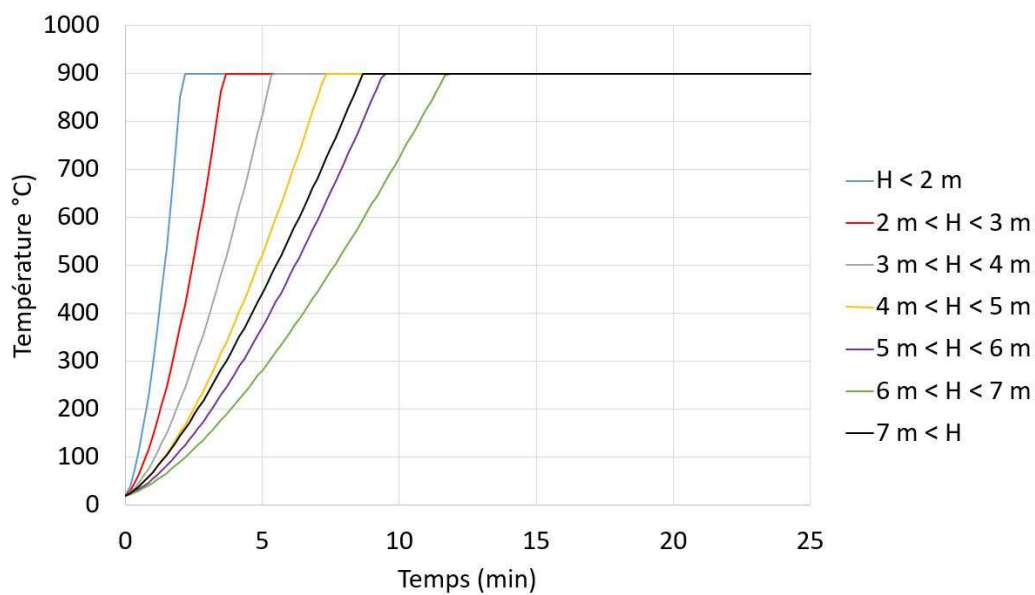


Figure 5-6 : Évolution de la température au niveau d'un poteau proche du feu en fonction de la hauteur

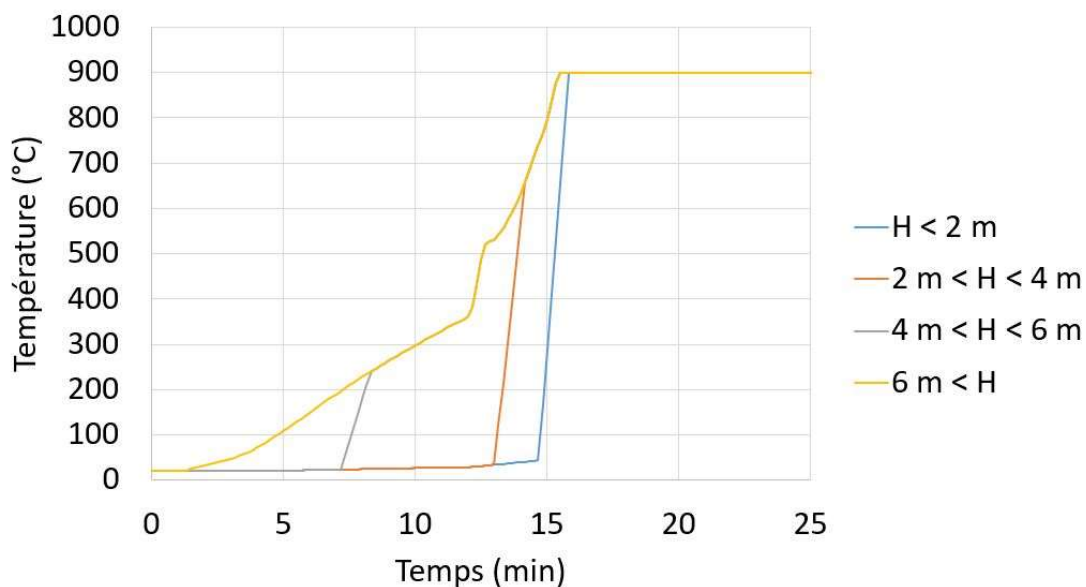


Figure 5-7 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à moins de 15 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

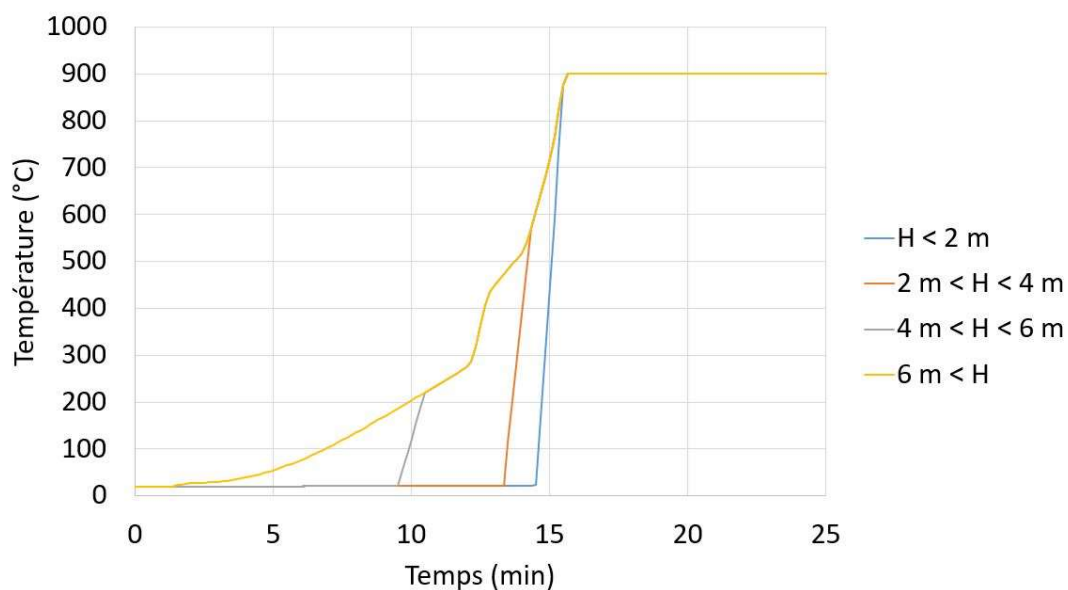


Figure 5-8 : Évolution de la température au niveau d'un poteau entre 15 m et 40 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

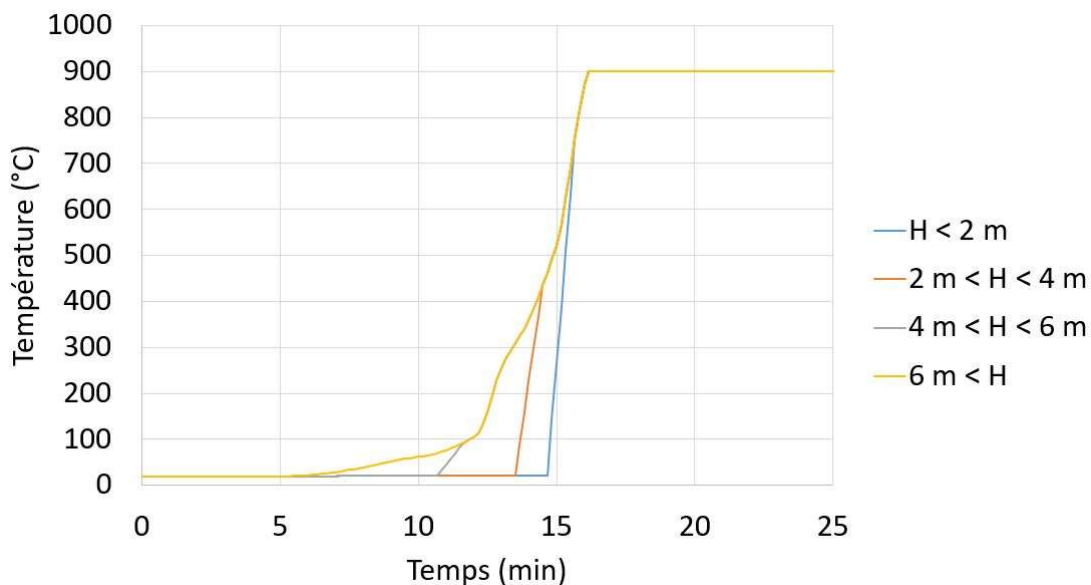


Figure 5-9 : Évolution de la température au niveau d'un poteau entre 40 m et 65 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

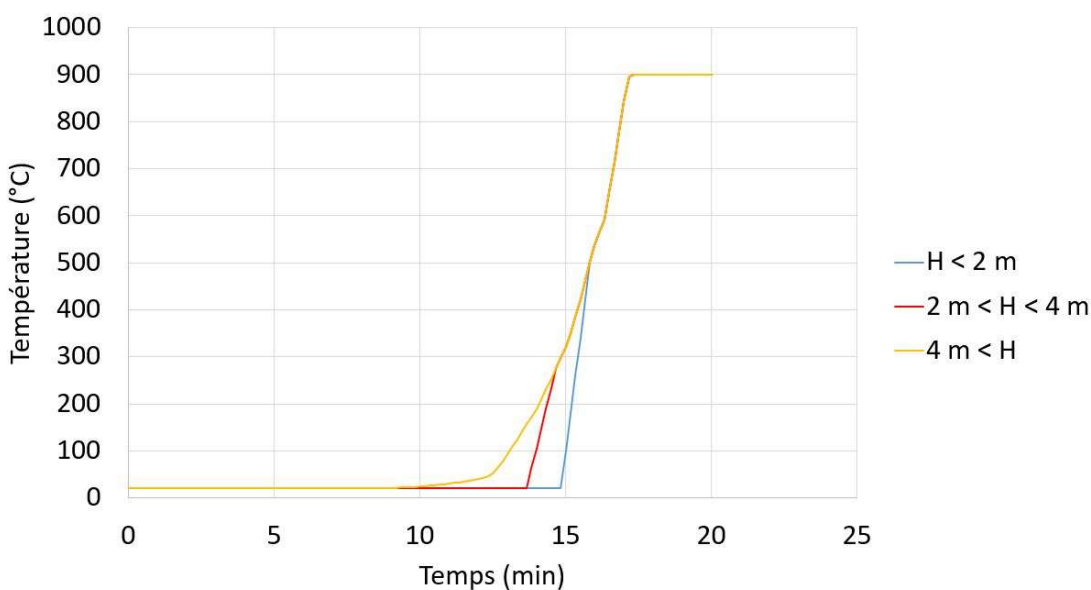


Figure 5-10 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à plus de 65 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

5.5.2. Hall 2

La Figure 5-11 ci-dessous présente le débit calorifique du foyer dans le hall 2 :

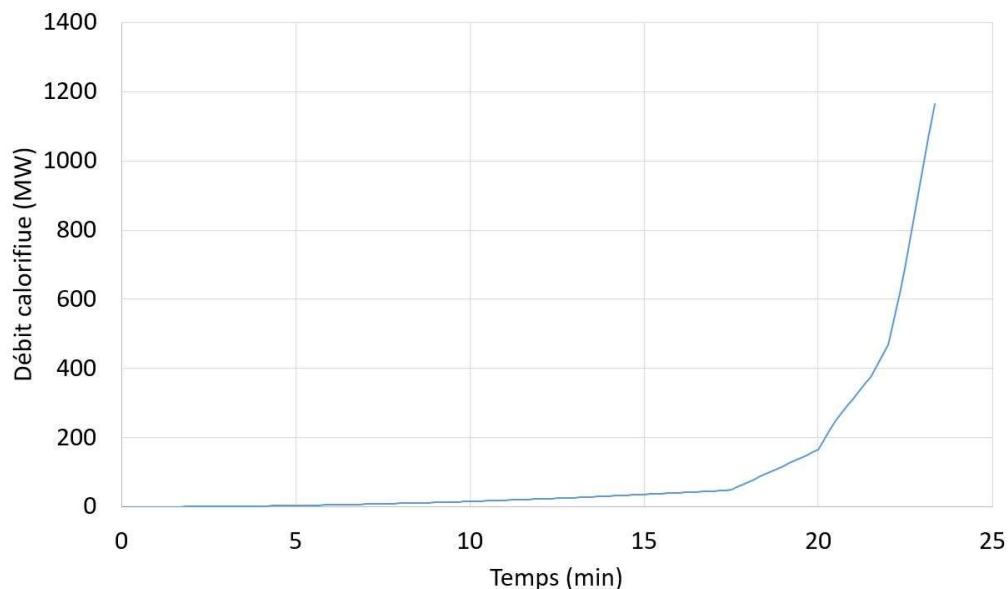


Figure 5-11 : Débit calorifique du foyer

On retrouve les mêmes phénomènes que ceux décrits précédemment avec un léger décalage dans le temps des conditions d'embrasement généralisé du fait du plus grand volume du hall.

Les courbes de température sont présentées en fonction de la hauteur et de l'éloignement radial par rapport à la position du départ de feu.

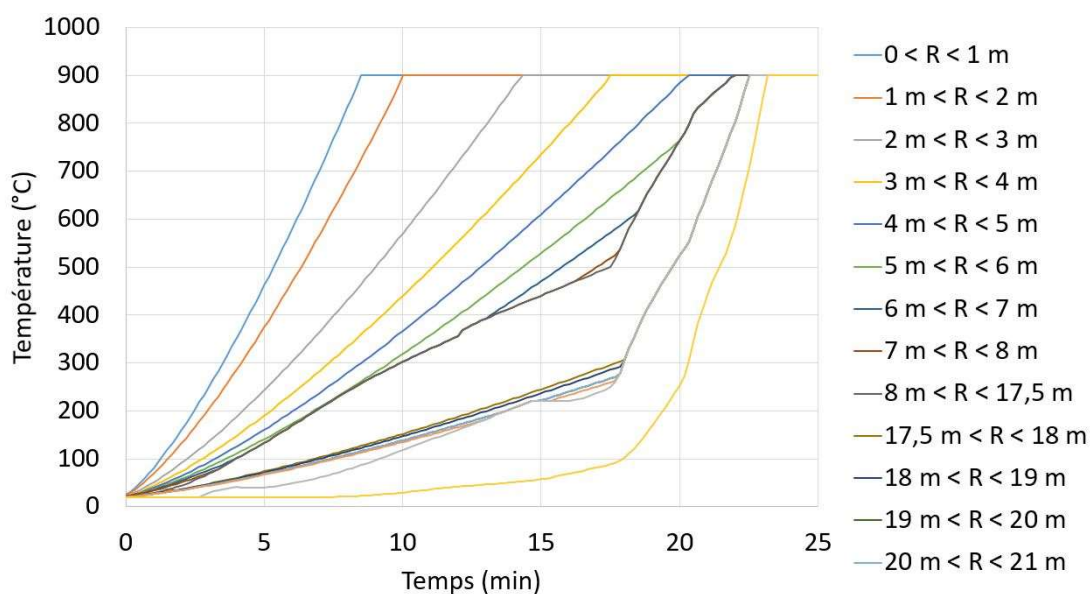


Figure 5-12 : Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement radial par rapport au foyer

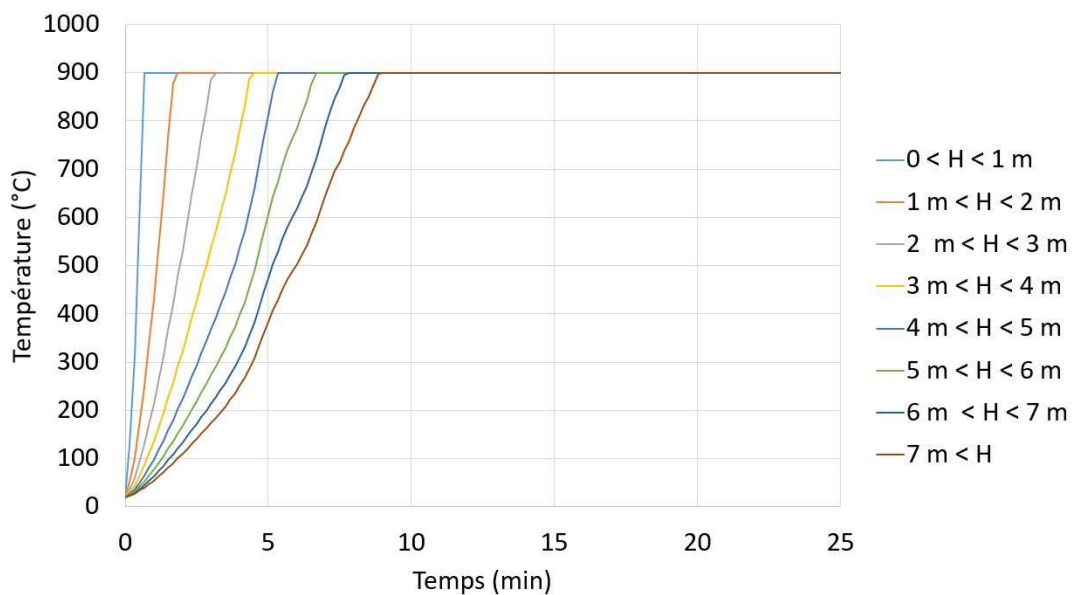


Figure 5-13 : Évolution de la température au niveau d'un poteau proche du feu en fonction de la hauteur

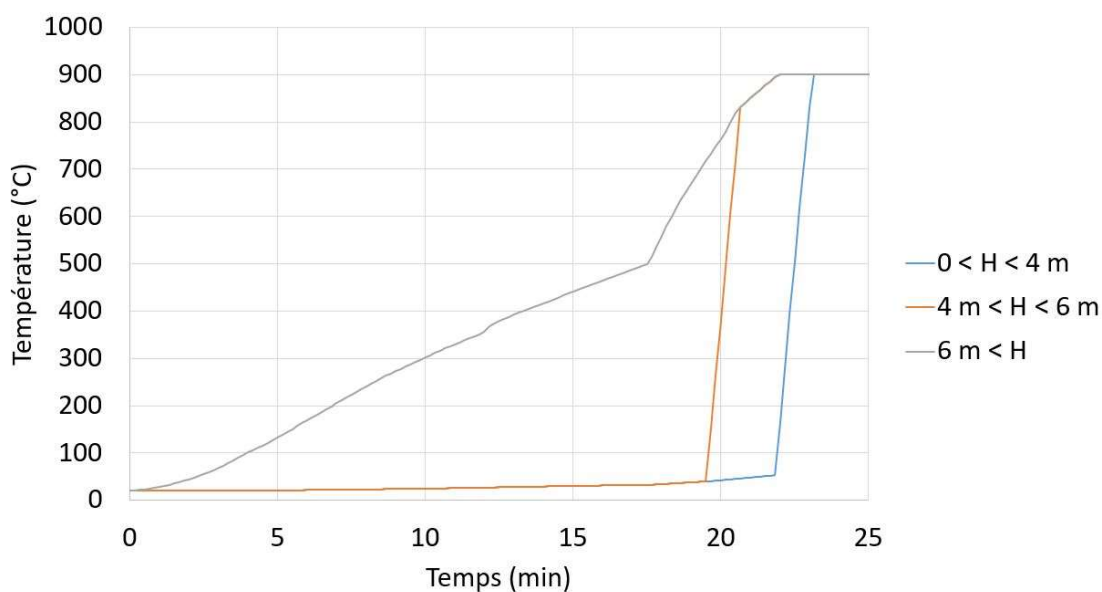


Figure 5-14 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à moins de 17 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

