

Référence : 21-000775b-JVA
Affaire : 19-003513-SA

ÉTUDE COMPLÉMENTAIRE DE LA CHRONOLOGIE DES RUINES DES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE BOIS SOUS FEU REEL D'UN ENTREPOT COURANT

HYPOTHÈSES DE CALCULS ET DE MODÉLISATION.
RÉSULTATS DES CALCULS THERMOMÉCANIQUES ITÉRATIFS.

| | |
|--------------------------------------|---|
| Client demandeur | CODIFAB |
| Référence et date de commande | Commande n°3200549457 du 20/03/2020 suite à offre 19-001858-XDU du 17/09/2020 |
| Projet | Entrepôt bois-béton |

Date : 11/10/2021
Indice de révision : B
Nombre de pages : 57

Auteur(s) :
Julien VIALE (EFFECTIS)

SUIVI DES MODIFICATIONS

| Indice de révision | Date | Modifications |
|--------------------|------------|--|
| A | 29/06/2021 | Version initiale. |
| B | 11/10/2021 | Prise en compte des commentaires du SNBL du 02/08/2021 |
| | | |
| | | |
| | | |

Ce document annule et remplace toutes les versions précédentes

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction..... | 5 |
| 2. Documents de référence | 6 |
| 2.1. Documents fournis par le client | 6 |
| 2.2. Documents réglementaires et normatifs..... | 6 |
| 2.3. Documents techniques autres..... | 6 |
| 3. Description du cas d'étude | 8 |
| 4. Hypothèses générales..... | 9 |
| 4.1. Rappel des hypothèses de base concernant les calculs de développement du feu | 9 |
| 4.1.1. Stockage | 9 |
| 4.1.2. Désenfumage | 9 |
| 4.1.3. Cantonnement | 10 |
| 4.1.4. Détection, système d'extinction automatique à eau et alarme d'évacuation..... | 11 |
| 4.1.5. Issues de secours et amenées d'air | 11 |
| 4.2. Hypothèses de base sur la structure..... | 12 |
| 4.2.1. Poteaux en béton armé | 12 |
| 4.2.2. Charpente bois | 13 |
| 4.2.2.1. Propriétés mécaniques | 13 |
| 4.2.2.2. Poutres en bois à inertie variable | 14 |
| 4.2.2.3. Traverses en bois à inertie variable sur zone de quai | 15 |
| 4.2.2.4. Pannes en bois | 15 |
| 4.2.2.5. Autres éléments en bois | 15 |
| 4.2.2.6. Assemblages entre éléments | 16 |
| 5. Rappel des résultats des calculs de développement de feu | 18 |
| 5.1. Position des scénarios étudiés | 18 |
| 5.2. Synthèse des sollicitations thermiques | 19 |
| 5.2.1. Scénario 1 | 19 |
| 5.2.2. Scénario 2 | 20 |
| 5.3. Actions thermiques retenues | 21 |
| 6. Étude du comportement thermomécanique de la charpente bois-béton..... | 22 |
| 6.1. Hypothèses de calculs..... | 22 |
| 6.1.1. Échauffement des éléments | 22 |
| 6.1.2. Propriétés mécaniques des matériaux | 22 |
| 6.1.3. Chargement mécanique | 24 |
| 6.1.4. Combinaisons de charges étudiées | 25 |
| 6.1.5. Imperfections géométriques et défaut global d'aplomb..... | 25 |
| 6.1.6. Prise en compte des instabilités latérales des pannes..... | 25 |
| 6.2. Hypothèses de modélisation | 26 |
| 6.2.1. Conditions aux limites..... | 26 |
| 6.2.2. Cas de charge | 29 |
| 6.2.3. Cas d'étude – positions du foyer | 31 |
| 6.2.4. Procédure de calcul itératif pour la mise à jour des propriétés de torsion des éléments bois | 33 |
| 6.2.5. Commentaire sur la non modélisation des potelets béton en façade | 35 |
| 6.2.6. Illustration du déroulement de la méthode | 35 |
| 6.3. Résultats des calculs thermomécaniques et chronologie de ruine | 38 |
| 6.3.1. Cas 1 : feu au centre au droit de la poutre au vent | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 6.3.1.1. G+0.2S..... | 38 |
| 6.3.1.2. G+0.2WT..... | 42 |
| 6.3.1.3. G+0.2WL..... | 45 |
| 6.3.2.Cas 2 : feu au droit d'une traverse de quai..... | 48 |
| 6.3.2.1. G+0.2S..... | 48 |
| 6.3.2.2. G+0.2WT..... | 50 |
| 6.3.2.3. G+0.2WL..... | 52 |
| 6.4.Conclusions sur l'analyse de la chronologie de ruine des éléments bois..... | 54 |
| 7. Conclusion..... | 55 |
| ANNEXE A Etude paramétrique d'une panne..... | 56 |

1. INTRODUCTION

Suite aux travaux réalisés pour le compte du CODIFAB par le CSTB et Efectis France concernant la réalisation d'un guide de vérification des entrepôts en bois lamellé collé [21], les différentes discussions avec les acteurs du projet et les membres de la commission technique de la SNBL ont permis d'identifier une problématique récurrente à la conception des entrepôts bois courants (cellules de 6000 m² et hauteur au faitage inférieure à 13,7m).

En effet, la réglementation [10] impose aux éléments principaux d'un entrepôt soumis à la rubrique 1510 une tenue au feu de 15 minutes (R15) pour des bâtiments de hauteur inférieure à 13,7 m et de 60 minutes (R60) au-delà. Pour les bâtiments de moins de 13,7 m de hauteur, les constructeurs d'entrepôt à structure bois sont régulièrement confrontés à une demande de stabilité R60 par les donneurs d'ordre. Cette demande porte en général uniquement sur les arbalétriers (considérés comme éléments de structure « principale ») et non les pannes. Cette demande, en aggravation de la réglementation en vigueur, entraîne une incohérence sur la manière de traiter la problématique. Il est en effet nécessaire de ne pas tenir compte du maintien des pannes au-delà de leur durée de tenue au feu tout en conservant les charges qu'elles transmettent. Cela conduit en général à dimensionner R60 les pannes bloquant le déversement des arbalétriers (ce qui revient au final à appliquer l'exigence R60 pour les structures inférieures à 13,7m).

Une première étude a été réalisée par le CSTB et Efectis consistant en l'étude générique d'un entrepôt bois courant. Cette étude, réalisée dans le but de démontrer les objectifs de sécurité de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié [10] (modes de ruine principalement) a pris en compte des hypothèses majorantes usuellement retenues pour ce type d'étude. Au regard du cas d'étude investigué, il apparaît intéressant pour la commission technique de la SNBL de continuer ce travail en s'attachant à reproduire pour 2 situations de calcul jugées enveloppes la chronologie des événements de manière plus fine, sous feu réel, à l'aide du modèle thermomécanique 3D global déjà développé.

Ainsi, le présent document vise à présenter les différentes hypothèses de calculs et de modélisation pour tenir compte de la chronologie de ruine des éléments en cas d'incendie réel se déclarant au sein de l'entrepôt. Il fournit également, les résultats des calculs thermogéniques effectués.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [1] Compte-rendu de réunion téléphonique du 06/09/2018 concernant le projet guide ISI entrepôts BLC – point intermédiaire Phase 2 ;
- [2] Vue en plan d'un bâtiment à usage d'activités logistiques à Tremblay en France, phase EXE du 16/02/2017 ;
- [3] Carnet de fabrication des poteaux béton d'un bâtiment à usage d'activités logistiques à Tremblay en France, phase EXE du 04/01/2018 ;
- [4] Plan d'implantation des poteaux béton d'un bâtiment à usage d'activités logistiques à Tremblay en France, phase EXE du 22/12/2017 ;
- [5] Détail 05 d'assemblages poteaux-poutres-pannes d'un bâtiment à usage d'activités logistiques à Tremblay en France.
- [6] Courriel de M GUELLIER (CMBP) du 01/10/2018 et document « prédimensionnement_entrepôt_V3.docx »
- [7] Courriel de M QUINEAU (UICB) du 02/08/2021 – Commentaires sur version (A)

2.2. DOCUMENTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS

- [8] Arrêté du 9 mai 2006 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (parcs de stationnement couverts) ;
- [9] Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages, journal Officiel de la République Française, page 06328, 1er avril 2004 ;
- [10] Arrêté du 11 avril 2017 modifié par l'arrêté du 24 septembre 2020 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.
- [11] Ensemble des Eurocodes :
 - a. NF EN 1990 et Annexe Nationale : « Eurocode 0 : Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures », mars 2003 et NF EN 1990/NA, Décembre 2011 ;
 - b. NF EN 1991-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu », Juillet 2003 et NF EN 1991-1-2/NA, Février 2007 ;
 - c. NF EN 1991-1-3 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : Actions générales – Charges de neige », Avril 2004 et NF EN 1991-1-3/NA, Mai 2007 ;
 - d. NF EN 1991-1-4 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent », Novembre 2005 et NF EN 1991-1-4/NA, Mars 2008 ;
 - e. NF EN 1992-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Octobre 2005 et NF EN 1992-1-2/NA, Octobre 2007 ;
 - f. 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 ;
 - g. NF EN 1995-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu », Septembre 2005 et NF EN 1995-1-2/NA, Avril 2007.
- [12] Article GA 23 du règlement de sécurité dans les ERP ;
- [13] Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage – Établissements recevant du public – LCPP – Juillet 2017 – ISBN : 978-2-11-151968-8 ;
- [14] INERIS – “Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt” – Août 2011.

2.3. DOCUMENTS TECHNIQUES AUTRES

- [15] CIMBETON – B59 – Installation classées et protection de l'environnement – Livre I – Ingénierie de la sécurité incendie ;
- [16] Hao, C. « Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter », Fire and materials, Vol. 16, 197-206, 1992 ;

- [17] CSTB / Efectis – Guide de vérification des entrepôts en bois lamellé collé – Rapport intermédiaire – Choix du cas type – 17-001121/XDU – 26071562-1/YM ind A du 05/06/2018 ;
- [18] 18-001947-AJE-Note d'hypothèses feu-Codifab(Aff SA-17-003102) ;
- [19] Documentation Fire Dynamics Simulator (version 6 - NIST) :
- User's Guide. K. B. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd (special publication 1019, 2016) ;
 - Technical Reference Guide - Volume 2: Verification Guide. K. B. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. E. Floyd, C. Weinschenk & K. Overholt (NIST Special Publication 1018, 2016).
- [20] Logiciel SAFIR :
- User's manual for SAFIR 2016. A computer program for analysis of structures subjected to fire by J.M. Franssen.;
 - Franssen, J.M., Gernay, T. (accepted, conditional to minor revisions). "Modeling Structures in Fire with SAFIR®: Theoretical Background and Capabilities", Journal of Structural Fire Engineering.
- [21] Guide de vérification en situation d'incendie des entrepôts en bois-lamellé collé, EFECTIS/CSTB, version D du 17/12/2019, réf : 18-001947-AJE et 26071562.

3. DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE

La configuration étudiée consiste en un entrepôt de stockage soumis à la rubrique ICPE 1510 constitué de 2 cellules de 72 x 72 m² séparées par un mur CF. La hauteur maximale sous faitage est de 13,7 m. Les poteaux sont en béton armé et la charpente est en bois. La figure suivante présente une vue en plan de cette configuration.

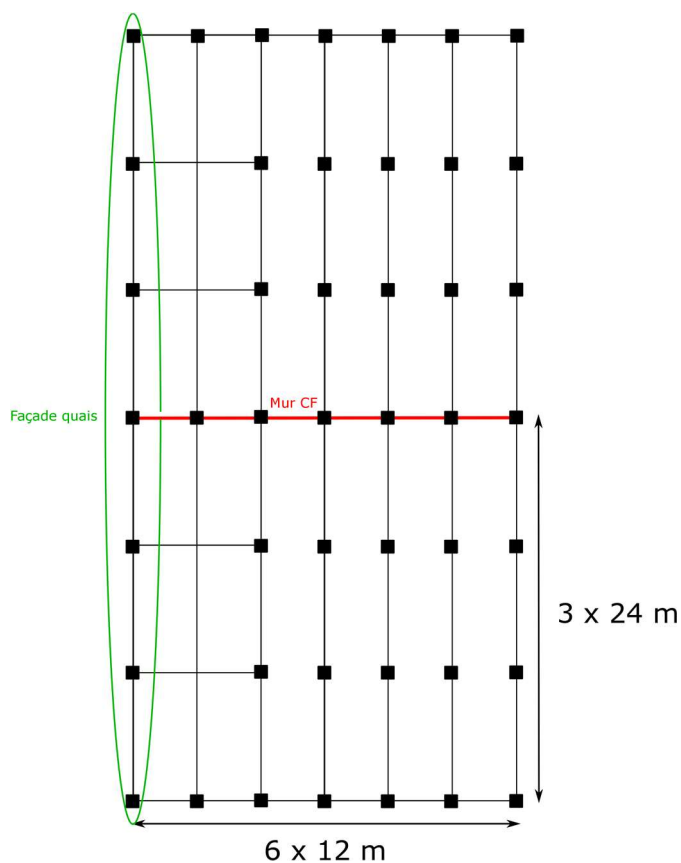


Figure 3-1 : Position des poteaux et de la charpente au sein des cellules type

4. HYPOTHESES GENERALES

4.1. RAPPEL DES HYPOTHESES DE BASE CONCERNANT LES CALCULS DE DEVELOPPEMENT DU FEU

Ce paragraphe a pour but de résumer les hypothèses prises pour la réalisation des calculs de développement de feu réalisés dans l'étude [21].

4.1.1. Stockage

Le stockage proposé consiste en des racks doubles et des racks simples d'une hauteur de 11,5 m (6 niveaux de palettes x 1,5 m avec une distance de 0,5 m entre chaque niveau), permettant de maximiser les sollicitations sous toiture lors de la phase de simulations. La longueur des racks est de 50 m. Les palettes retenues sont des palettes Europe (dimensions 0,8 m x 1,2 m x 1,5 m – l x L x h).

Afin d'éviter de traiter un cas particulier lié à un type de stockage spécifique, il n'est pas fait d'hypothèse sur le contenu du stockage. On considérera alors un stockage type de la rubrique 1510 tel que défini dans la méthode FLUMilog, notamment concernant la charge calorifique associée au stockage (débit calorifique de 1 525 kW pendant 45 min donc 4 117,5 MJ / Palette)

Ce stockage représente ainsi un maximum de 8928 palettes et donc 36,76 x 106 MJ. À titre indicatif, sur la base des hypothèses présentées dans le § 4.3.2 du document [21], la charpente bois représente 1,21 x 106 MJ (soit environ 3% de la charge calorifique totale) On considère une chaleur de combustion de 20 MJ/kg. Les palettes comprennent ainsi une masse unitaire de 206 kg de matériaux combustibles.