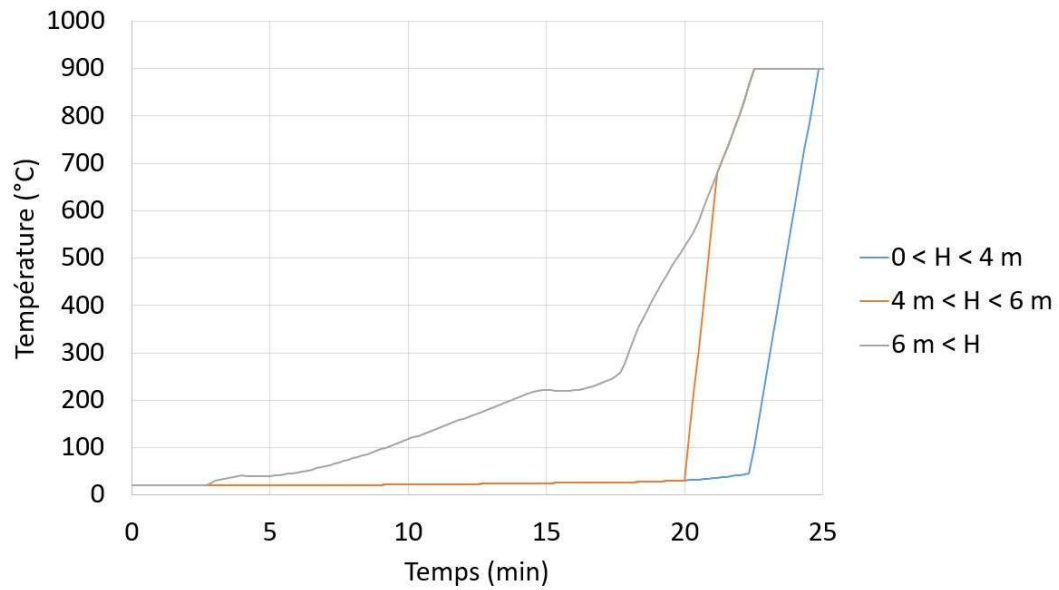


Figure 5-15 : Évolution de la température au niveau d'un poteau entre 17 m et 35 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

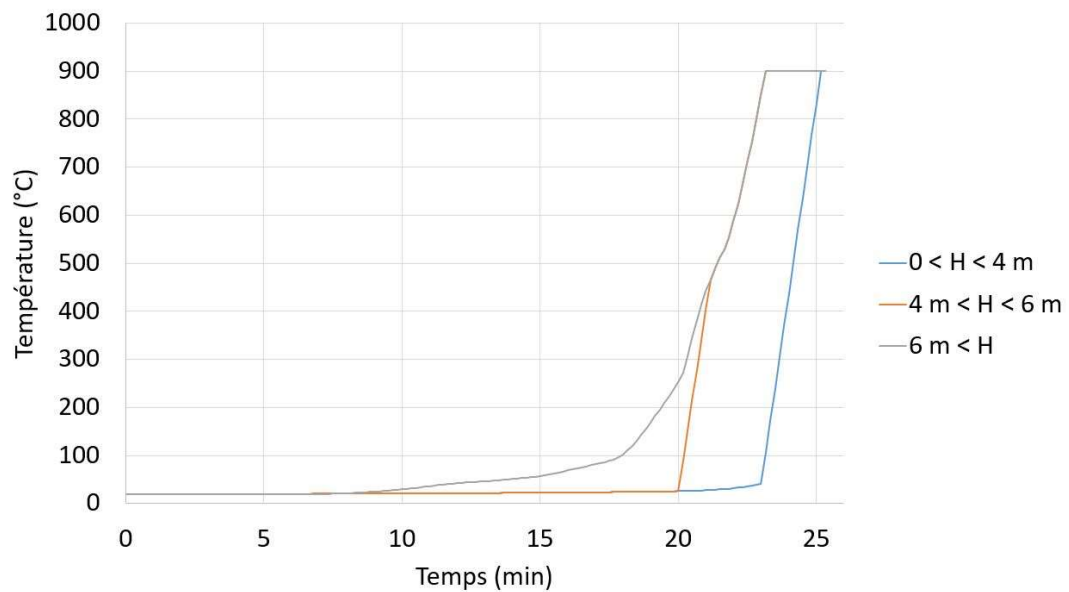


Figure 5-16 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à plus de 35 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

5.5.3. Hall 3

La Figure 5-17 ci-dessous présente le débit calorifique du foyer dans le hall 3 :

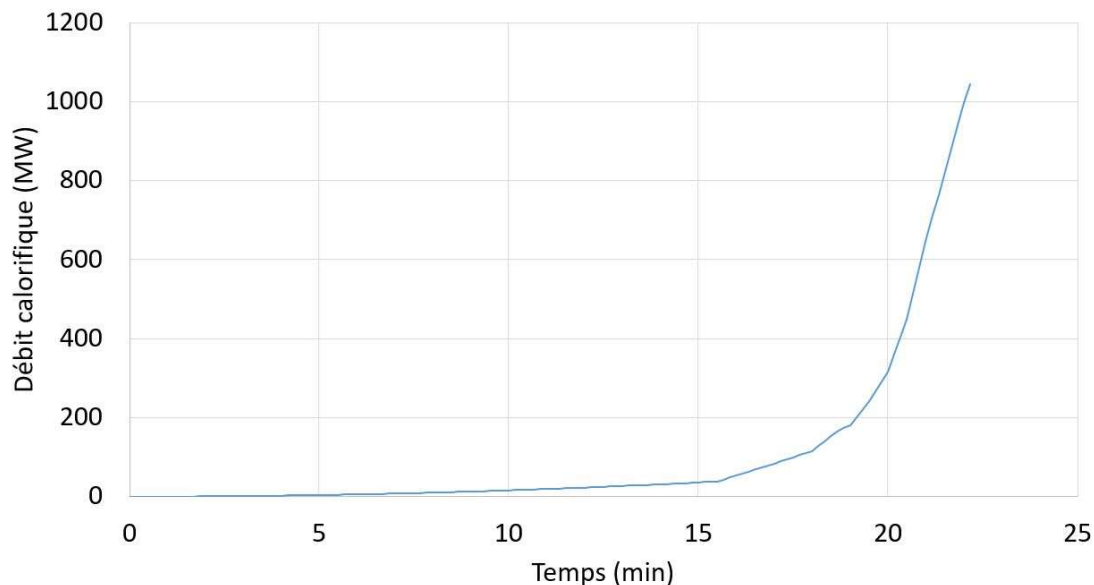


Figure 5-17 : Débit calorifique du foyer

Compte tenu des volumétries assez semblables, le développement du feu et l'évolution temporelle de la puissance est assez proche de celle du hall 2.

Les courbes de température sont présentées en fonction de la hauteur et de l'éloignement radial par rapport à la position du départ de feu.

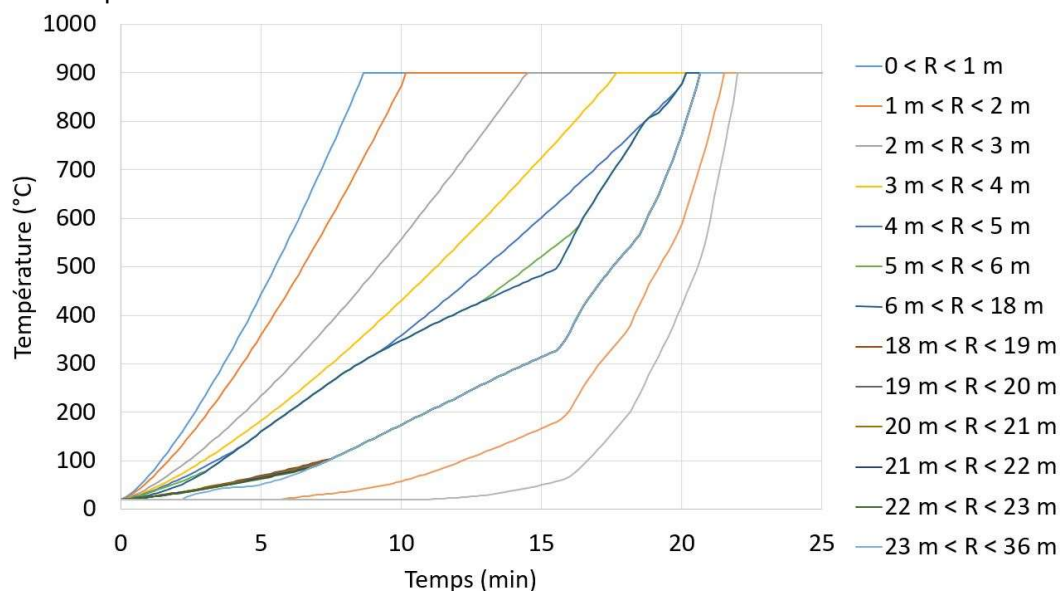


Figure 5-18 : Évolution de la température au niveau des poutres en fonction de l'éloignement radial par rapport au foyer

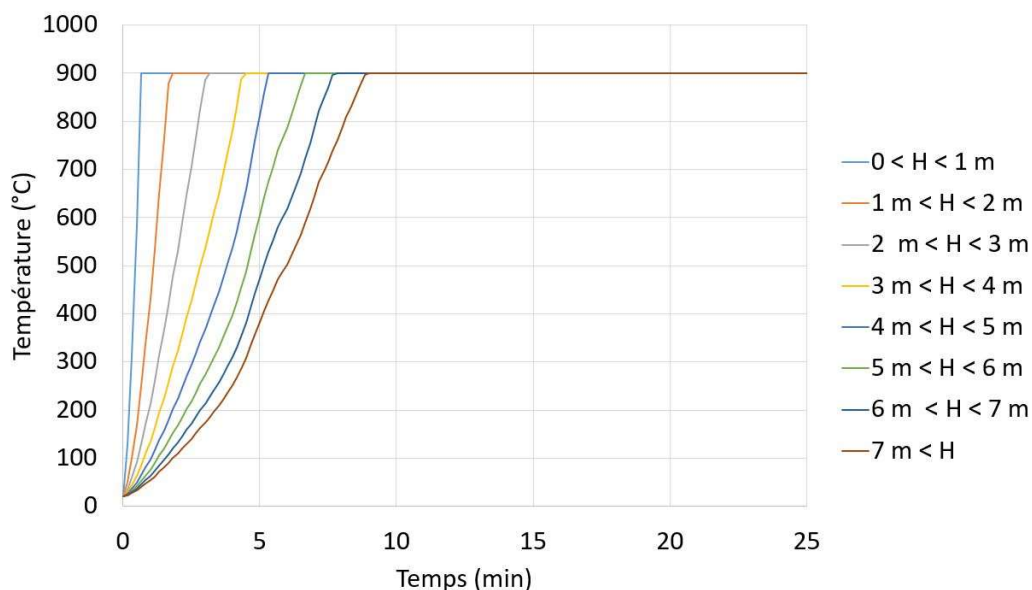


Figure 5-19 : Évolution de la température au niveau d'un poteau proche du feu en fonction de la hauteur

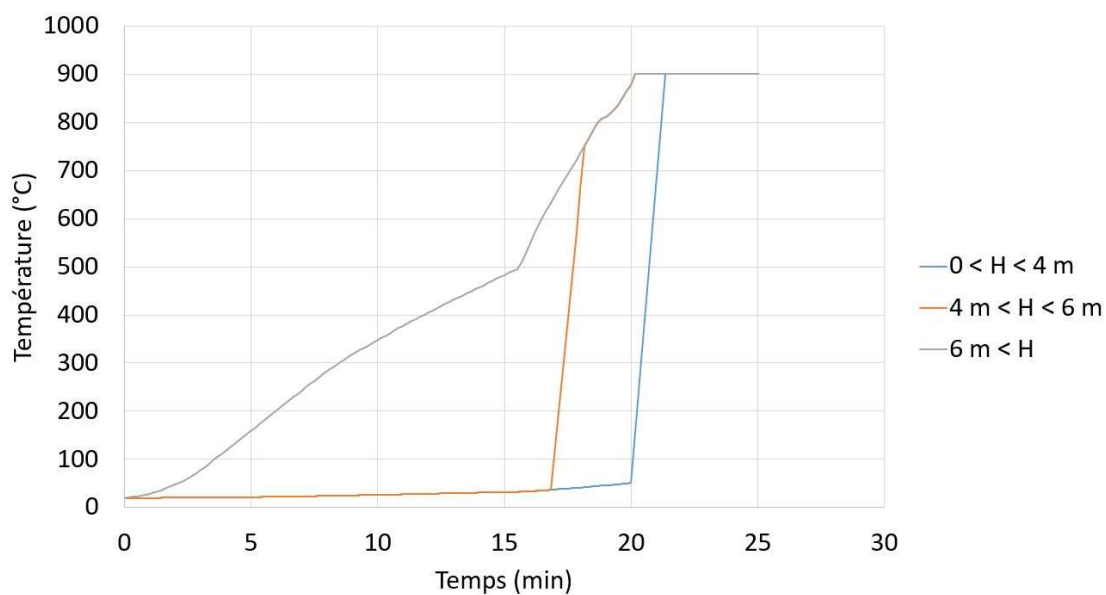


Figure 5-20 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à moins de 18 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

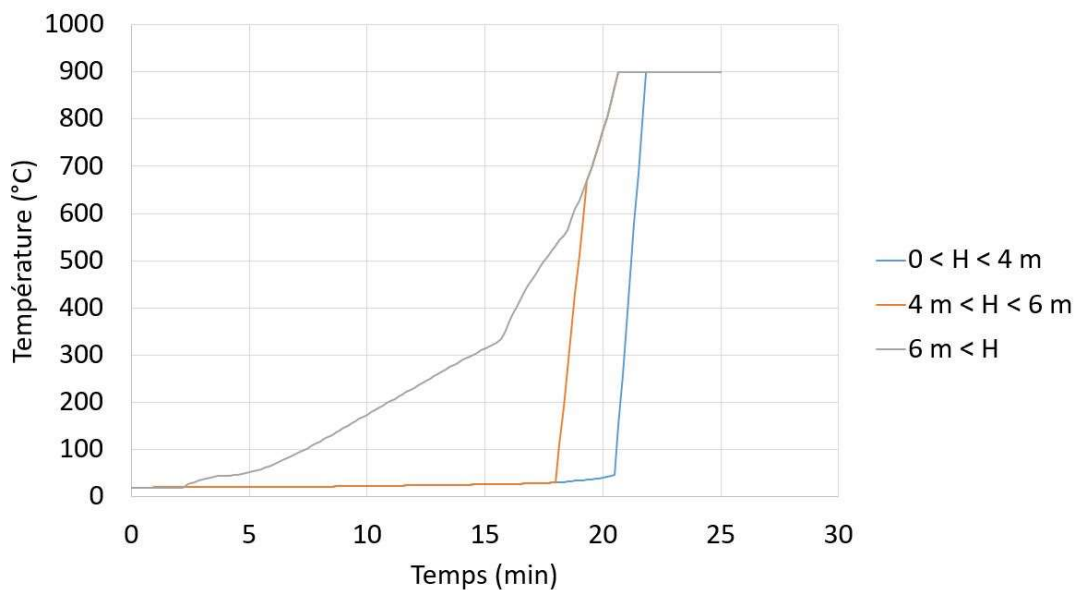


Figure 5-21 : Évolution de la température au niveau d'un poteau entre 18 m et 36 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

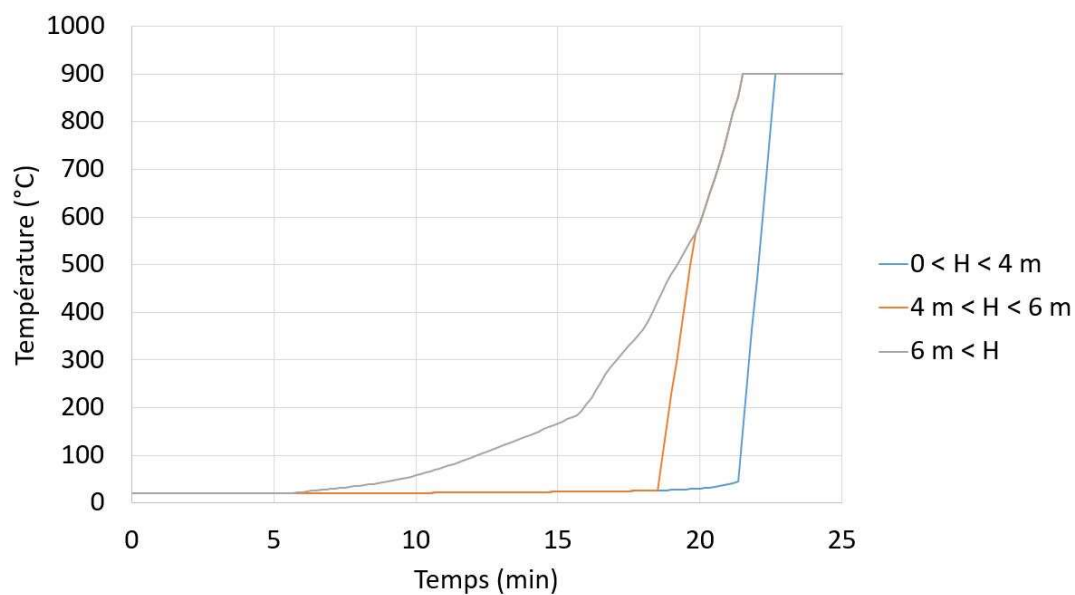


Figure 5-22 : Évolution de la température au niveau d'un poteau entre 36 m et 48 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

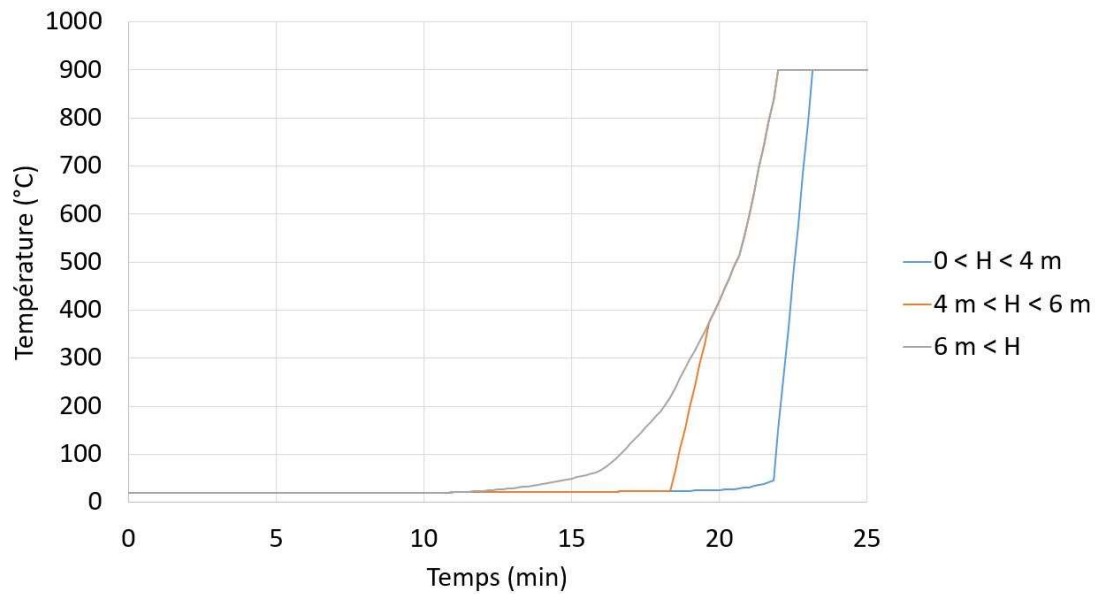


Figure 5-23 : Évolution de la température au niveau d'un poteau à plus de 48 m du départ de feu, en fonction de la hauteur

6. HYPOTHESES DE CALCUL THERMIQUES ET THERMOMECHANIQUES

6.1. HYPOTHESES DE MODELISATION

6.1.1. Modèles réalisés

Compte tenu de la liaison entre les poteaux des halls 1 et 2 et le mur en béton cellulaire en file 4, on considère que la structure est continue sur les halls 1, 2 et 3. Ainsi, plusieurs modèles sont réalisés en deux dimensions pour étudier la structure des halls 1, 2 et 3 à partir du logiciel de calculs thermomécaniques LENAS [22].