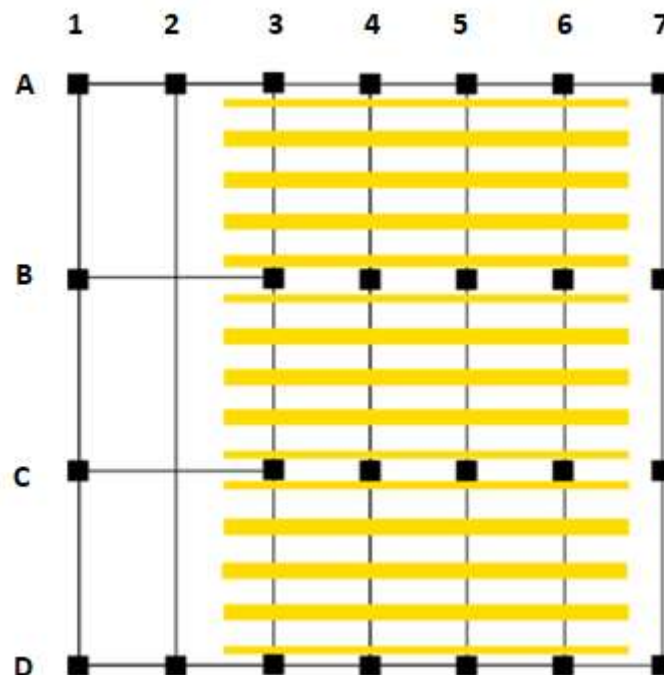


Figure 4-1 : Position des racks au sein de la cellule type

4.1.2. Désenfumage

Conformément à l'arrêté du 11 avril 2017 modifié [10], le désenfumage doit être assuré dans chaque cellule par une surface utile d'exutoire supérieure ou égale à 2% de la surface au sol de la cellule considérée, c'est-à-dire $0,02 \times 5184 \text{ m}^2 = 103,68 \text{ m}^2$. Si l'on considère des exutoires de surface géométrique $2 \times 3 \text{ m}^2$ et ayant un coefficient aérodynamique de 0,5 (hypothèse sécuritaire), cela conduit à un minimum de 35 exutoires. La configuration retenue comprend 36 exutoires (soit une surface utile de 108 m^2) répartis de la façon suivante :

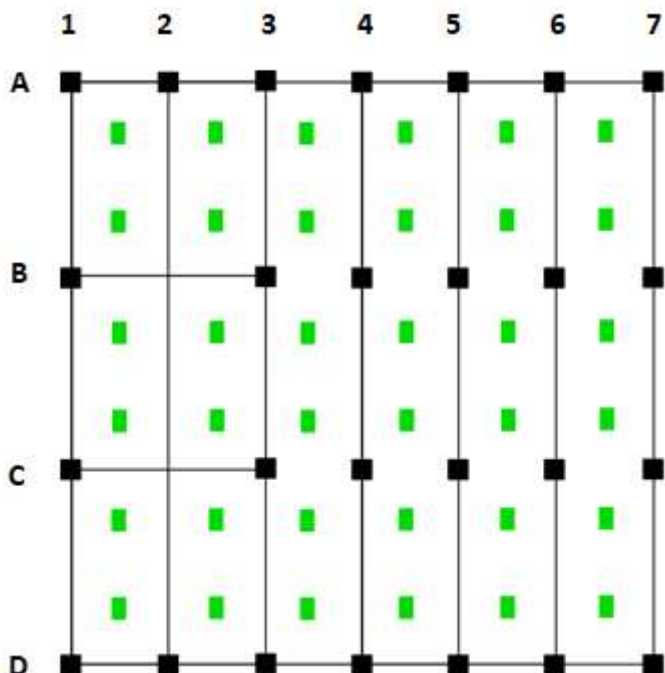


Figure 4-2 : Position des exutoires de fumées en toiture dans la cellule type

De manière sécuritaire, on pourra considérer l'ouverture des exutoires 15 minutes après le départ de feu. Un tel délai permet de maximiser les températures sur les premières minutes de l'incendie.

4.1.3. Cantonnement

L'arrêté du 11 avril 2017 [10] impose également la création de cantons dont la surface doit être inférieure à 1650 m² et la longueur inférieure à 60 m. Il est proposé de découper l'entrepôt en 5 cantons (3 cantons de 48 m × 24 m = 1152 m² et 2 cantons de 36 m × 24 m = 864 m²). Comme fréquemment observé sur les ouvrages existants, les poutres font office d'écrans de cantonnement et ont une hauteur de 1 m.

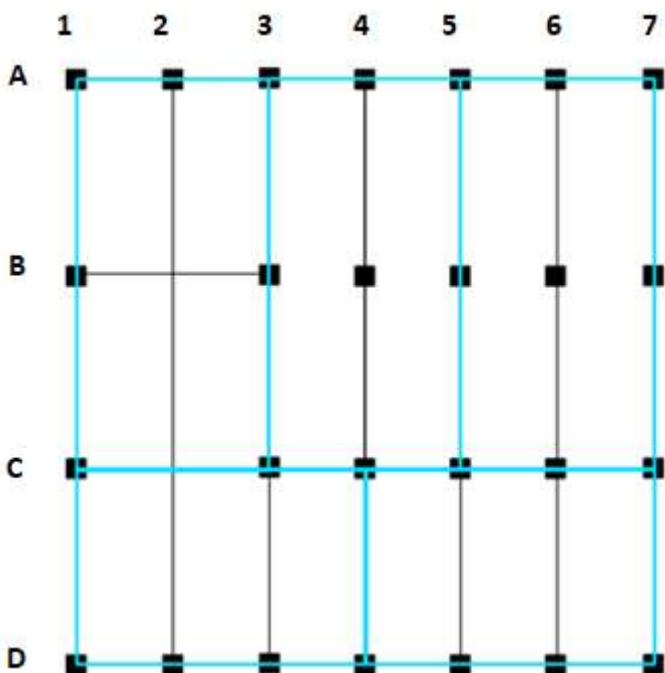


Figure 4-3 : Répartition des cantons dans la cellule type

4.1.4. Détection, système d'extinction automatique à eau et alarme d'évacuation

Il est fait l'hypothèse que, quel que soit le système de détection automatique d'incendie, le déclenchement de l'alarme d'évacuation n'y est pas asservi et que celui-ci est donc manuel.

Quel que soit le système d'extinction automatique à eau installé, celui-ci ne sera pas pris en compte dans le cadre de cette étude (hypothèse classique pour ce type d'étude afin d'étudier le mode de ruine).

4.1.5. Issues de secours et amenées d'air

Afin que tout point de l'entrepôt ne soit pas distant de plus de 50 mètres effectifs (parcours d'une personne dans les allées) de l'une des issues de secours, il est proposé de retenir 4 issues disposées comme présenté sur le schéma ci-après.

Comme il est fréquemment observé, les amenées d'air sont réalisées par les portes de quais. L'arrêté du 11 avril 2017 modifié [10] précise que leur surface utile doit être au moins égale à la surface utile des exutoires du plus grand canton. Il est donc proposé d'intégrer 2 portes de quai, de dimensions $3 \times 4 \text{ m}^2$.

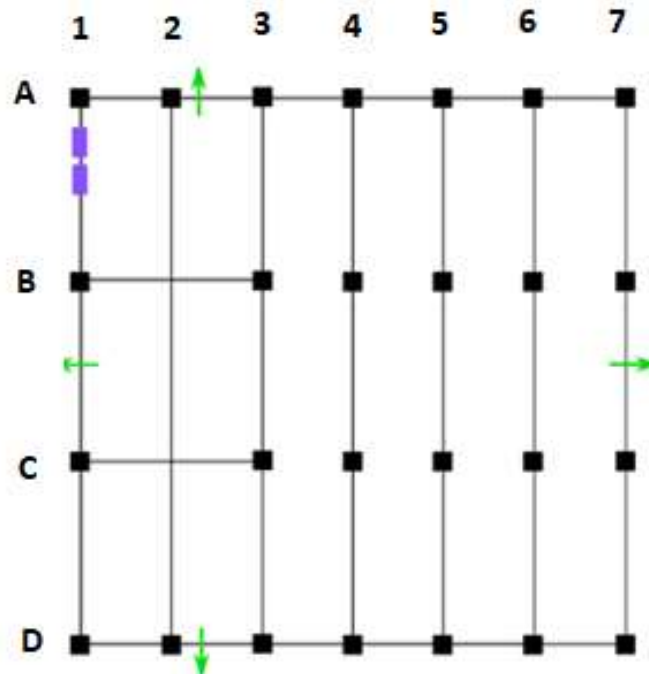


Figure 4-4 : Répartition des issues de secours (flèches vertes) et des portes de quai (rectangles violets) dans la cellule type

4.2. HYPOTHESES DE BASE SUR LA STRUCTURE

La structure porteuse de l'entrepôt étudiée est composée des éléments suivants :

- poteaux en béton armé ;
- poutres en bois lamellé-collé à inertie variable (ventre de poisson) de portée 24 m ;
- traverses en bois lamellé-collé à inertie variable (ventre de poisson) de portée 24 m au droit de la zone de quai ;
- pannes en bois lamellé-collé de portée 12 m.
- entretoises stabilisant les pannes (pour des raisons de nombres d'itération importante, ces éléments n'ont pas été explicitement intégrés dans le modèle numérique).

La figure suivante présente une vue en 3D de la cellule étudiée.

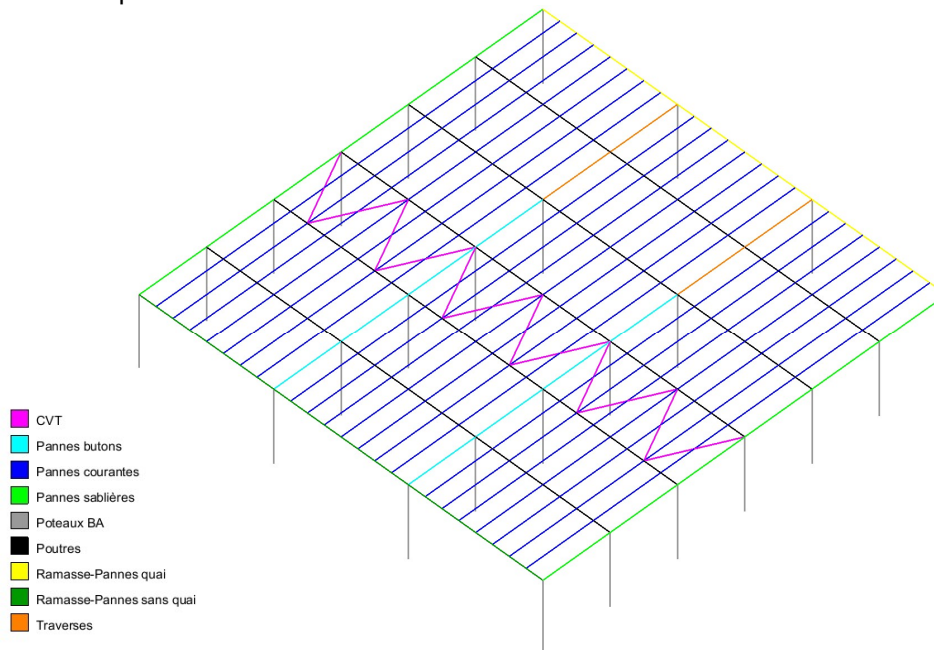


Figure 4-5 : Vue 3D de la charpente bois-béton étudiée

La structure a été dimensionnée à froid pour les charges suivantes :

- Toiture compris surcharges diverses : 50 daN/m²
- Neige, s_k : 60 daN/m²
- Vent, zone 3, rugosité II, Ht : 14m → $q_p(z)$: 106 daN/m²
- Surcharge d'entretien : 80 daN/m² sur 10 m²

4.2.1. Poteaux en béton armé

Les poteaux en béton armé sont encastés en pied (fondations par encuvement par exemple). Leurs sections sont supposées être de deux types possibles :

- rectangulaire qui fait 50x60cm² avec la grande dimension dans le sens des poutres ou dans le sens des traverses ;
- carrée qui fait 50x50cm² notamment pour les poteaux intermédiaires supportant les poutres.

La résistance en compression du béton est prise égale à $f_{ck}=50$ MPa et les aciers filants ont une limite élastique de $f_{yk}=500$ MPa (B500B). Le coefficient de Poisson pour le béton est pris égal à 0.2.

Sur les poteaux de rive ou au niveau des murs coupe-feu, les poutres reposent sur les corbeaux des poteaux. Sur les poteaux intérieurs aux cellules, les poutres sont disposées dans des fourches.

Le ferrailage des poteaux courants est composé au maximum de 8HA32 et 4HA20 et est réparti de la façon suivante :

- De $z=0$ à $z=7$ m : 8HA32 + 4 HA20 (paquet 1B) ;
- De $z=7$ m à $z=10.1$ m : 4HA32 + 4 HA20 (paquets 1B+1C) ;
- De $z=10.1$ m à $z=12.6$ m : 4HA32 (paquets 1B+1C+1A).

En ce qui concerne l'enrobage des aciers, on retient les valeurs suivantes :

- 49 mm pour les aciers HA32 ;
- 55 mm pour les aciers HA20.

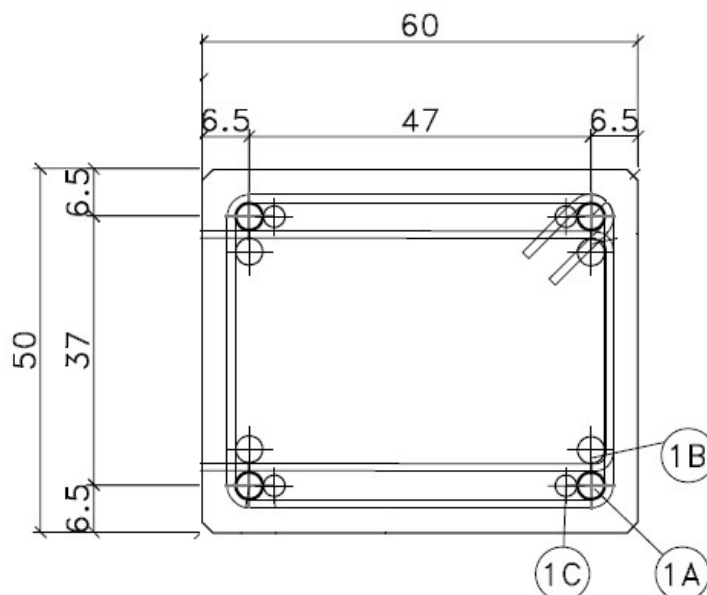


Figure 4-6 : Section de poteau rectangulaire sans feuillure

Certains de ces poteaux présentent une ou deux feuillures supportant le mur coupe-feu entre les deux cellules. Dans ce cas 1 acier HA20 est rajouté au voisinage de chaque feuillure.

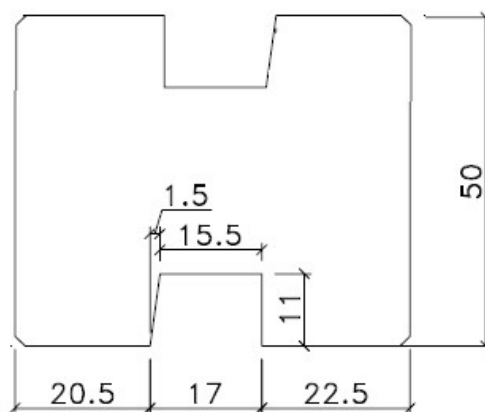


Figure 4-7 : Section de poteau rectangulaire avec feuillure

Le ferrailage maximal devient alors 8HA32 + 8 HA20 pour les poteaux à deux feuillures et 8HA32 + 6 HA20 pour les poteaux à une seule feuillure et est réparti de la façon suivante :

| Hauteur | Poteau à deux feuillures | Poteau à une feuillure |
|----------------------|--------------------------|------------------------|
| De z=0 à z=7m | 8HA32 + 8 HA20 | 8HA32 + 6 HA20 |
| De z=7m à z=10,1m | 4HA32 + 8 HA20 | 4HA32 + 6 HA20 |
| De z=10,1m à z=12,6m | 4HA32 + 4HA20 | 4HA32 + 2HA20 |

Tableau 4-1 : Ferrailage des différents poteaux de l'étude

4.2.2. Charpente bois

4.2.2.1. Propriétés mécaniques

Les poutres, les traverses et les ramasses-pannes en zone sans quai sont de classe GL28H. Les pannes, les entretoises, les diagonales et les ramasses pannes en zone avec quai sont de classe GL24H.

Le tableau suivant issu de la norme NF EN 14080 relative aux éléments en bois BLC permet de définir les différentes propriétés mécaniques à froid nécessaires par la suite pour le calcul au feu.

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

Tableau 4-2 : Propriétés mécaniques du bois en fonction de la classe de résistance

4.2.2.2. Poutres en bois à inertie variable

Les poutres en bois sont à inertie variable en ventre de Poisson. Leur largeur fait 220 mm. Leur hauteur est variable de 1200 mm sur appui à 1760 mm à mi-travée.

La portée de ces poutres est de 24 m et leur entraxe est de 12 m. Elles sont bloquées latéralement tous les 6 m par des pannes contreventées.