La figure suivante permet de localiser les différents modèles réalisés :

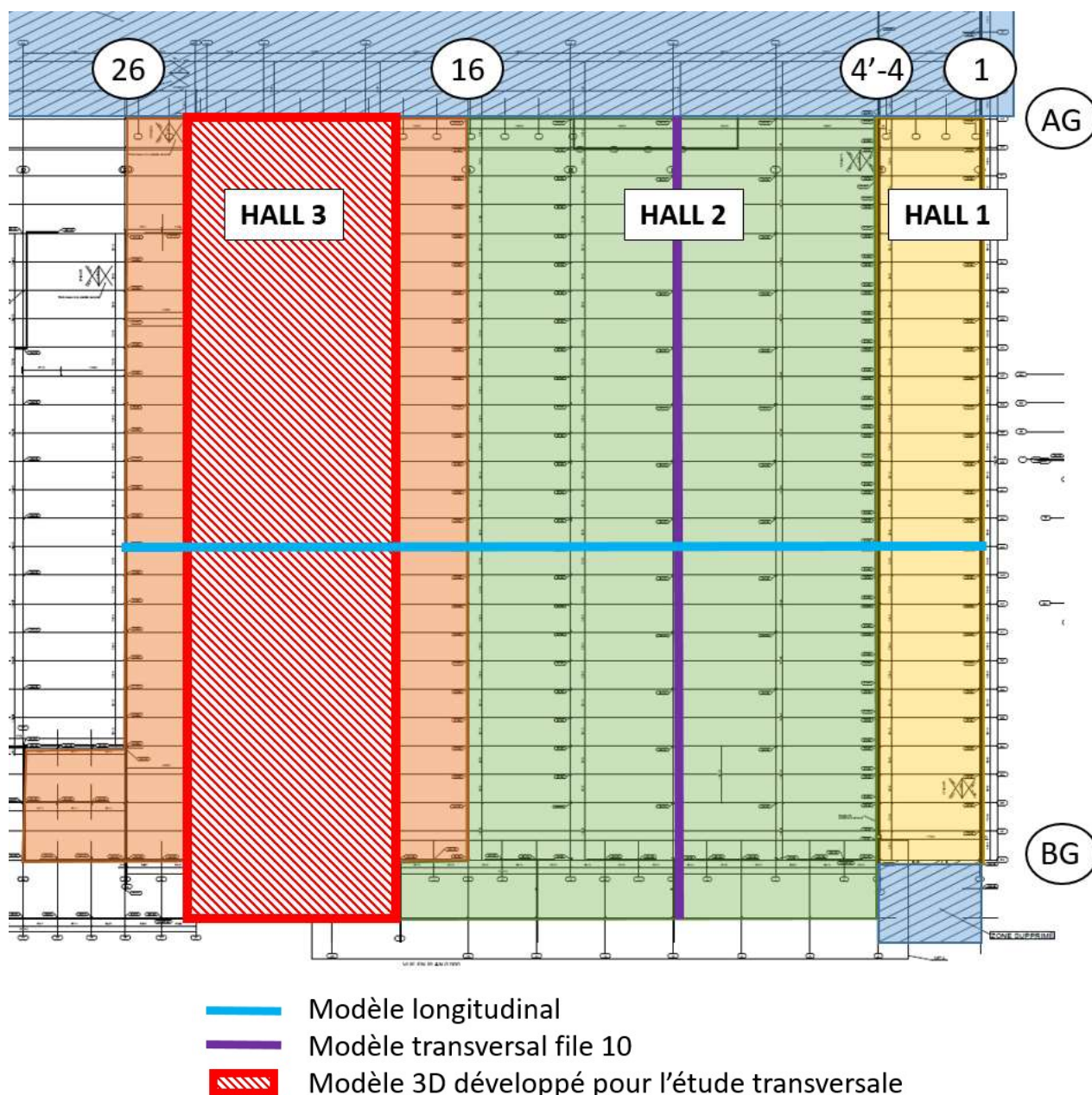


Figure 6-1 : Localisation des modèles réalisés

La figure suivante présente le modèle réalisé pour l'étude des halls 1, 2 et 3 dans le sens longitudinal :

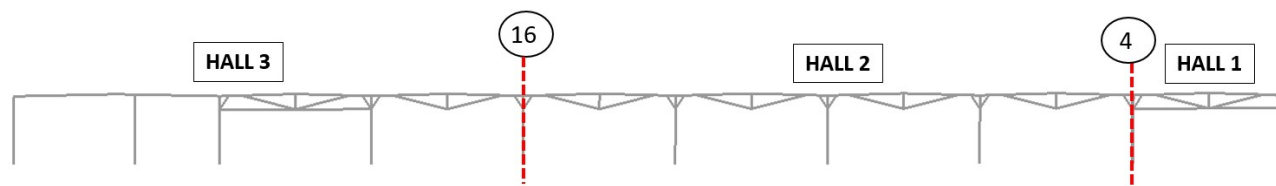


Figure 6-2 : Modèle longitudinal

Au niveau du mur séparatif entre les halls 1 et 2, les poteaux sont considérés reliés en tête par deux broches de 16 mm de diamètre et de classe 8.8.

Par ailleurs, la prise en compte des murs en béton cellulaire situés de part et d'autre du hall 1 (en files 1 et 4), dont la raideur a été transmise par le bureau d'étude [27], permet de s'affranchir des problèmes d'effondrement dans le sens transversal pour ce hall.

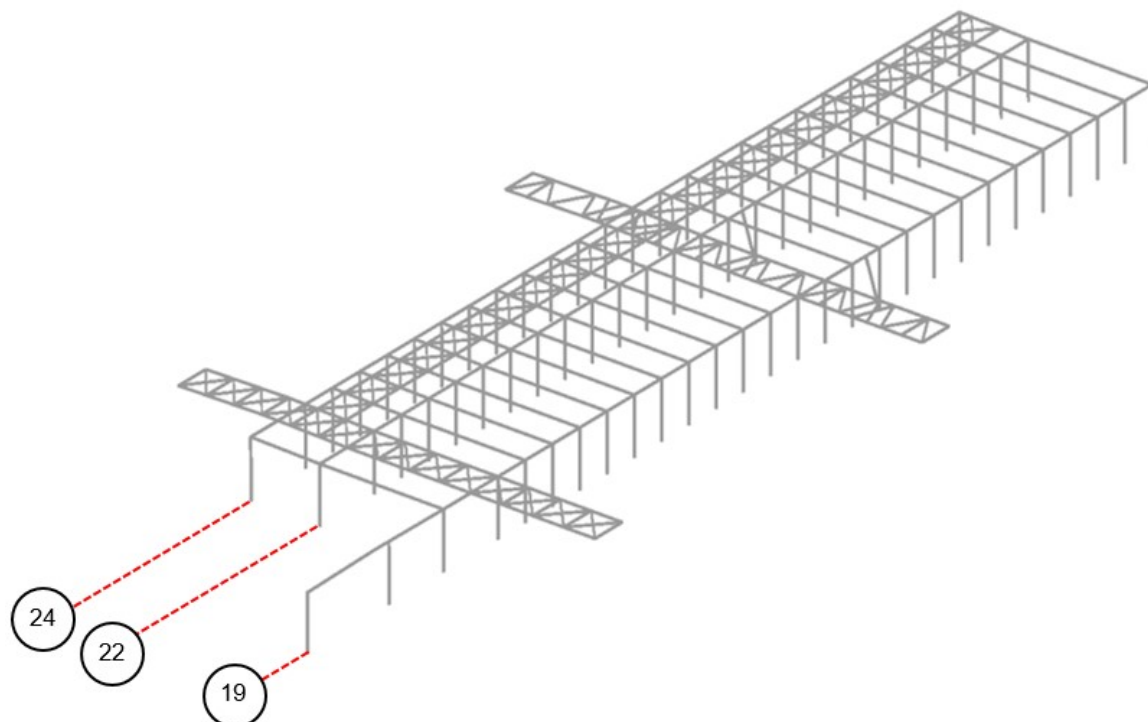
La figure suivante montre le modèle réalisé pour l'étude du hall 2 dans le sens transversal. Ce modèle est réalisé en deux dimensions et représente la file 10 qui est représentative des autres files intérieures au hall 2.



Figure 6-3 : Modèle réalisé pour l'étude du hall 2 dans le sens transversal

Compte tenu des résultats satisfaisants obtenus sur le modèle en deux dimensions du hall 2, présentés au §7.2.1, et des similitudes des files sur le hall 2, Il est considéré que ce modèle est suffisant pour conclure sur le comportement au feu du hall 2 dans le sens transversal. En effet, une modélisation d'une file unique ne tient pas compte des effets de reports de charge possibles entre files par les poutres-au-vents favorables à la stabilisation d'ensemble.

En revanche, les files du hall 3 sont différentes et certaines ne sont pas munies de contreventements verticaux. L'étude du comportement au feu de ce hall par le biais d'un modèle 2D serait donc trop défavorable puisqu'il ne prendrait pas en compte la présence de poutres au vent et leur effet global sur le comportement du hall 3. A ce titre, un modèle 3D, présenté sur la figure ci-dessous, est réalisé pour l'étude de ce hall. De façon à simplifier au maximum le modèle, seules les files de poteaux intérieures (24, 22 et 19 de gauche à droite sur la figure suivante), les poutres au vent et les éléments de contreventement sont modélisés.



a) Vue en 3D du modèle transversal développé pour l'étude du hall 3



b) Vue en coupe transversale

Figure 6-4 : Modèle réalisé pour l'étude du hall 3

6.1.2. Sections des éléments

Les sections des éléments considérées dans les modèles sont telles que décrites au paragraphe §3.2.

6.1.3. Matériaux

Les matériaux utilisés dans les modèles réalisés correspondent aux matériaux donnés dans la note de calcul [9].

Ainsi, les éléments réalisés à partir de tubes sont réalisés en acier E24, dont la limite d'élasticité est égale à 235 MPa. Les éléments réalisés à partir de HEA, d'IPE ou d'UPN sont réalisés en acier E28, dont la limite d'élasticité est égale à 275 MPa.

Outre la limite d'élasticité, les caractéristiques mécaniques de l'acier à 20°C sont les suivantes :

- Masse volumique $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- Module de Young $E = 210\,000 \text{ MPa}$;
- Coefficient de Poisson $\nu = 0,3$

Les caractéristiques thermomécaniques de l'acier sont celles de l'Eurocode 3, partie 1-2 [20].

6.2. CONDITIONS DE CHARGEMENT DES ELEMENTS

6.2.1. Charges appliquées sur la structure

Les charges appliquées sur la structure sont issues de la note de calcul [9] et sont les suivantes :

- Charges permanentes :
 - Poids propre des ossatures : calculé pour une masse volumique de 7850 kg/m³ pour les éléments métalliques ;
 - Poids propre de la couverture : 55 daN/m²
- Charges climatiques :
 - Neige : S = 35 daN/m² hors zone d'accumulation ;
 - Vent : Q_p = 60 daN/m² ;

Remarque : conformément aux recommandations de l'Eurocode 0 [14], aucune charge d'exploitation n'a été considérée en toiture en situation d'incendie.

6.2.2. Combinaison de charges

La charge appliquée en situation d'incendie est déterminée conformément à l'Eurocode 0 [14], qui définit la combinaison de charges à appliquer dans le cas d'un bâtiment à usage de stockage comme étant la plus défavorable parmi les suivantes :

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

Avec :

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

La combinaison de charges prenant en compte le vent est la plus sécuritaire vis-à-vis du mode de ruine car ce dernier favorise le déplacement de la structure vers l'extérieur.

6.3. CONDITIONS AUX LIMITES

Conformément à la note de calcul [9], tous les poteaux du hall 1, situés sur les files 1 et 4' sont considérés articulés en pied.

Par ailleurs, les poteaux des halls 2 et 3 sont également considérés articulés en pied, à l'exception des poteaux situés sur les files 4 et 22. Ces derniers sont considérés encastres en pied.

6.4. ÉCHAUFFEMENT DES ELEMENTS

6.4.1. Éléments non protégés

La détermination de l'échauffement des éléments en acier non protégés s'obtient par application des modèles de calcul simplifiés de l'Eurocode 3 partie 1-2 + AN [20]. Les conditions aux limites pour ces calculs de transfert thermique (coefficient de convection et coefficients d'émissivité) sont conformes aux recommandations des Eurocodes.

Les principales hypothèses de calcul formulées sont :

- La température est supposée uniforme sur toute la section, du fait de la conductivité thermique élevée de l'acier ;
- Les profilés sont supposés exposés sur 4 faces.

La massiveté des principaux profilés utilisés sur la structure est décrite dans le tableau suivant ;

Élément	Profilé	Massivité (m ⁻¹)
Poteaux	IPE 330	200
	HEA 220	195
	IPE 300 + HEA 140 (poteau renforcé)	109
	HEA 180	226
Poutres principales	IPE 360	186
Pannes	IPE 100	387
	IPE 400	174
Éléments de renforcement et stabilités	Cornière 40x4	533
	Cornière 70x7	301
	Tube carré creux 250x6	170

Tableau 6-1 : Massivité des différents types de profilés utilisés sur la structure.

À noter que plus la massivité d'un profilé est élevée, plus le décalage entre la température des gaz et des profilés est faible.

À titre d'exemple, la figure suivante présente l'échauffement des différents poteaux pour une même courbe de température :

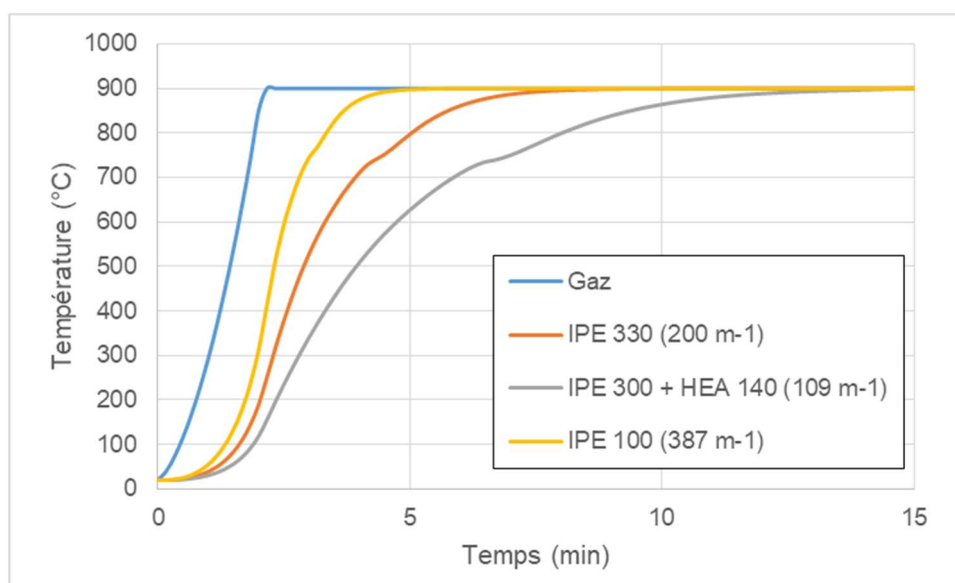


Figure 6-5 : Échauffement des poteaux pour une même courbe de température

6.4.2. Prise en compte des murs coupe-feu

La structure étant continue sur les halls 1, 2 et 3, un seul modèle dans le sens longitudinal est réalisé et est étudié avec des scénarios dans chacune des cellules.

Les trois halls étant séparés par un mur coupe-feu 2h (REI 120), lorsqu'un feu se déclare dans l'une des cellules, on peut considérer que la structure de l'autre cellule est protégée pendant 2h.

7. ETUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE

7.1. ÉTUDE DU MODELE LONGITUDINAL – HALLS 1, 2 ET 3

7.1.1. Départ de feu dans le hall 1

La figure suivante présente la position du départ de feu dans le hall 1, ainsi que les nœuds du modèle utilisés pour l'analyse des déplacements :

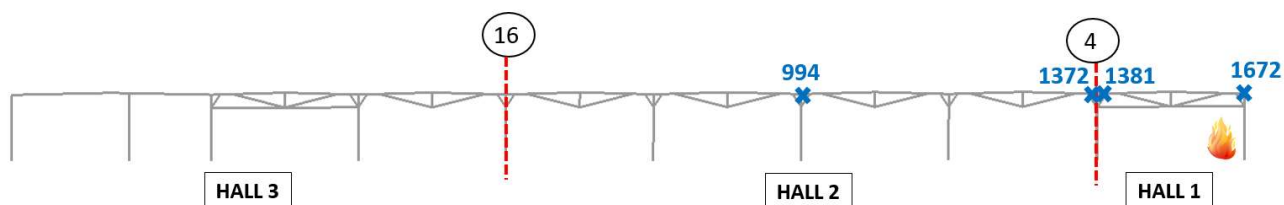


Figure 7-1 : Position de départ de feu dans le hall 1

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

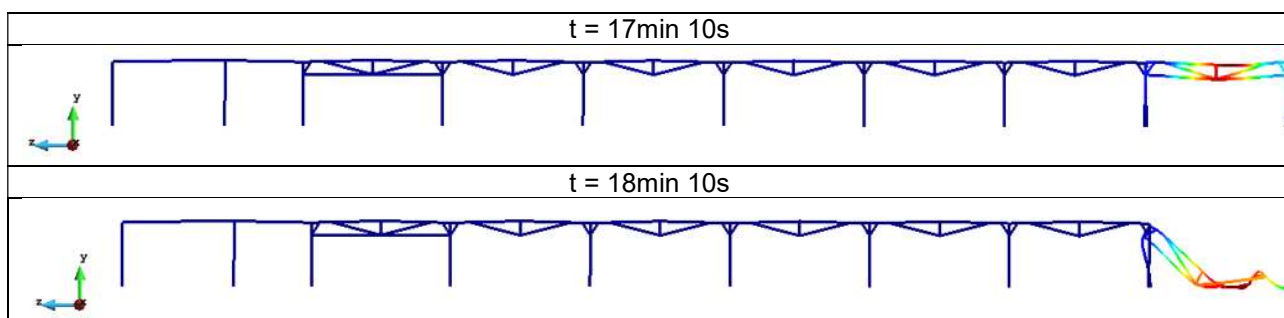


Figure 7-2 : Allure de la déformée pour un départ de feu dans le hall 1

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

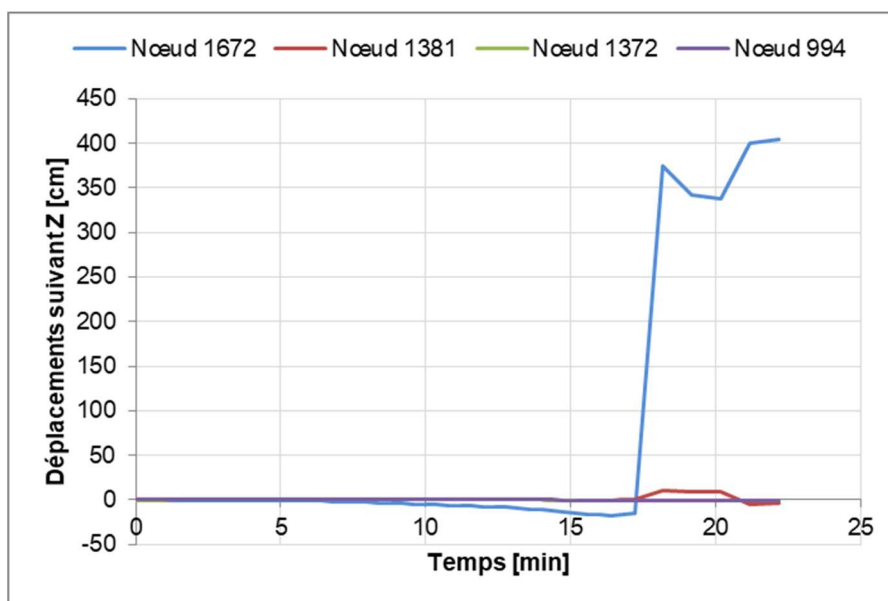


Figure 7-3 : Évolution des déplacements horizontaux

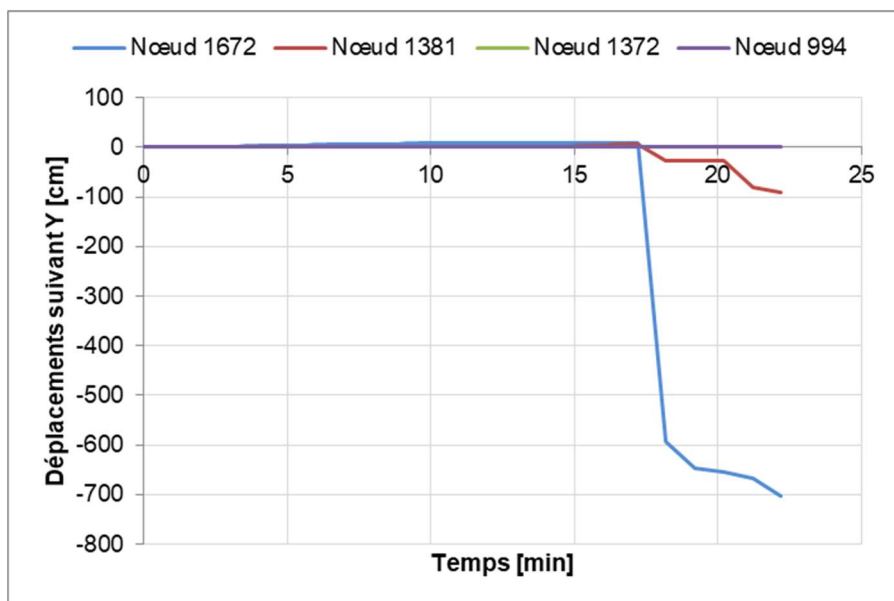


Figure 7-4 : Évolution des déplacements verticaux

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 1 ruine à partir de 17min10s.
- L'évolution des déplacements horizontaux au niveau du nœud 1672 se fait dans le sens de l'axe Z positif, soit vers l'intérieur du bâtiment. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens longitudinal est écarté pour ce scénario.

7.1.2. Départ de feu dans le hall 2

La figure suivante présente la position du départ de feu dans le hall 2, ainsi que les nœuds du modèle utilisés pour l'analyse des déplacements :

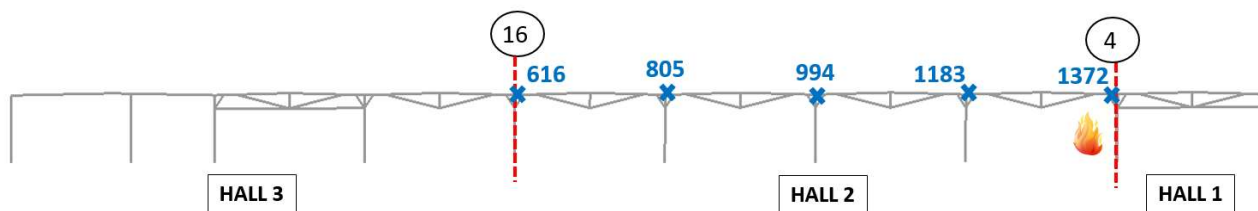


Figure 7-5 : Position de départ de feu dans le hall 2

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

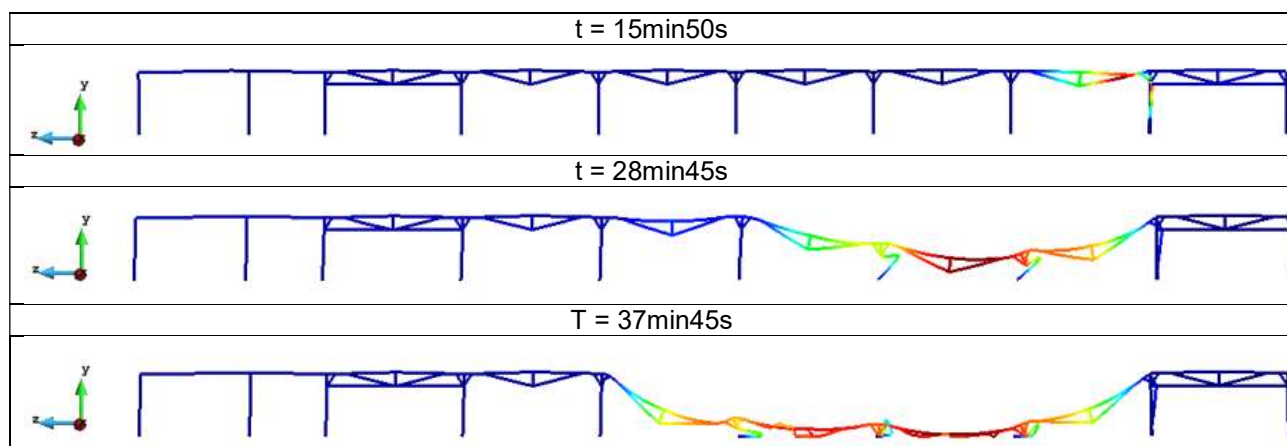


Figure 7-6 : Allure de la déformée pour un départ de feu dans le hall 2

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

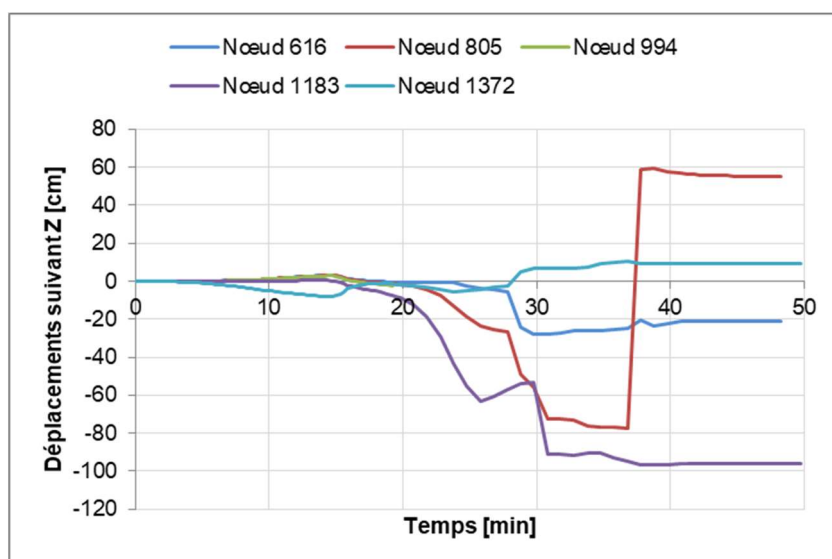


Figure 7-7 : Évolution des déplacements horizontaux

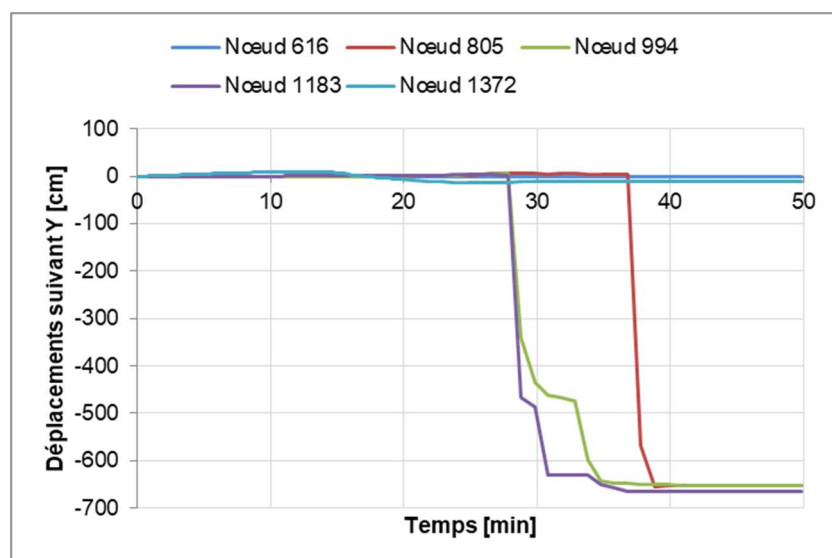


Figure 7-8 : Évolution des déplacements verticaux

Les résultats montrent que :

- La ruine de la structure du hall 2 débute à partir de 15min50s.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 2 n'entraîne pas la ruine de la structure du hall 1. Ainsi, un départ de feu dans le hall ne risque pas d'engendrer une ruine en chaîne entre ces cellules, qui pourrait mener à une ruine vers l'extérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens longitudinal est écarté pour ce scénario.

7.1.3. Départ de feu dans le hall 3

La figure suivante présente la position du départ de feu dans le hall 3, ainsi que les nœuds du modèle utilisés pour l'analyse des déplacements :

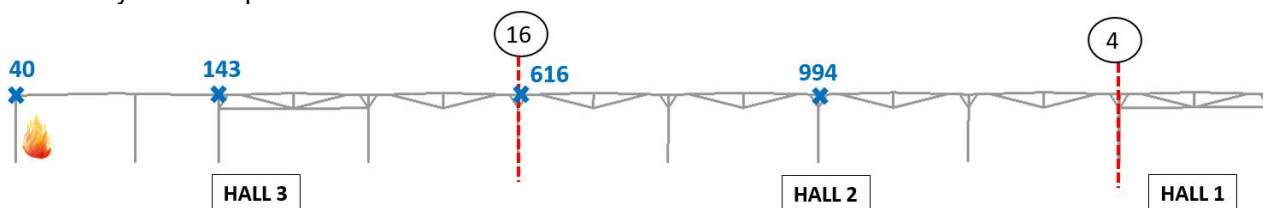


Figure 7-9 : Position de départ de feu dans le hall 3

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

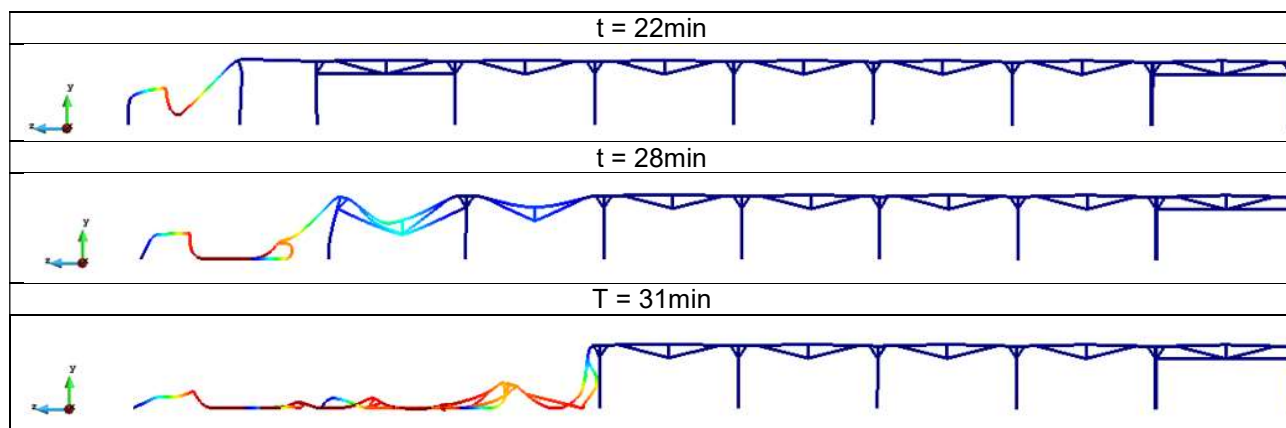


Figure 7-10 : Allure de la déformée pour un départ de feu dans le hall 3

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

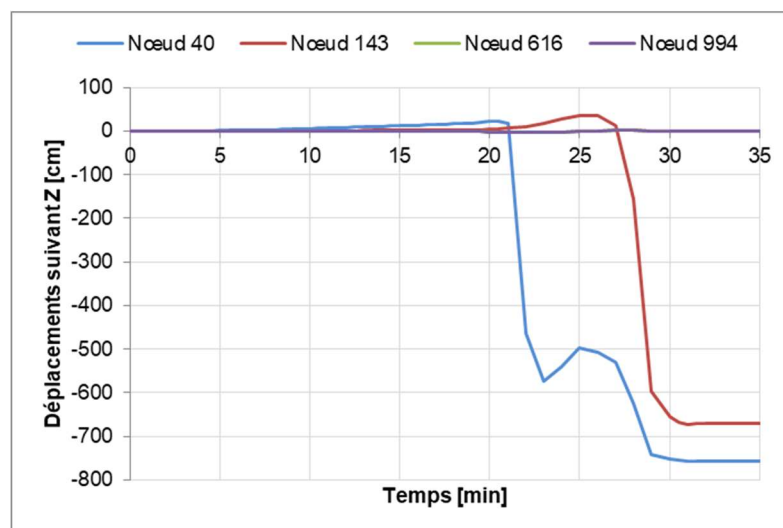


Figure 7-11 : Évolution des déplacements horizontaux

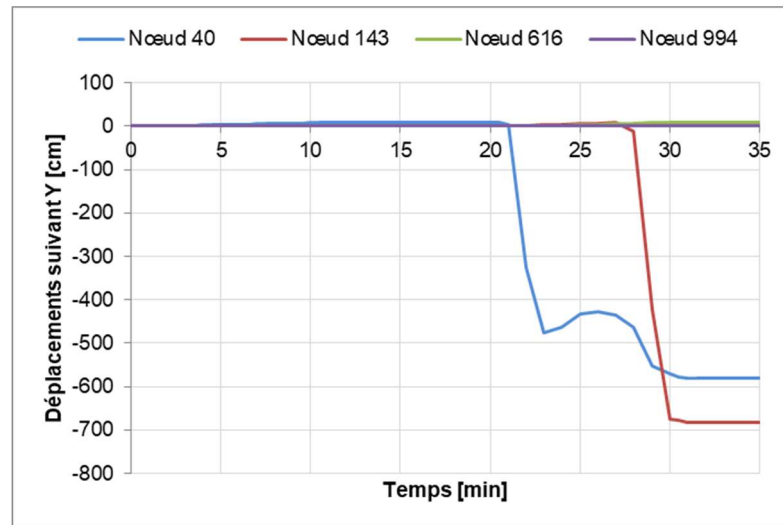


Figure 7-12 : Évolution des déplacements verticaux

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 3 ruine à partir de 22 minutes.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 3 n'entraîne pas la ruine de la structure des halls 1 et 2. Ainsi, un départ de feu dans le hall ne risque pas d'engendrer une ruine en chaîne entre ces cellules, qui pourrait mener à une ruine vers l'extérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens longitudinal est écarté pour ce scénario.

7.2. ÉTUDE DES MODELES TRANSVERSAUX – HALLS 2 ET 3

7.2.1. Hall 2

7.2.1.1. Position des départs de feu étudiés

La figure suivante présente la position des différents départs de feu étudiés dans le hall 3, ainsi que les nœuds du modèle utilisés pour l'analyse des déplacements.