Ces poutres ont été dimensionnées en calcul isostatique à froid en se basant sur le chargement suivant :

- Charge permanente : $(50 + 10) \text{ daN/m}^2 * 12,00 = 720 \text{ daN/ml}$
- Neige : $60 \text{ daN/m}^2 * 0,8 * 12,00 = 576 \text{ daN/ml}$
- Vent en pression : $106 \text{ daN/m}^2 (0,2+0,3) * 12,00 = 636 \text{ daN/ml}$
- Vent en soulèvement : $106 \text{ daN/m}^2 (-0,8-0,2) * 12,00 = -1272 \text{ daN/ml}$

La combinaison retenue pour le dimensionnement à froid est $1,35*CP+1,5*(N+0,6*Vp)$.

Préalablement à cette étude, les sections des poutres ont été pré-dimensionnées et vérifiées en R15 selon la combinaison $G+0.2Vp$ par le groupe de travail de la commission technique du SNBL (note de calcul [6]). Un calcul a également été réalisé afin de déterminer la durée de tenue au feu de ces poutres en considérant le maintien des charges et en tenant compte des longueurs de déversement de la note de calcul à froid [6]. Avec une longueur effective de déversement de 9,45 m environ, la tenue au feu normalisé de ces poutres est de l'ordre de 50 minutes.

4.2.2.3. Traverses en bois à inertie variable sur zone de quai

Les traverses en bois sur zone de quai sont à inertie variable en ventre de Poisson. Leur largeur fait 240 mm. Leur hauteur est variable de 1100 mm sur appui à 2100 mm à mi-travée.

La portée de ces traverses est de 24 m et leur espacement est aussi de 24 m. Elles sont bloquées latéralement tous les 6 m par les poutres et des entretoises à mi-travée.

Ces traverses ont été dimensionnées en calcul isostatique à froid en se basant sur les charges ponctuelles suivantes représentant les réactions des poutres courantes ci-dessous :

- Charge permanente : 21 102 daN
- Neige : 13 824 daN
- Vent en pression : 15 264 daN
- Vent en soulèvement : -30 528 daN

La combinaison retenue pour le dimensionnement à froid est $1,35*CP+1,5*(N+0,6*Vp)$. Le déversement a été pris en compte suivant l'annexe MCR de l'Eurocode 3.

Préalablement à cette étude, les sections de ces traverses ont été pré-dimensionnées et vérifiées en R15 selon la combinaison G+0.2Vp par le groupe de travail de la commission technique du SNBL (note de calcul [6]). Un calcul a également été réalisé afin de déterminer la durée de tenue au feu de ces poutres en considérant le maintien des charges et en tenant compte des longueurs de déversement de la note de calcul à froid [6]. Avec une longueur effective de déversement de 10,2 m environ, la tenue au feu normalisé de ces poutres est de l'ordre de 40 minutes.

4.2.2.4. Pannes en bois

Les pannes en bois sont à section constante rectangulaire de largeur 105 mm et de hauteur 627 mm. Le bois est de classe GL24H.

La portée de ces pannes est de 12 m et leur espacement est de 3 m. Elles sont entretoisées à mi-portée.

Ces pannes ont été dimensionnées à froid en se basant sur le chargement suivant :

- Charge permanente : $50 \text{ daN/m}^2 * 3,00 =$ 150 daN/ml
- Neige : $60 \text{ daN/m}^2 * 0,8 * 3,00 =$ 144 daN/ml
- Vent en pression : $106 \text{ daN/m}^2 (0,2+0,3) * 3,00 =$ 159 daN/ml
- Vent en soulèvement : $106 \text{ daN/m}^2 (-0,8-0,2) * 3,00 =$ -318 daN/ml
- Surcharge d'entretien : $80 \text{ daN/m}^2 * 2,24 =$ 144 daN/ml sur 4,48 m

Le dimensionnement à froid est réalisé selon la combinaison $1,35*CP+1,5*(N+0,6*Vp)$ et sans prise en compte du bac acier en anti-déversement.

Préalablement à cette étude, les sections de ces pannes ont été pré-dimensionnées et vérifiées en R15 selon la combinaison G+0.2Vp par le groupe de travail de la commission technique du SNBL (note de calcul [6]). Un calcul a également été réalisé afin de déterminer la durée de tenue au feu de ces pannes en considérant le maintien des charges et en tenant compte des longueurs de déversement de la note de calcul à froid [6]. Avec une longueur effective de déversement de 5,78 m environ, la tenue au feu normalisé de ces poutres est inférieure à 20 minutes.

4.2.2.5. Autres éléments en bois

Le tableau suivant récapitule la largeur et la hauteur des sections des différents autres éléments en bois utilisés dans le cadre de ce cas type ainsi que la classe de bois utilisée.

| Éléments | Largeur (mm) | Hauteur (mm) | Classe |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------|
| Pannes sablières | 105 | 627 | GL24H |
| Pannes-butons | 140 | 627 | GL24H |
| Ramasses-pannes en zone sans quai | 140 | 675 | GL28H |
| Ramasses-pannes en zone avec quai | 140 | 402 | GL24H |

| | | | |
|-------------|-----|-----|-------|
| Entretoises | 80 | 145 | GL24H |
| Diagonales | 220 | 140 | GL24H |

Tableau 4-3 : Dimension des sections des éléments de charpente bois

4.2.2.6. Assemblages entre éléments

Pour les assemblages entre éléments bois et entre éléments bois et poteaux béton, nous supposons conformément aux deux figures suivantes que :

- les pannes sont liées aux poutres principales par l'intermédiaire de plaques métalliques fixées par trois boulons $\phi 16 \times 180 \text{ mm}$ sur panne et sur poutre ;
- les poutres et les traverses sont liées aux poteaux en béton armé par trois broches $\phi 20 \times 498 \text{ mm}$.

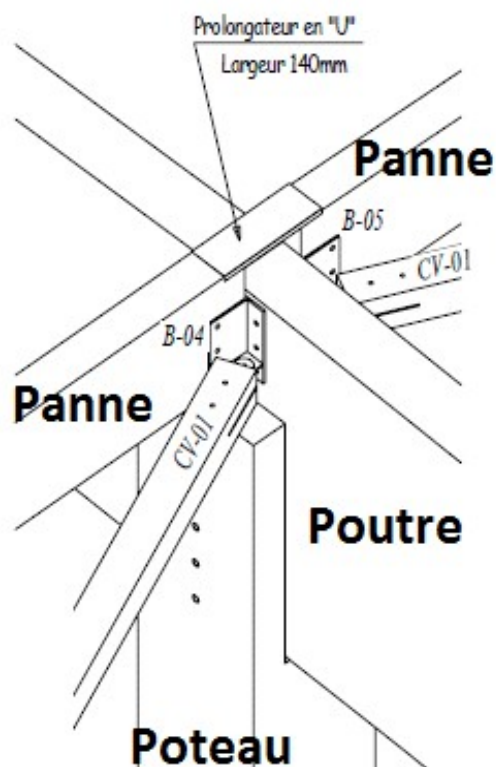


Figure 4-8 : Vue en perspective de la liaison panne/poutre/poteau

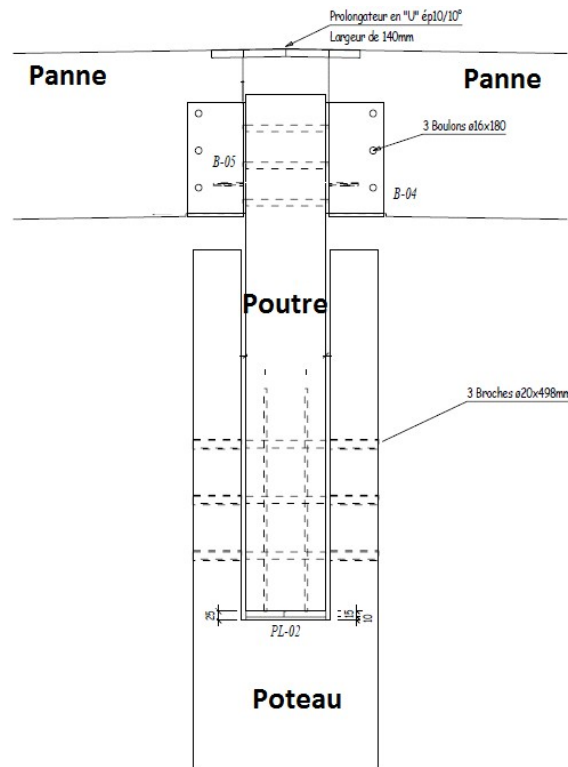


Figure 4-9 : Vue en élévation liaison panne/poutre/poteau

Dans les calculs réalisés nous considérons que les assemblages sont au moins aussi résistants que les sections en situation d'incendie. En d'autres termes, on ne considérera pas de ruine des assemblages. Les assemblages des poutres principales et traverses devront être à minima R60. Les efforts additionnels dus aux éventuels phénomènes de gradient thermique sur les poteaux devront également être pris en compte dans leur dimensionnement [21]

5. RAPPEL DES RESULTATS DES CALCULS DE DEVELOPPEMENT DE FEU

Le présent paragraphe synthétise les résultats des calculs de développement de feu réalisés dans le cadre de l'étude [21] et directement repris pour cette étude chronologique.