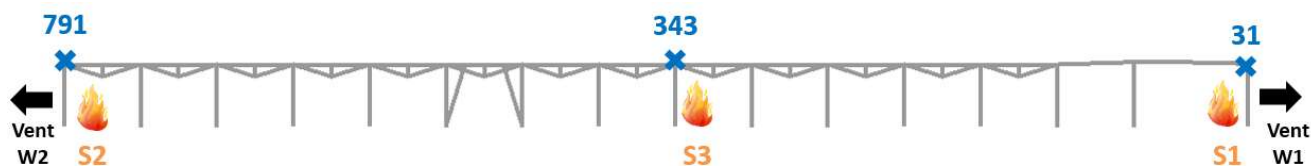


Figure 7-13 : Positions de départ de feu dans le hall 2

7.2.1.2. Scénario 1

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

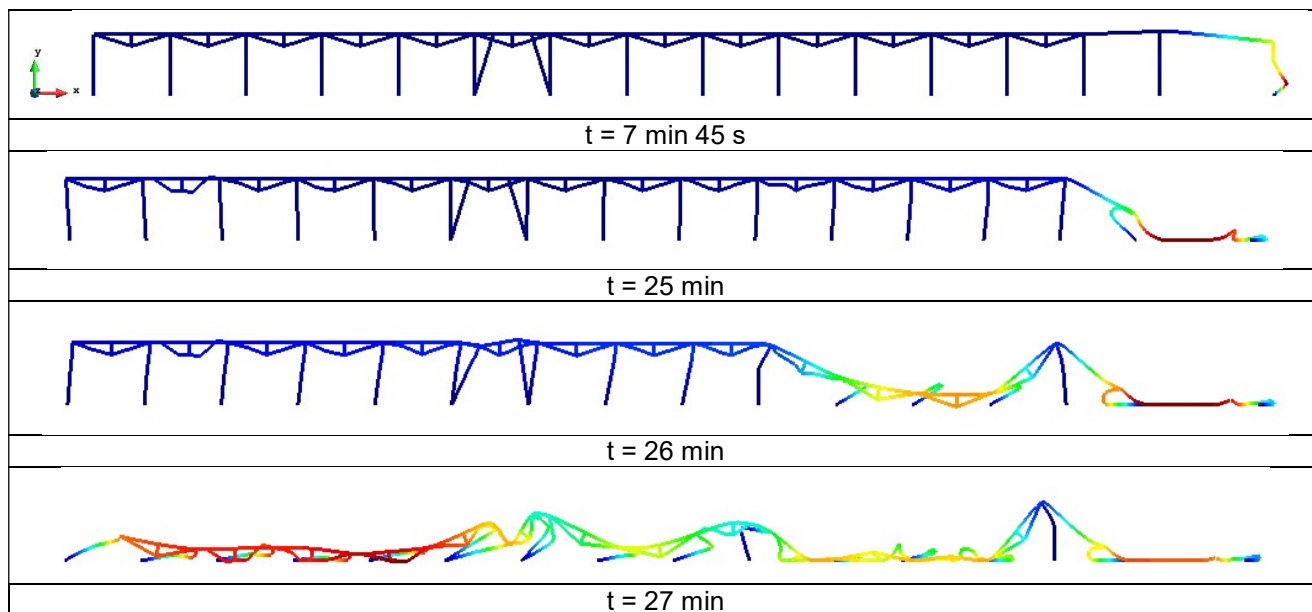
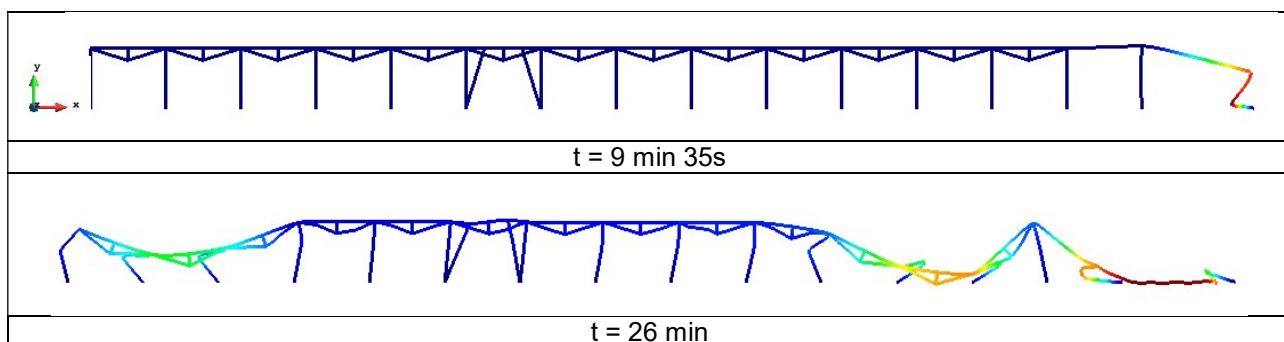


Figure 7-14 : Allure de la déformée pour le scénario 1 – Cas de vent W1



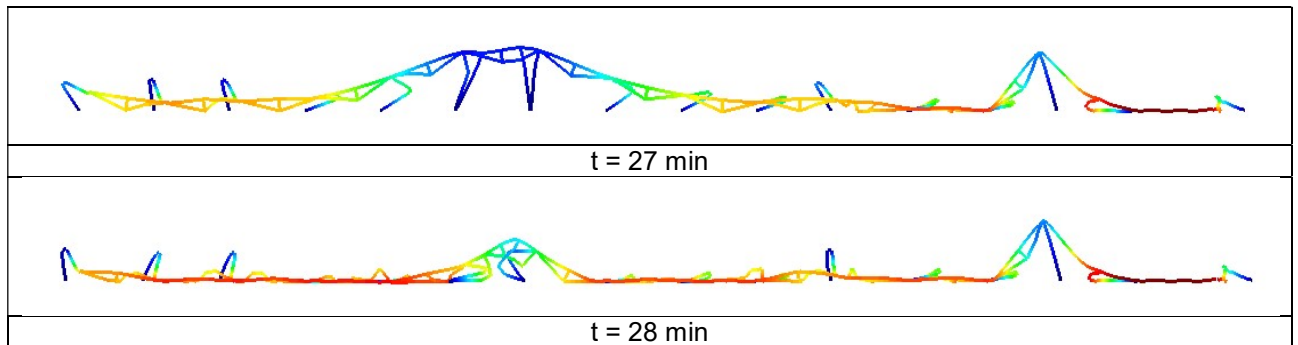


Figure 7-15 : Allure de la déformée pour le scénario 1 – Cas de vent W2

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours de l'incendie, pour les cas de vent W1 et W2 :

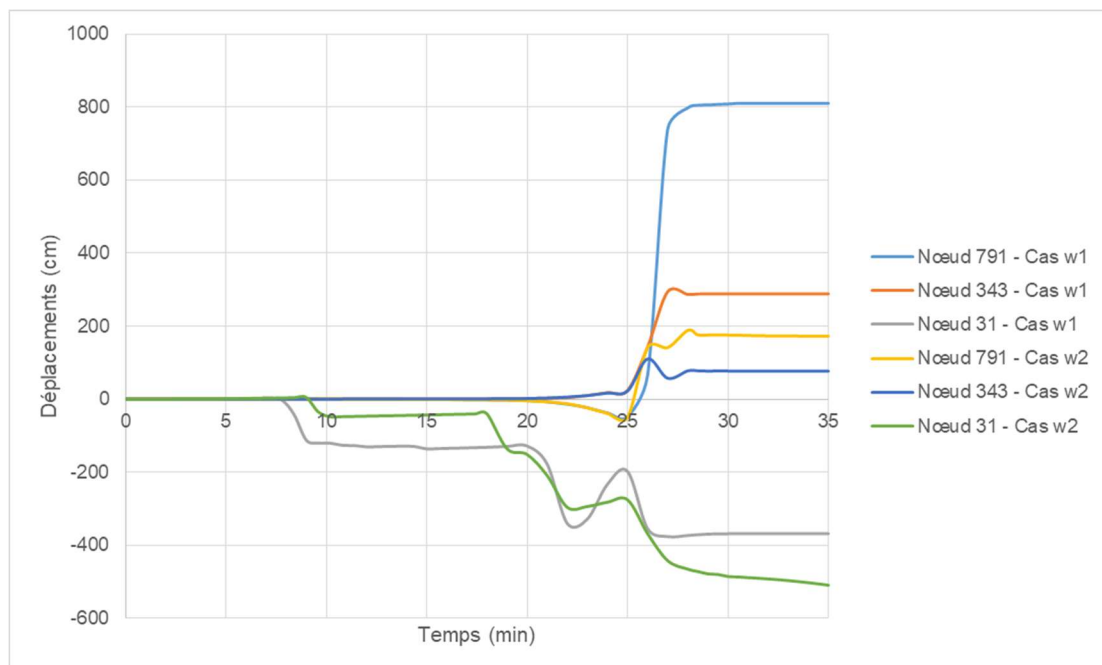


Figure 7-16 : Evolution des déplacements horizontaux (axe X)

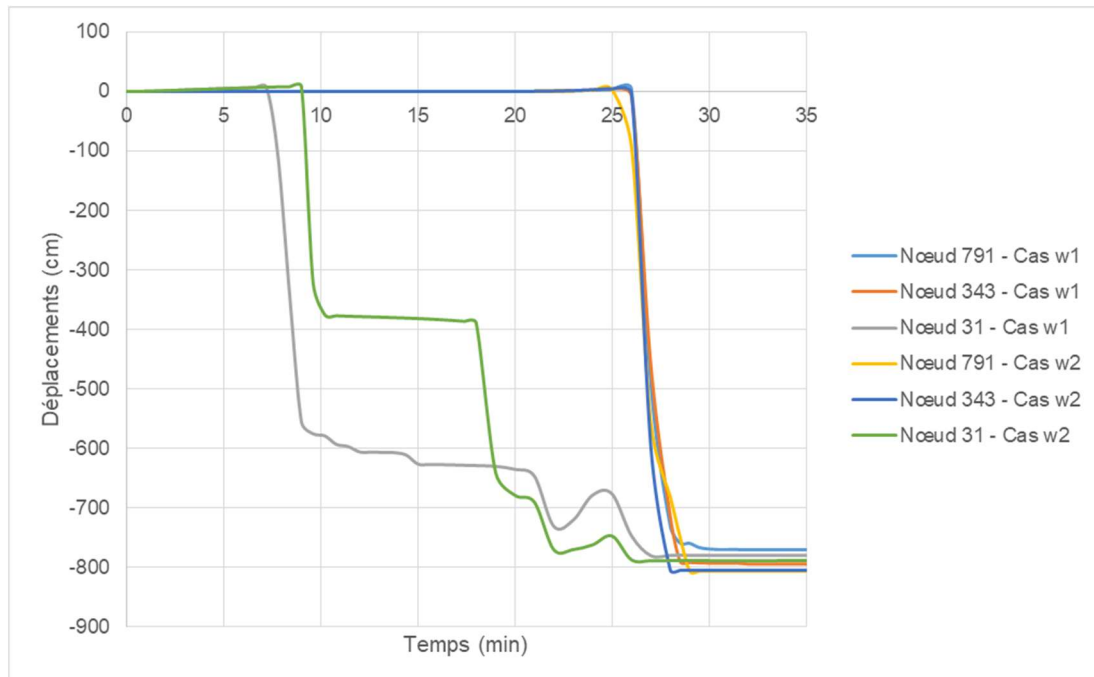


Figure 7-17 : Evolution des déplacements verticaux (axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 2 ruine au plus tôt après 7min45s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 2 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

7.2.1.3. Scénario 2

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

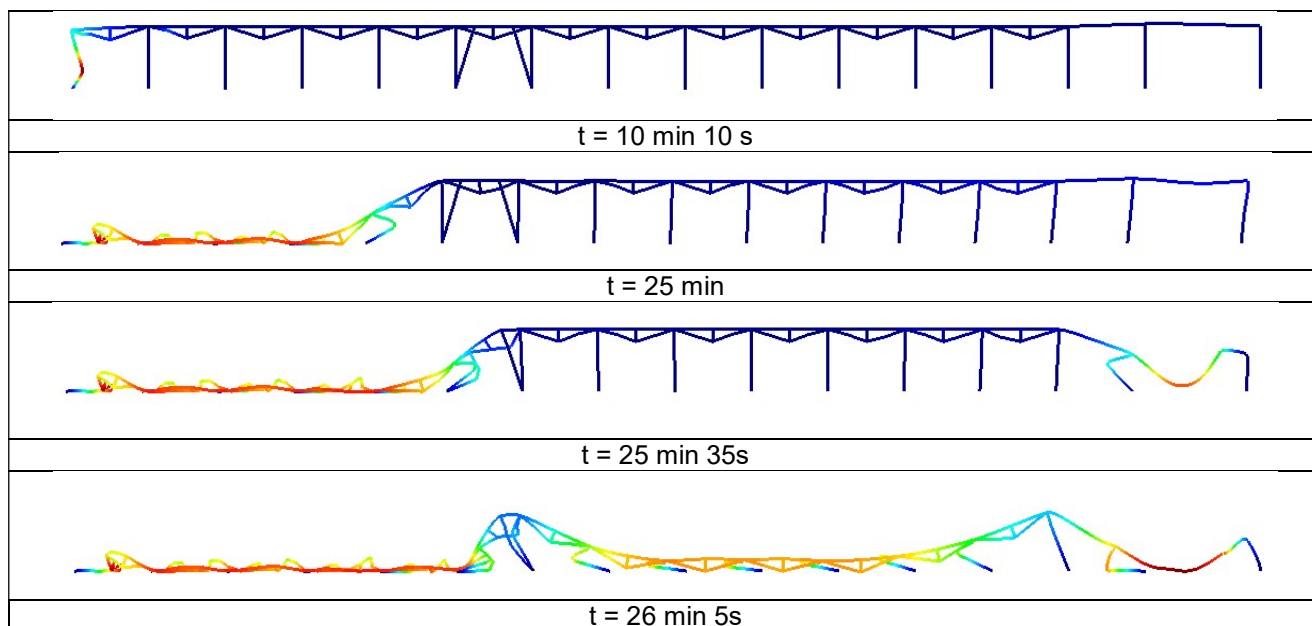


Figure 7-18 : Allure de la déformée pour le scénario 2 – Cas de vent W1

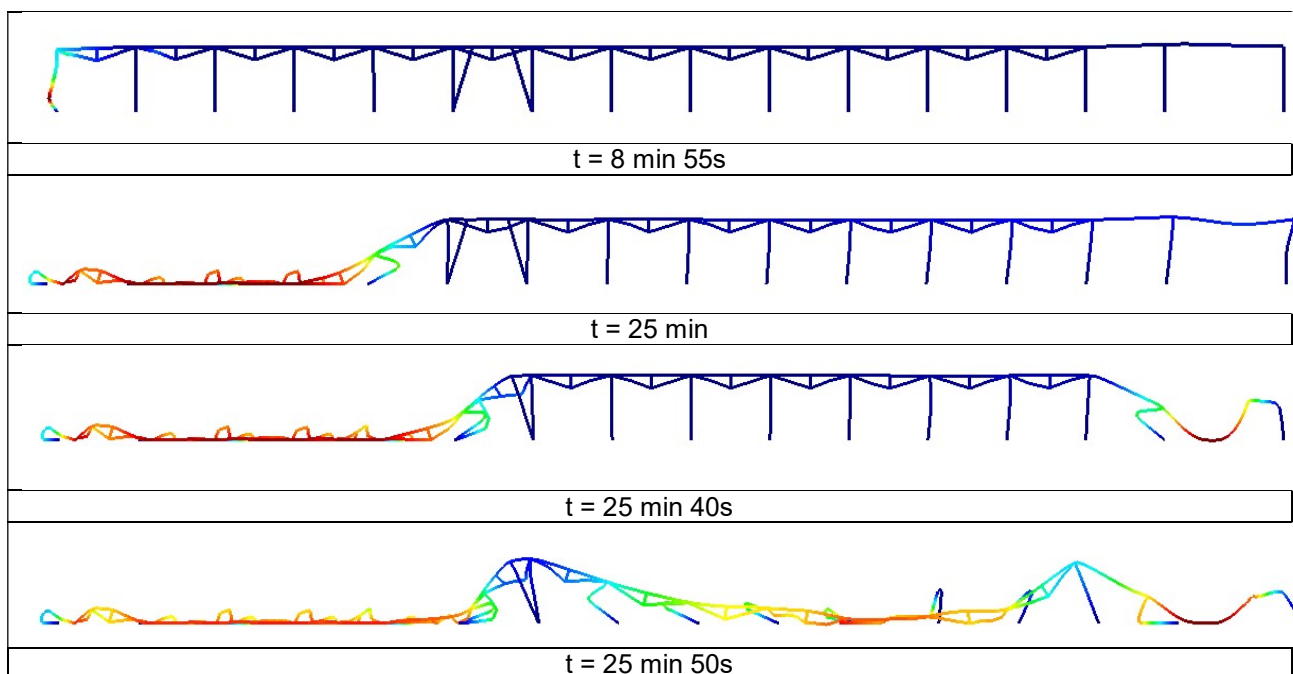


Figure 7-19 : Allure de la déformée pour le scénario 2 – Cas de vent W2

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours de l'incendie, pour les cas de vent W1 et W2 :

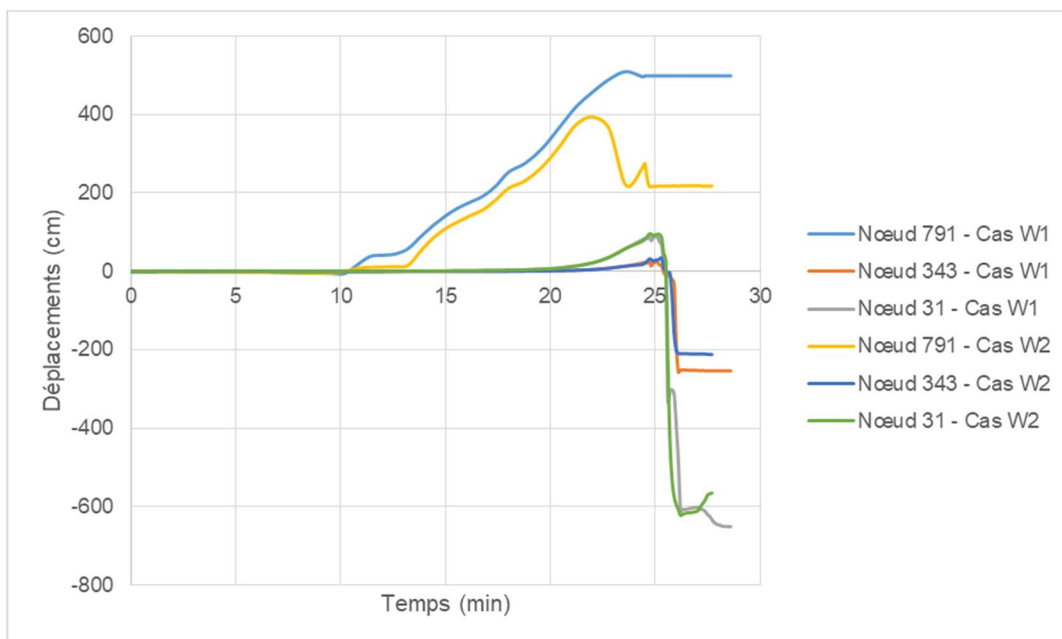


Figure 7-20 : Evolution des déplacements horizontaux (axe X)

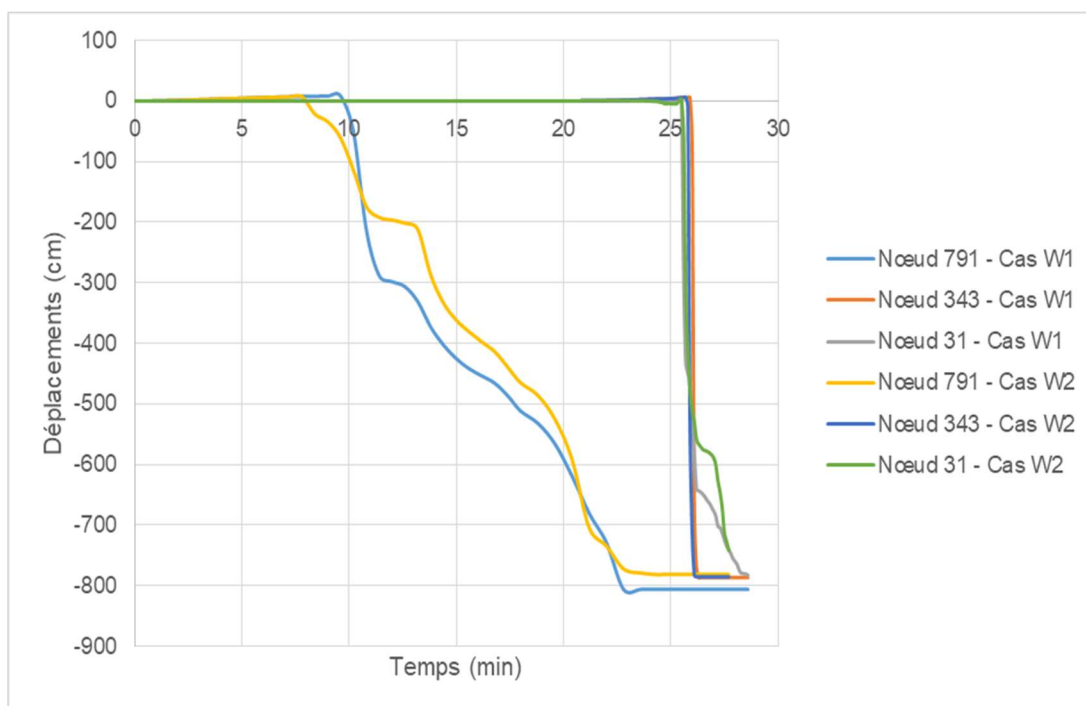


Figure 7-21 : Evolution des déplacements verticaux (axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 2 ruine au plus tôt après 8min55s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 2 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

7.2.1.4. Scénario 3

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :

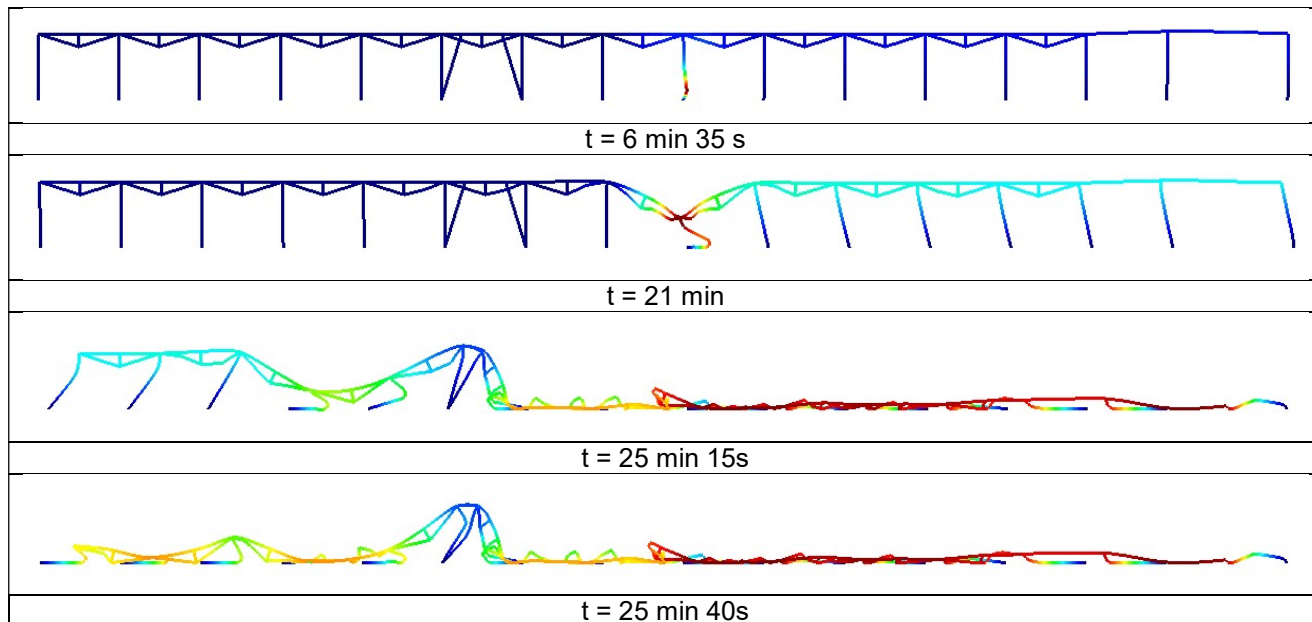


Figure 7-22 : Allure de la déformée pour le scénario 3 – Cas de vent W1

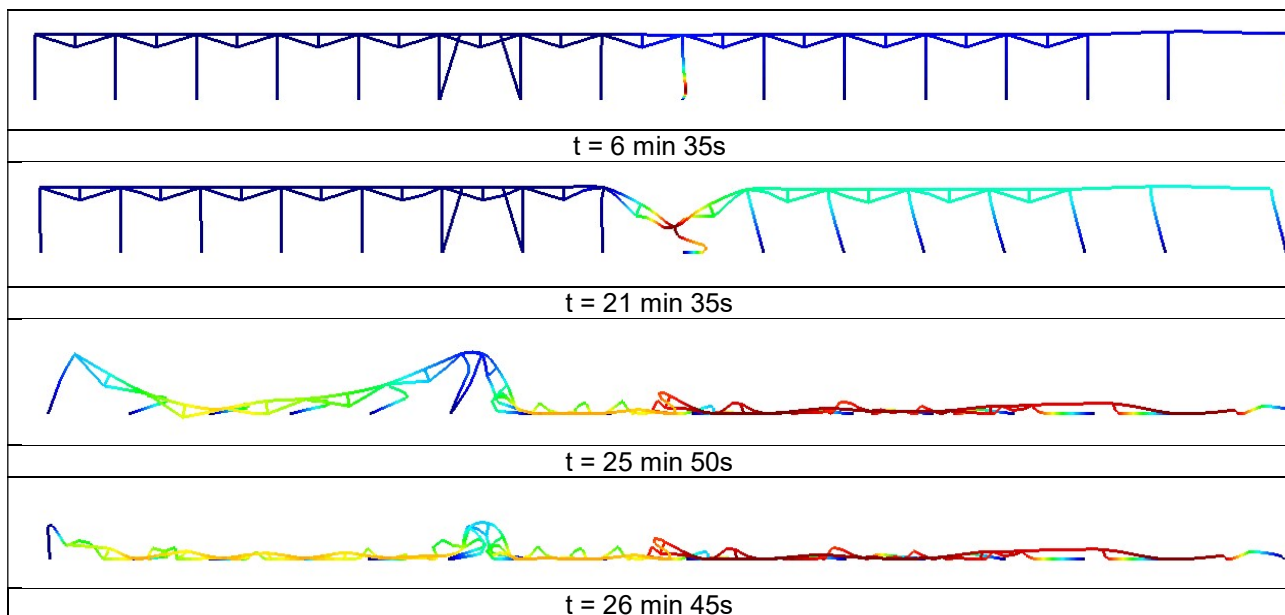


Figure 7-23 : Allure de la déformée pour le scénario 3 – Cas de vent W2

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours de l'incendie, pour les cas de vent W1 et W2 :

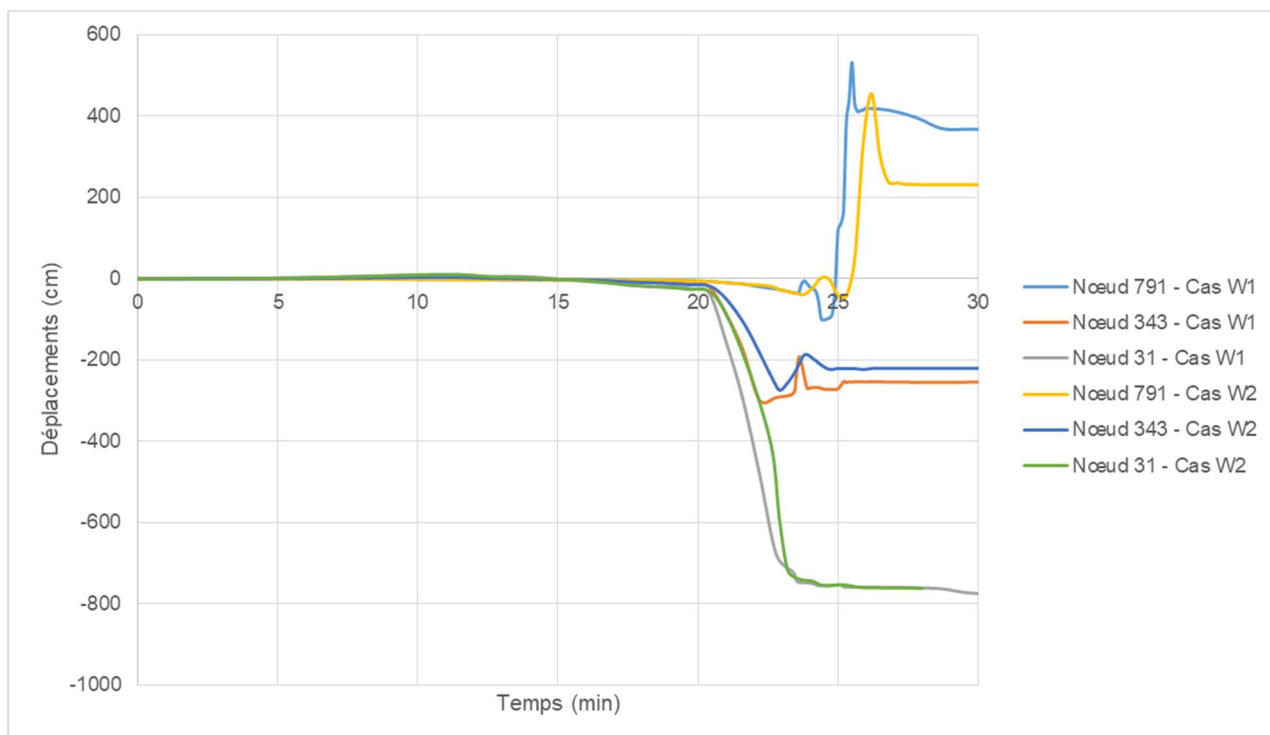


Figure 7-24 : Evolution des déplacements horizontaux (axe X)

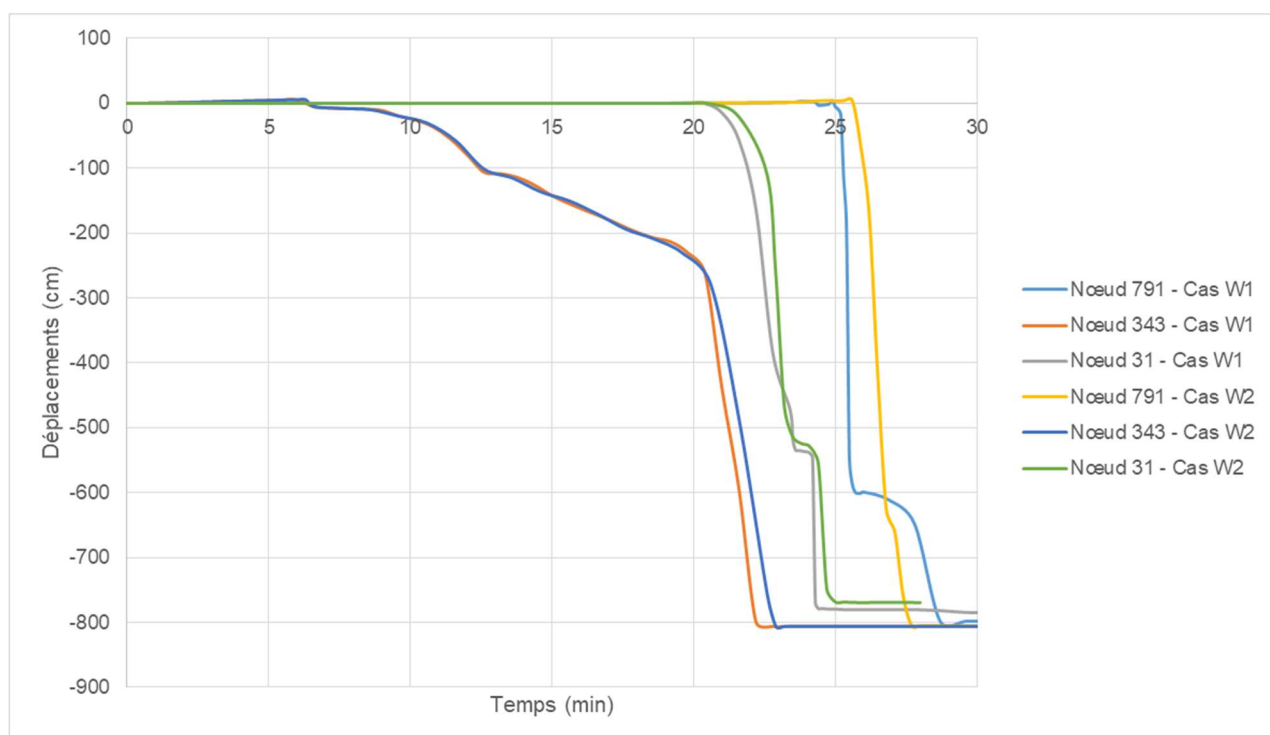


Figure 7-25 : Evolution des déplacements verticaux (axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 2 ruine au plus tôt après 6min35s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 2 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

7.2.2. Hall 3

7.2.2.1. Positions des départs de feu étudiés

La figure suivante présente la position des différents départs de feu étudiés dans le hall 3, ainsi que les nœuds du modèle utilisés pour l'analyse des déplacements.

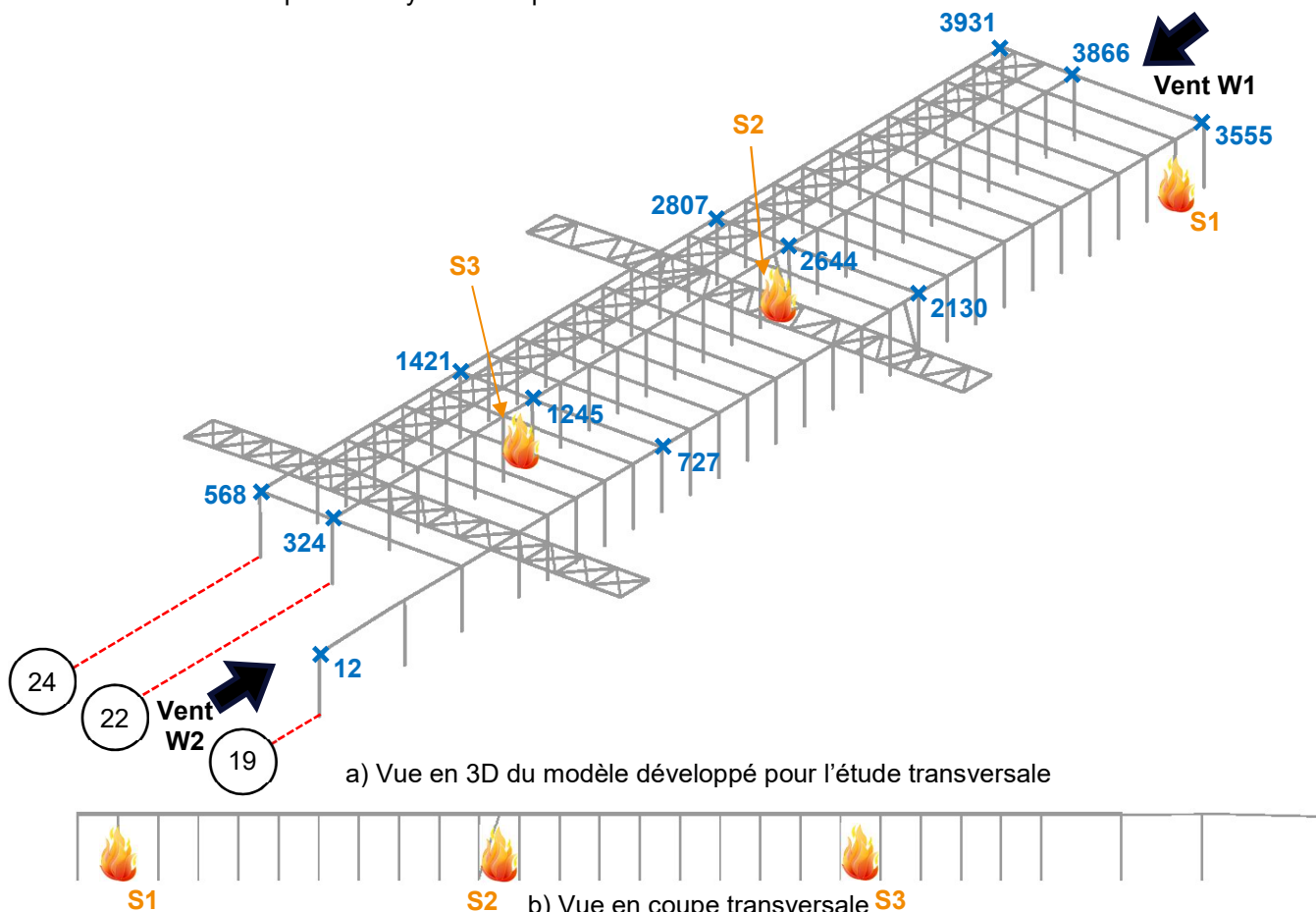
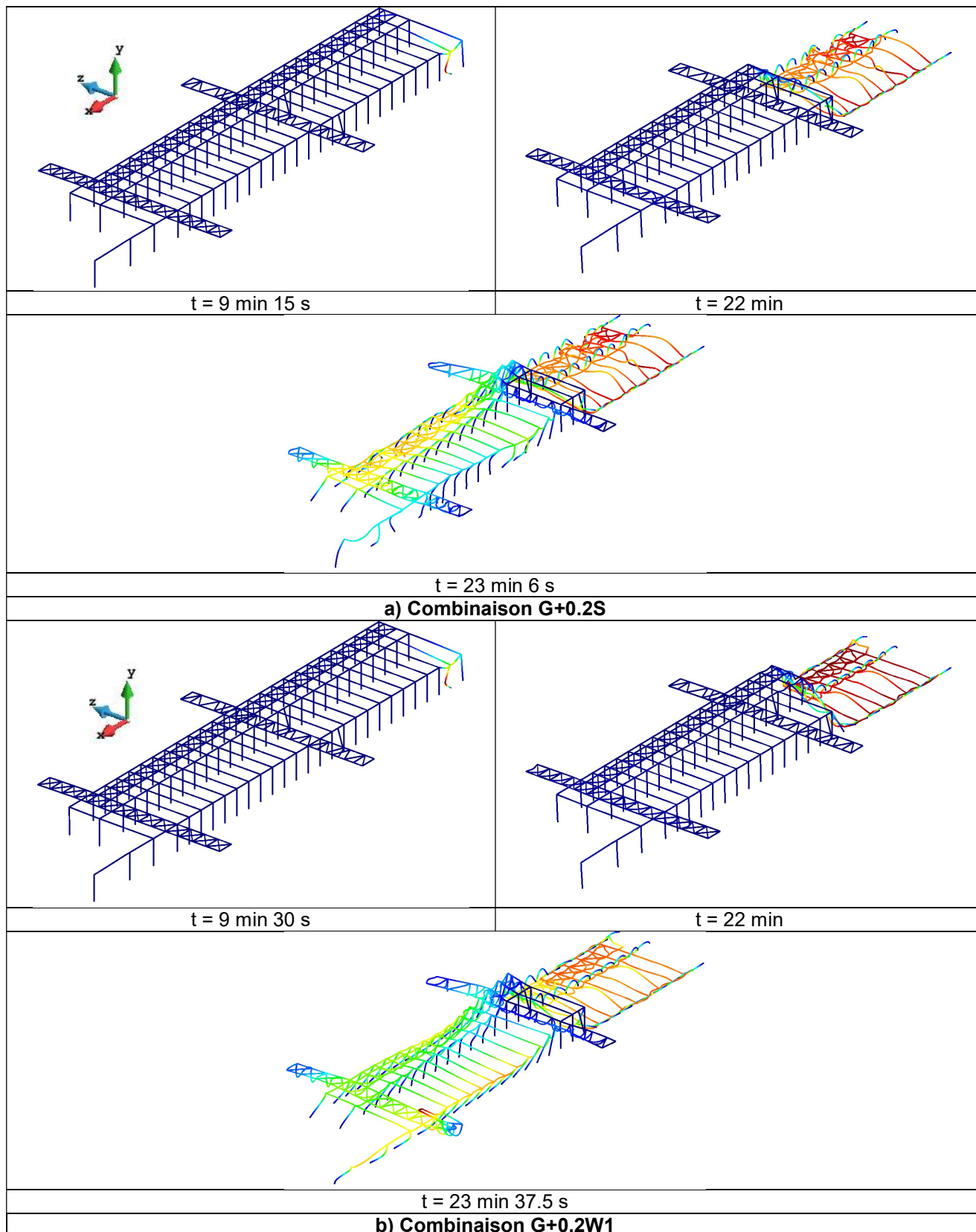