5.1. POSITION DES SCENARIOS ETUDIES

Il est proposé d'étudier deux positions de départ de feu dans le cadre de cette étude :

- 1 : au « centre » de la cellule, à proximité d'un poteau, en partie basse ;
- 2 : en « coin » de la cellule, en partie basse ;

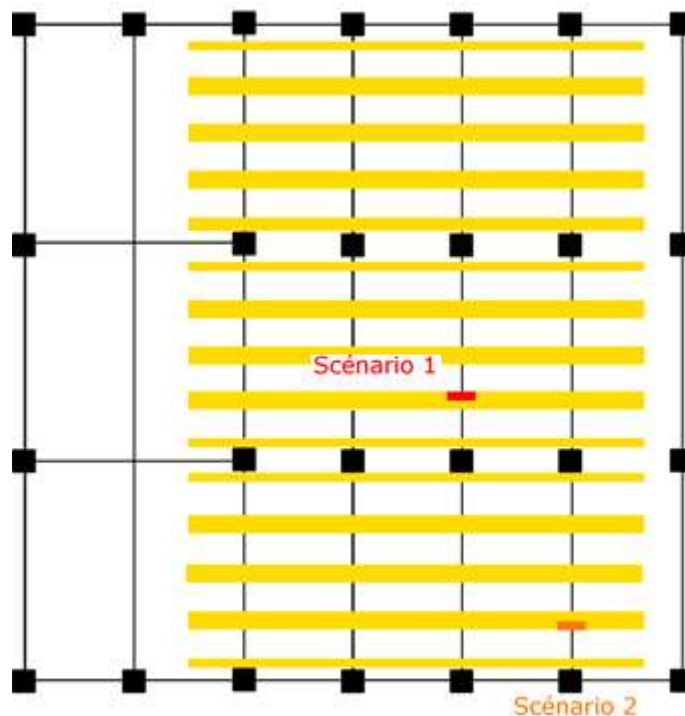


Figure 5-1 : Position des scénarios au sein de la cellule type

Ces scénarios sont régulièrement rencontrés dans les études de mode de ruine de bâtiments. Ils permettent de vérifier les exigences relatives aux objectifs de sécurité dans des conditions standards.

5.2. SYNTHÈSE DES SOLlicitATIONS THERMIQUES

5.2.1. Scénario 1

Les figures suivantes présentent l'évolution de la température des gaz en fonction de la distance au foyer (R) et de la hauteur (H).

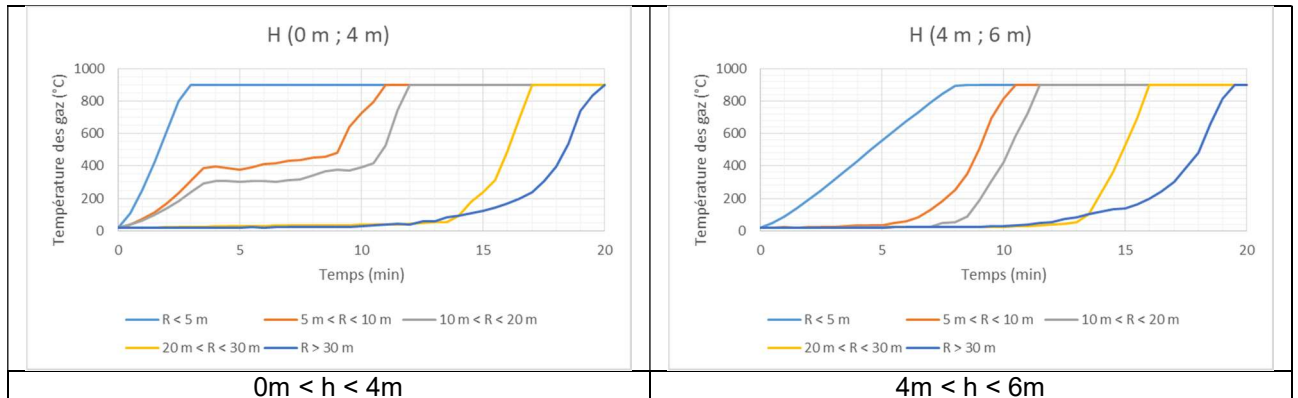


Figure 5-2 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 0 et 6 m

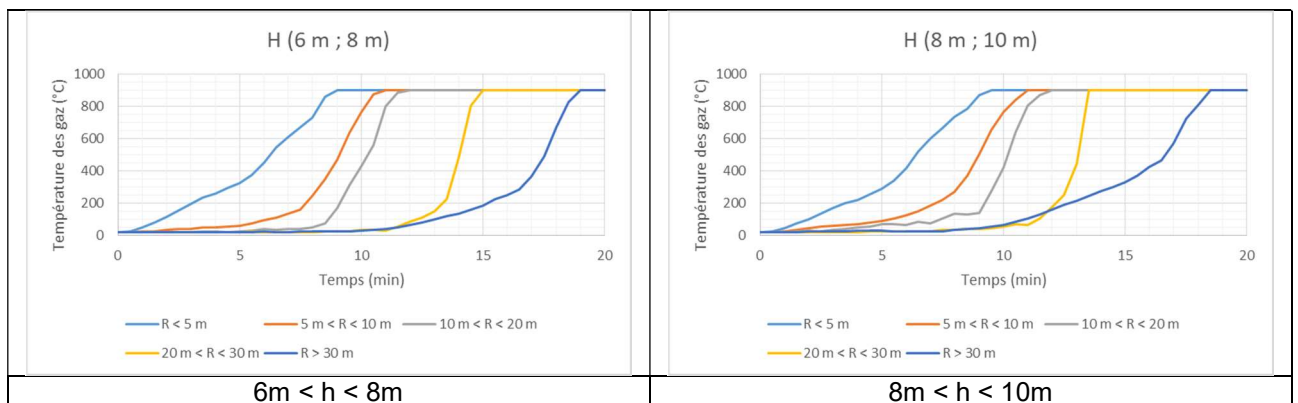


Figure 5-3 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 6 et 10 m

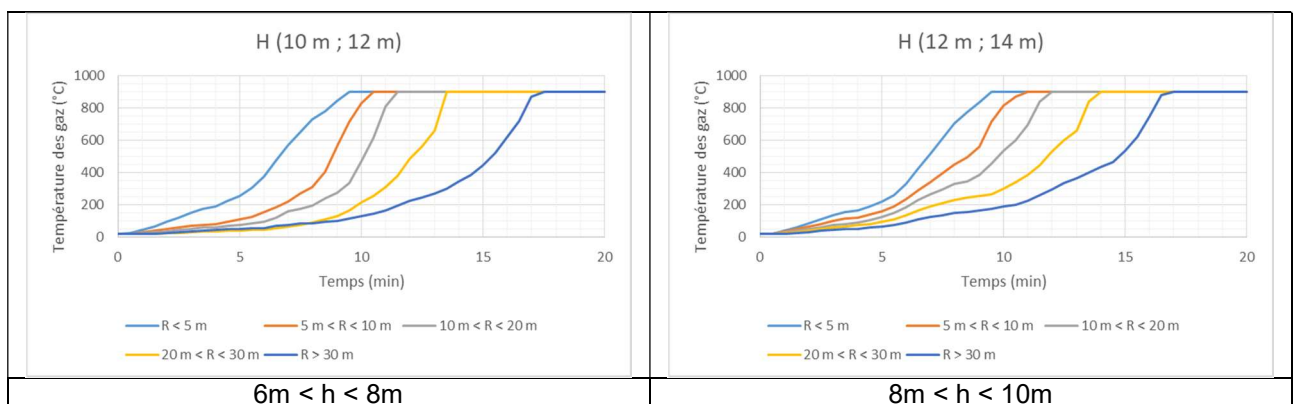


Figure 5-4 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 10 et 14 m

5.2.2. Scénario 2

Les figures suivantes présentent l'évolution de la température des gaz en fonction de la distance au foyer (R) et de la hauteur (H).

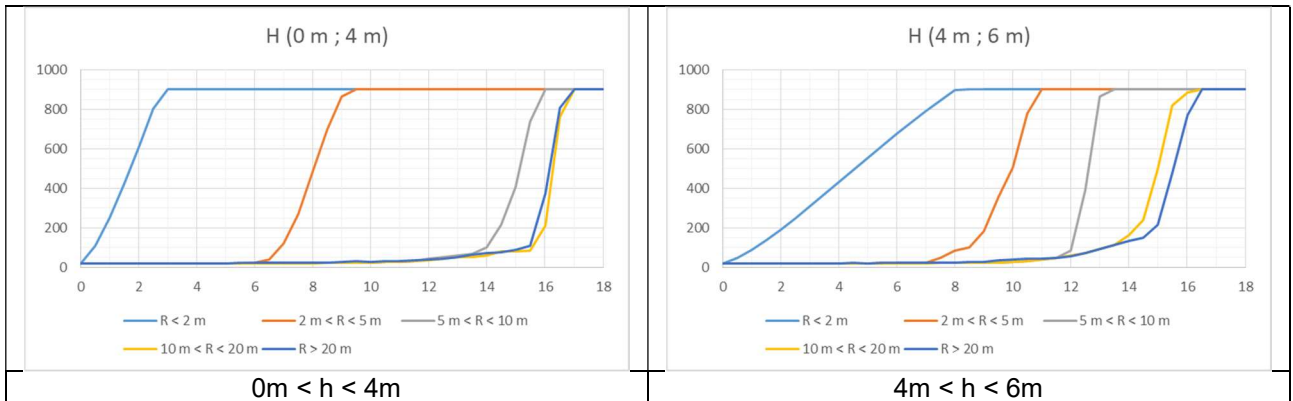


Figure 5-5 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 0 et 6 m

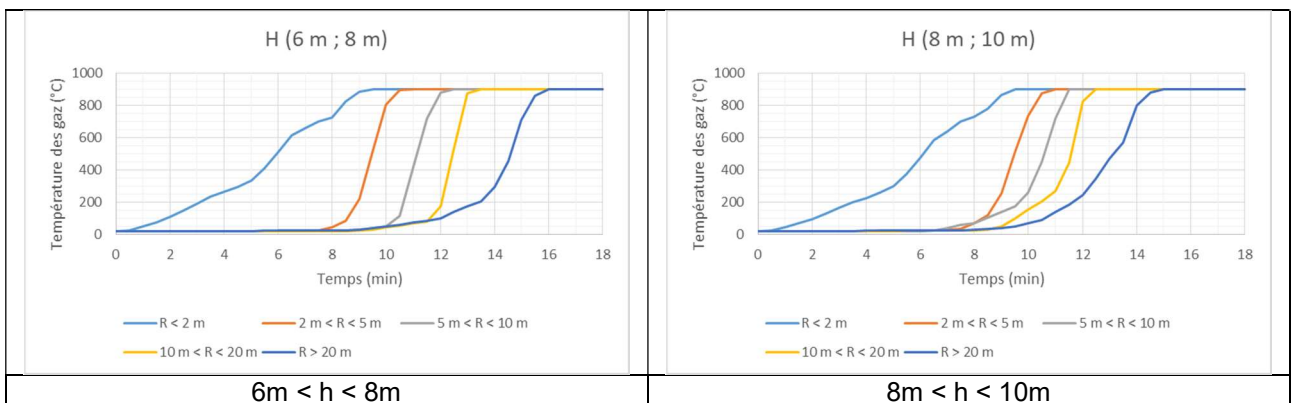


Figure 5-6 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 6 et 10 m

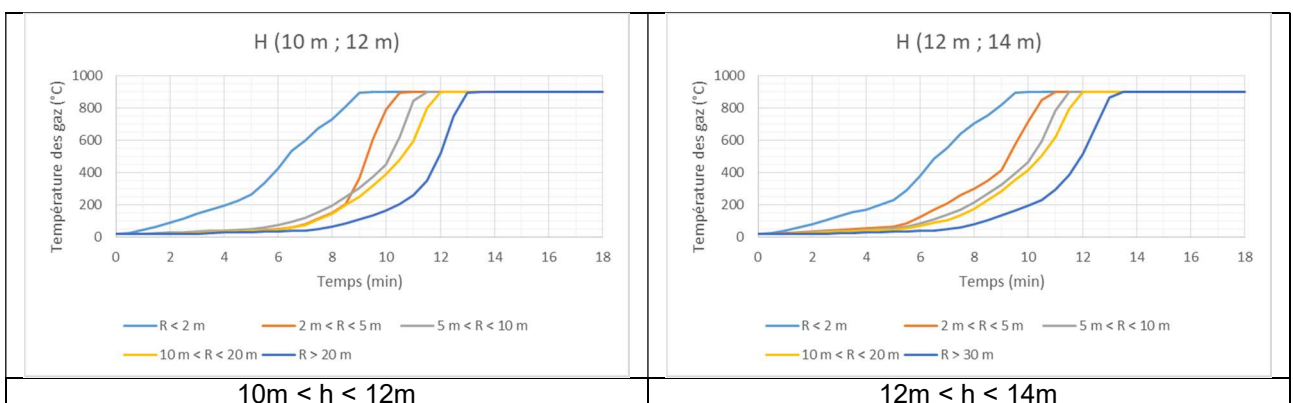


Figure 5-7 : Température des gaz à différentes distances du départ de feu pour une hauteur comprise entre 10 et 14 m

5.3. ACTIONS THERMIQUES RETENUES

Les premiers calculs ayant montré que la position du foyer n'a que très peu d'impact sur la chronologie de ruine des éléments, seul un scénario au droit de la poutre au vent et au niveau d'une traverse de quais seront étudiés.

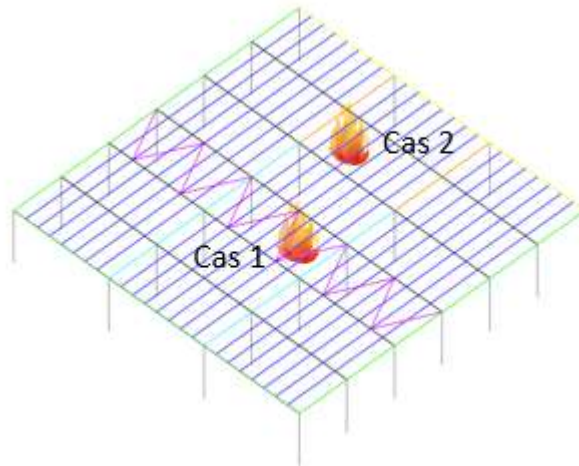


Figure 5-8 : Positionnement des foyers retenus

6. ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DE LA CHARPENTE BOIS-BETON

6.1. HYPOTHESES DE CALCULS

6.1.1. Échauffement des éléments

Les températures calculées par la modélisation du développement du feu sont utilisées pour déterminer l'échauffement des différentes sections en fonction du temps.