Figure 7-26 : Positions de départ de feu dans le hall 3

7.2.2.2. Scénario 1

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :



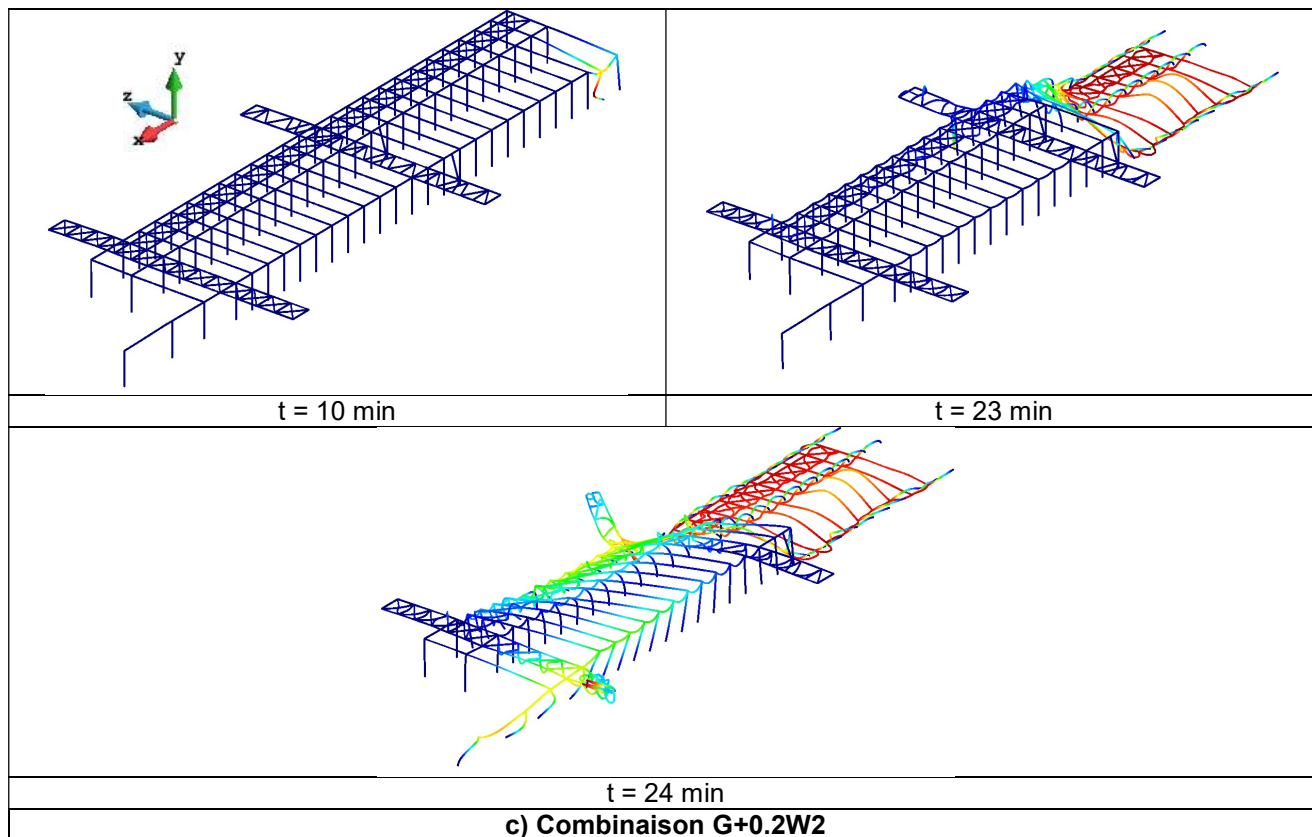


Figure 7-27 : Allure de la déformée pour le scénario 1

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

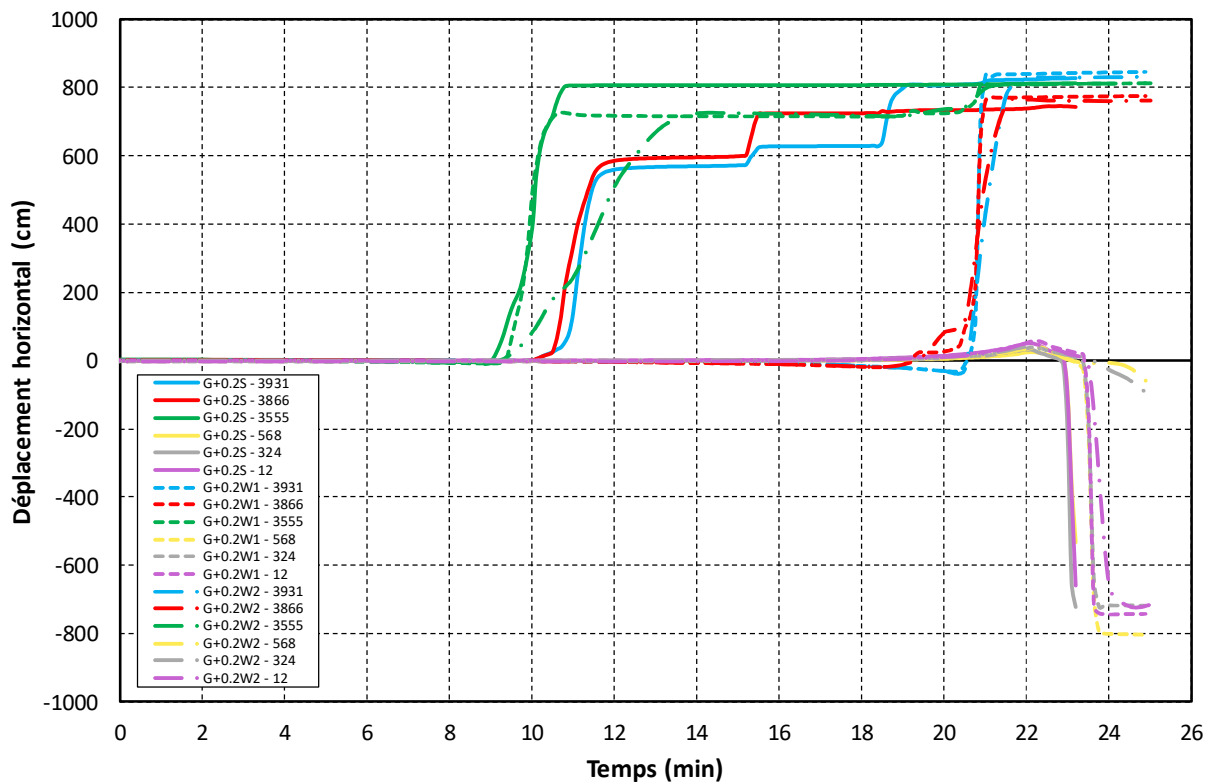


Figure 7-28 : Évolution des déplacements horizontaux des poteaux de rive (selon l'axe X)

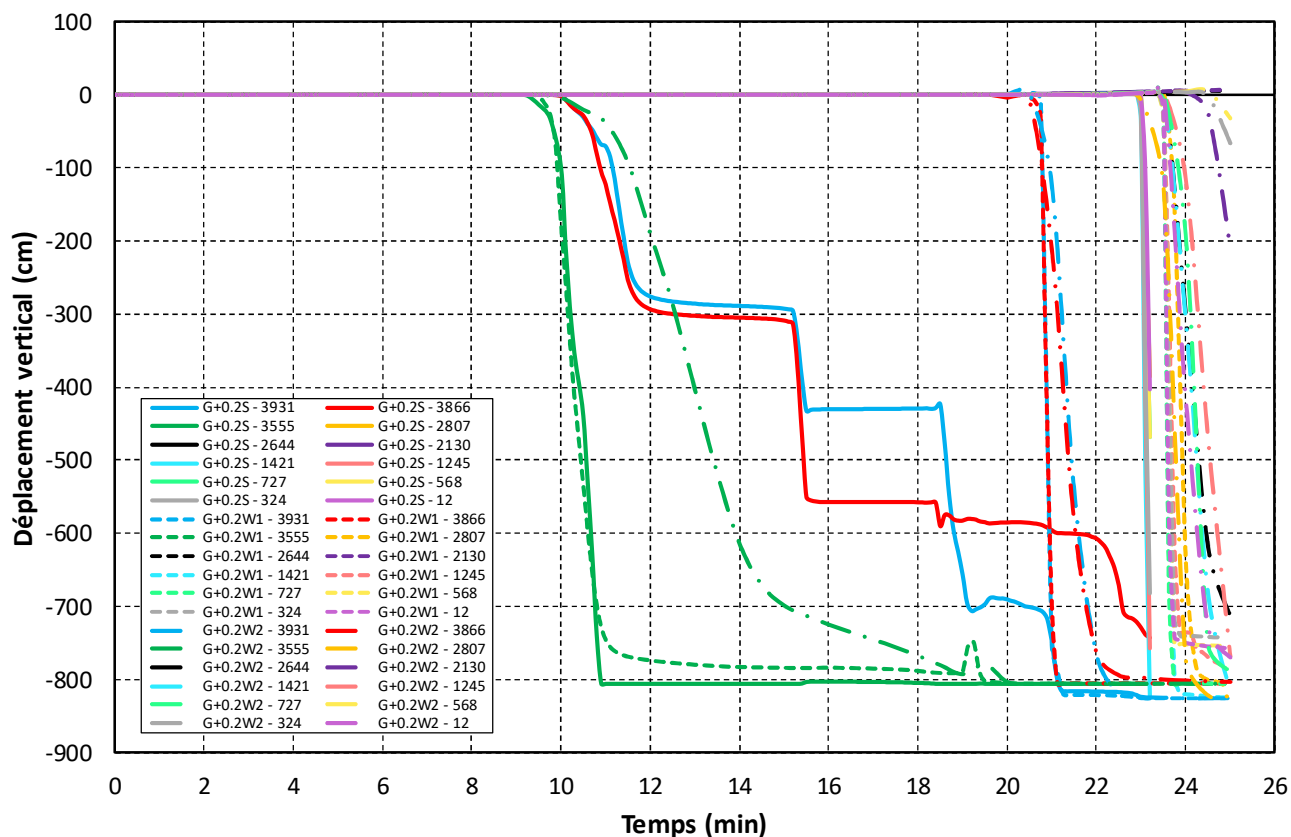


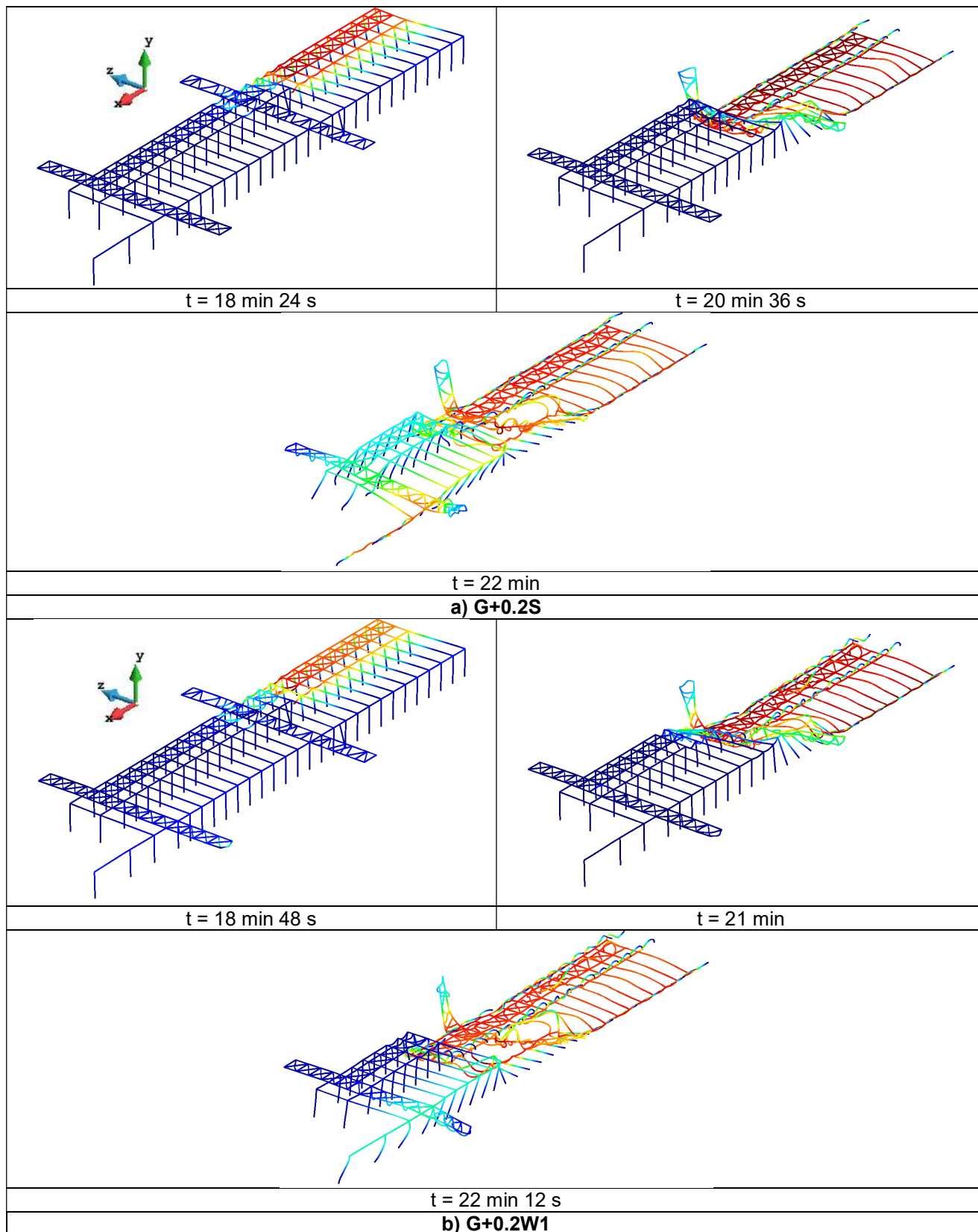
Figure 7-29 : Évolution des déplacements verticaux (selon l'axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 3 ruine au plus tôt après 9min15s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 3 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

7.2.2.3. Scénario 2

La figure suivante présente l'allure de la déformée pour plusieurs durées d'exposition au feu :



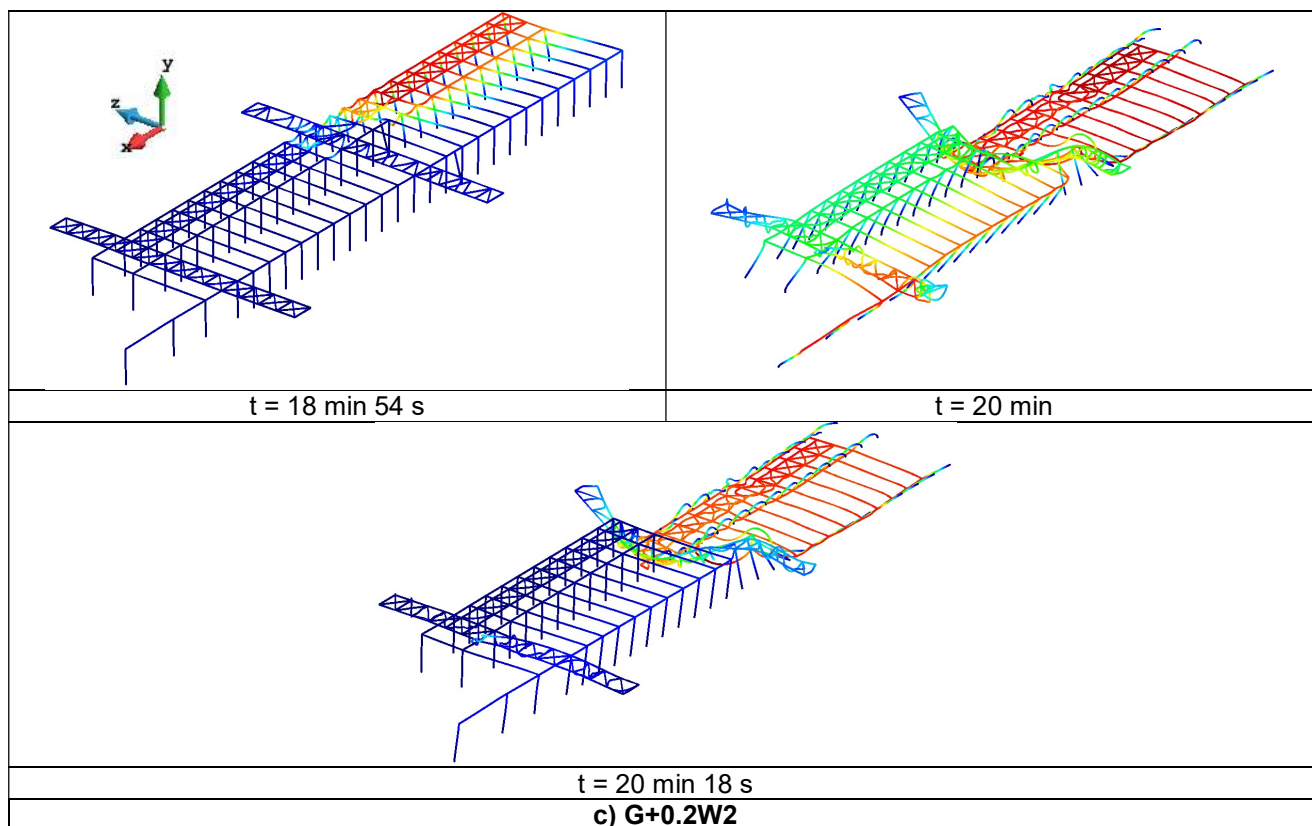


Figure 7-30 : Allure de la déformée pour le scénario 2

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

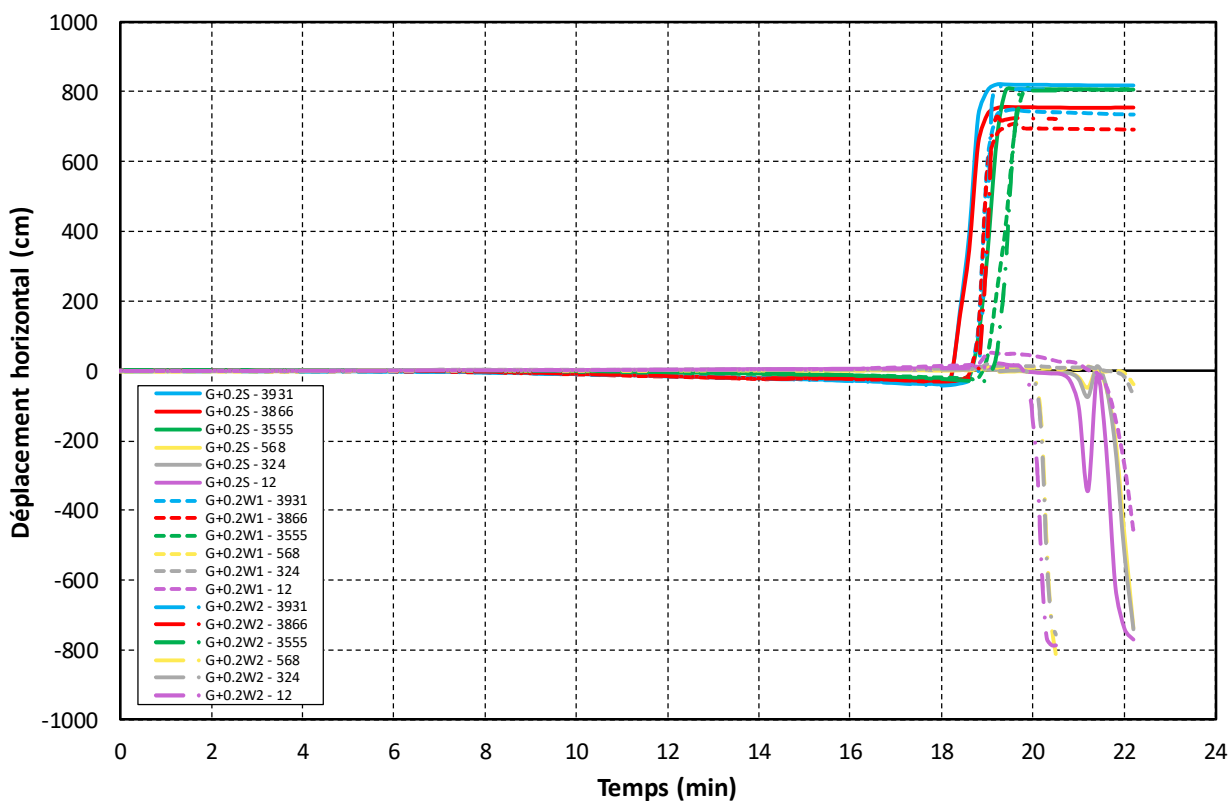


Figure 7-31 : Évolution des déplacements horizontaux des poteaux de rive (selon l'axe X)

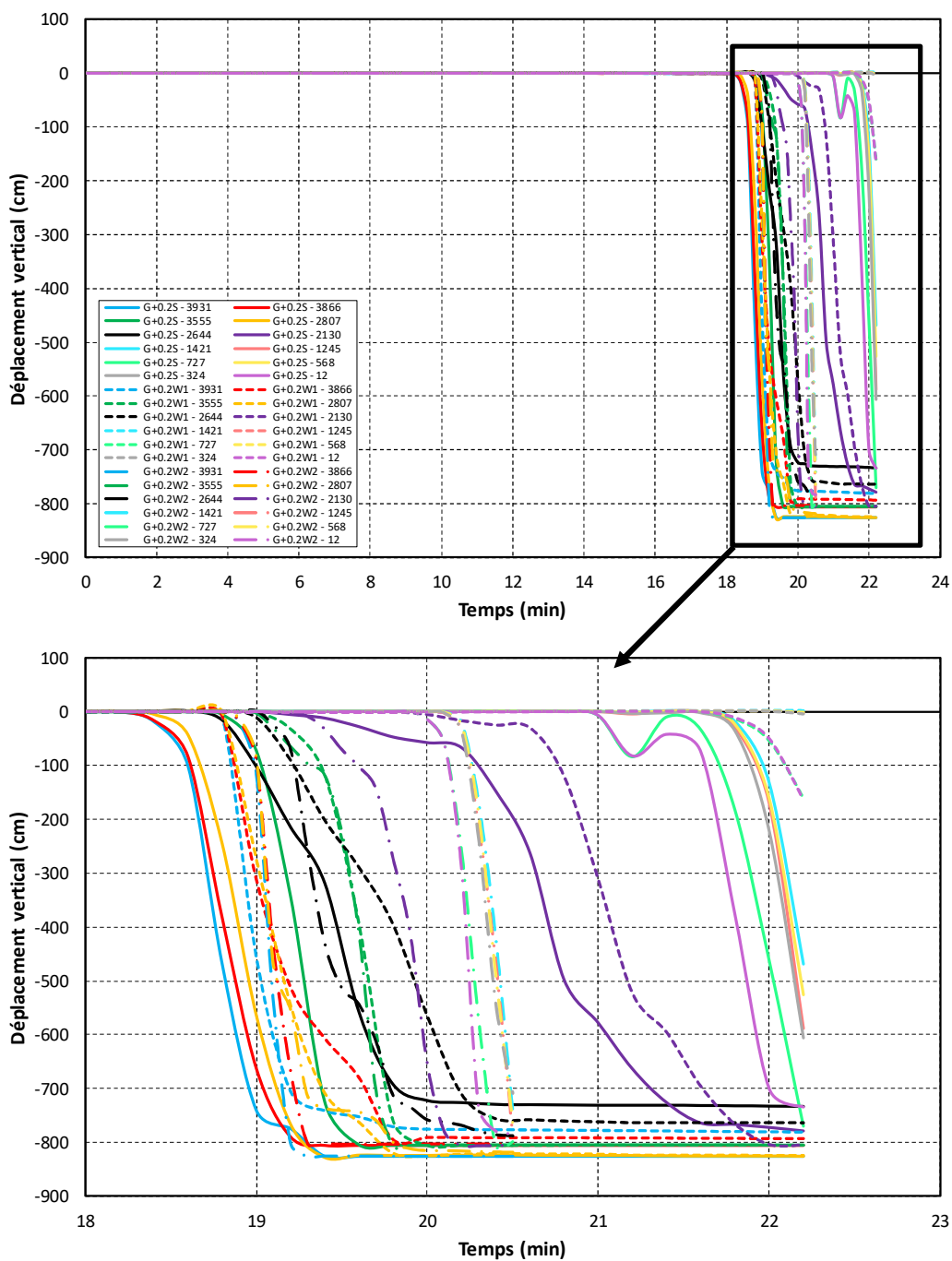


Figure 7-32 : Évolution des déplacements verticaux (selon l'axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 3 ruine au plus tôt après 18min24s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 3 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

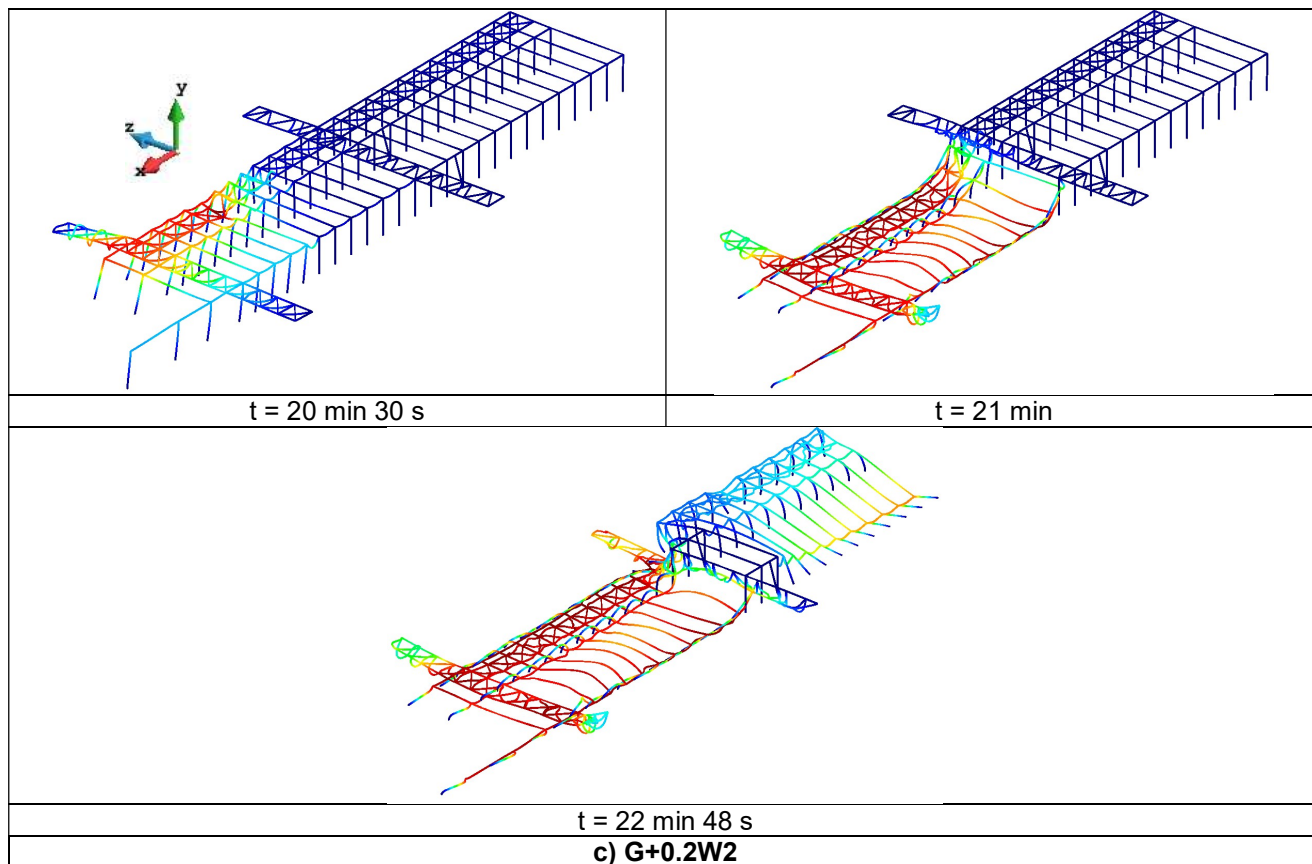


Figure 7-33 : Allure de la déformée pour le scénario 3

Les figures suivantes présentent l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au cours du temps :

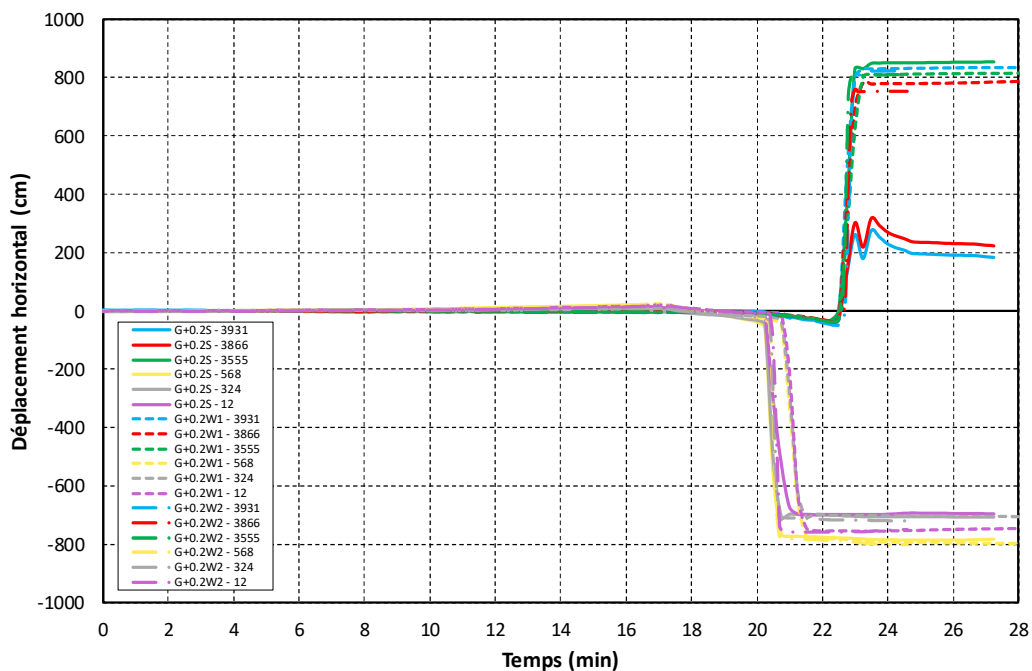


Figure 7-34 : Évolution des déplacements horizontaux des poteaux de rive (selon l'axe X)

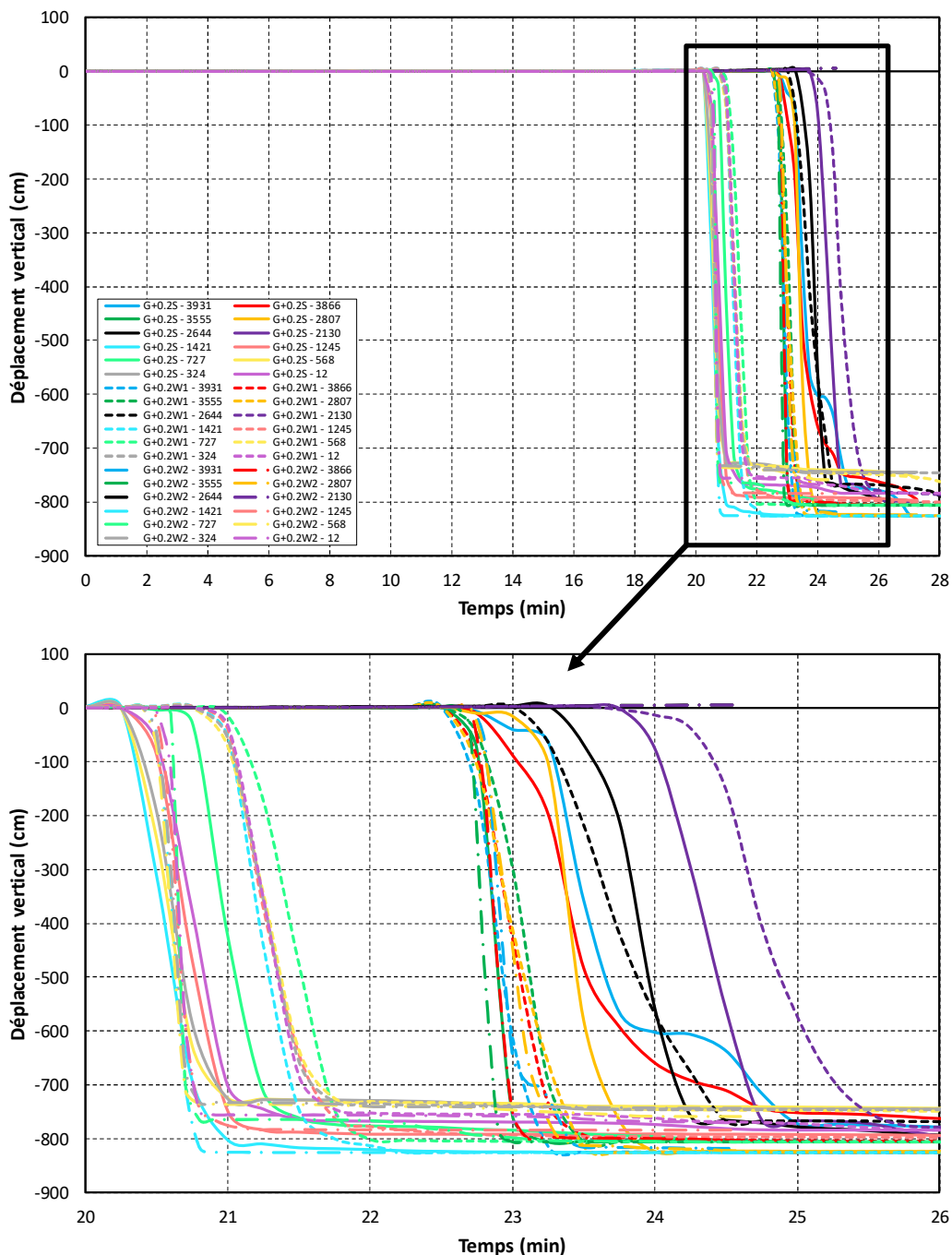


Figure 7-35 : Évolution des déplacements verticaux (selon l'axe Y)

Les résultats montrent que :

- La structure du hall 3 ruine au plus tôt après 20min30s d'incendie.
- L'évolution des déplacements montre que la ruine de la structure du hall 3 s'effectue vers l'intérieur. Le risque de ruine vers l'extérieur dans le sens transversal est donc écarté pour ce scénario.

7.3. SYNTHÈSES DES DIFFÉRENTES ÉTUDES

Le tableau suivant récapitule les différents résultats obtenus dans le but de vérifier la non ruine de la structure de l'entrepôt vers l'extérieur.

Modèle de calcul	Hall	Position du scénario	Non ruine vers l'extérieur
Longitudinal – Hall 1 à 3	n°1, 2 et 3	Hall 1	✓
		Hall 2	✓
		Hall 3	✓
Transversal – File 10	n°2	Côté X+ (S1)	✓
		Côté X- (S2)	✓
		Centre file 10 (S3)	✓
Transversal – Files 19 à 24	n°3	Côté X+ (S1)	✓
		Niveau contreventements (S2)	✓
		Côté X- (S3)	✓

Tableau 7-1 : Tableau de synthèse vis-à-vis de l'exigence de non ruine vers l'extérieur

8. CONCLUSIONS

L'entreprise BERRY TUFT SAS prévoit l'exploitation d'un entrepôt de stockage situé sur la commune du Poinçonnet (36). Dans un premier temps (phase 1), seule une partie du bâtiment existant, initialement à usage industriel, sera exploitée. Pour cela, il est prévu une modification de l'agencement du bâtiment afin de créer 3 cellules de stockage sous les rubriques d'enregistrement 1510, 1530, 2662, 2663, 2925, 2910, 4734 et 4718. L'arrêté du 11 avril 2017 est applicable.

La présente étude d'ingénierie incendie réalisée par Efectis a pour objectif unique de vérifier l'exigence de non ruine de la structure porteuse de l'entrepôt vers l'extérieur.

Les différents calculs et analyses effectués pour la structure métallique de l'entrepôt ont permis de montrer que quel que soit le modèle étudié, et quelle que soit la position du départ de feu considérée, la ruine de la structure des halls 1, 2 et 3 s'effectue vers l'intérieur.

Les analyses présentées dans ce document ont été réalisées dans le strict respect des documents en possession d'Efectis et des informations qui lui ont été communiquées et cités au paragraphe 2. Conformément aux guides de construction métallique cités au paragraphe 2, l'étude prend en compte une protection au feu des poutres sur deux mètres à proximité des poteaux protégés.