Pour chaque scénario, l'évolution en fonction du temps de la température dans les éléments de structure est déterminée :

- Pour les éléments en béton armé ou précontraint, l'échauffement est déterminé à partir de modèles de calcul avancés conformément à l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-2 [11]e + annexe nationale) ;
- Pour les éléments en bois, l'échauffement est déterminé à partir des modèles de calcul avancés conformément à l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-2 [11]g + annexe nationale).

Les calculs de transfert thermiques sont réalisés à partir du code de calcul SAFIR développé par l'université de Liège [20]. L'utilisation de ce logiciel suppose les coefficients d'échanges suivants :

- coefficient de transfert thermique par convection en face exposée : $\alpha = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- coefficient de transfert thermique par convection en face non exposée : $\alpha = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- émissivité du béton : $\varepsilon_c = 0.7$;
- émissivité du bois : $\varepsilon_b = 0.8$.

En fonction de la position de l'élément considéré par rapport au foyer, différentes sollicitations thermiques lui sont appliquées. Comme illustré précédemment dans les courbes de sollicitation thermique des éléments en fonction du scénario, l'entrepôt est divisé en plusieurs zones de température différentes permettant de retranscrire un incendie réel se développant en son sein.

Les propriétés thermo physiques du béton armé et du bois sont celles données dans l'Eurocode 2 partie 1-2 [11]e et dans l'Eurocode 5 partie 1-2[11]g.

Il est à noter que les sollicitations thermiques obtenues par les calculs de développement de feu ont été prolongées une fois l'atteinte des 900 °C de manière infinie et ce dans le but d'étudier le mode de ruine de la structure.

Les différents résultats concernant les échauffements des éléments en fonction de leur position sont donnés dans le rapport précédent [21]. Par conséquent ils ne sont pas présentés à nouveau dans le présent rapport. Le lecteur est invité à se rapporter au rapport précédent pour le détail des échauffements [21].

6.1.2. Propriétés mécaniques des matériaux

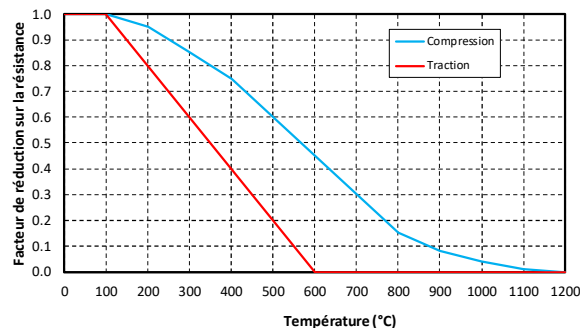
Les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans cette étude sont données ci-après. Leurs variations en fonction de l'élévation de la température suivant les Eurocodes respectifs partie 1-2 sont prises en compte dans le code de calcul utilisé.

| Propriété mécanique | Valeur |
|--|-------------------------|
| <i>Béton des poteaux</i> | |
| Coefficient de poisson ν | 0,2 |
| Masse volumique ρ_c | 2 400 kg/m ³ |
| Résistance en compression f_{ck} | 50 MPa |
| <i>Acier des armatures des poteaux</i> | |
| Module d'élasticité E_s | 200 000 MPa |
| Coefficient de poisson ν | 0,3 |
| Masse volumique ρ_s | 7 850 kg/m ³ |
| Nuance | B500B |
| <i>Bois lamellé-collé GL24h</i> | |
| Module d'élasticité $E_{0,05}$ | 9 600 MPa |

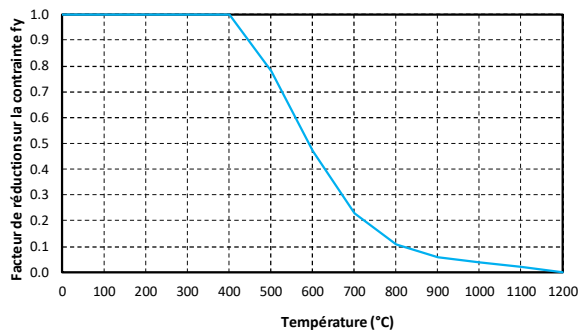
| Propriété mécanique | Valeur |
|---|---------------------------------------|
| Module de cisaillement $G_{0,05}$ | 540 MPa |
| Résistance à la flexion $f_{m,k}$ | 24 MPa |
| Résistance à la compression $f_{c,0,k}$ | 24 MPa |
| Résistance à la traction $f_{t,0,k}$ | 19,2 MPa |
| Coefficient k_{fi} pour passage au fractile à 20% | 1,15 |
| Coefficient de poisson ν | $\frac{E_{0,05}}{2 \cdot G_{05}} - 1$ |
| <i>Bois lamellé-collé GL28h</i> | |
| Module d'élasticité $E_{0,05}$ | 10 500 MPa |
| Module de cisaillement G_{05} | 540 MPa |
| Résistance à la flexion $f_{m,k}$ | 28 MPa |
| Résistance à la compression $f_{c,0,k}$ | 28 MPa |
| Résistance à la traction $f_{t,0,k}$ | 22,4 MPa |
| Coefficient k_{fi} pour passage au fractile à 20% | 1,15 |
| Coefficient de poisson ν | $\frac{E_{0,05}}{2 \cdot G_{05}} - 1$ |

Tableau 6-1 : Propriétés mécaniques de matériaux utilisées

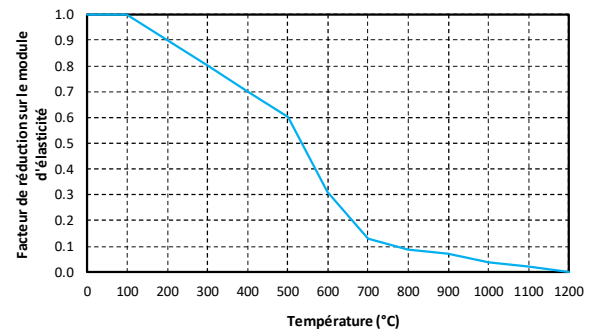
Les figures suivantes illustrent la variation des propriétés mécaniques des matériaux employés en fonction de l'élévation de température.



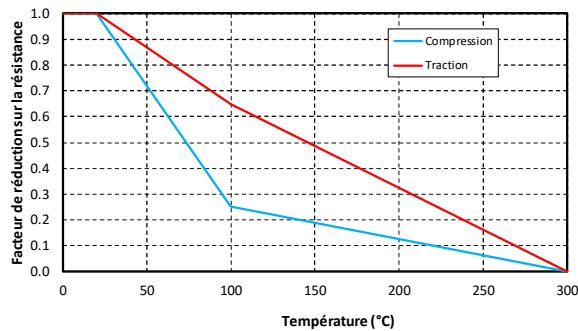
a) béton



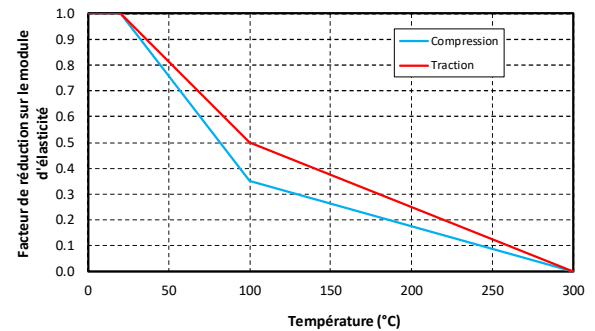
b.1) acier – Réduction sur la contrainte f_y



b.2) acier – Réduction sur le module d'élasticité



c.1) bois – Réduction sur les contraintes de compression et traction



c.2) bois – Réduction sur le module d'élasticité

Figure 6-1 : Évolution des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température

Par ailleurs, le calcul du moment résistant à chaud du bois est réalisé avec des coefficients k_{mod} , k_{ser} , γ_M égaux à 1.

6.1.3. Chargement mécanique

Les charges appliquées à la structure sont données dans le tableau suivant.

| Élément – Désignation | Valeur de la charge |
|---|---|
| <i>Charges permanentes (G)</i> | |
| Poids propre des éléments en béton armé | 2 500 kg/m ³ |
| Poids propre des éléments bois | |
| Bois de classe GL24h | 420 kg/m ³ |
| Bois de classe GL28h | 460 kg/m ³ |
| Poids propre complexe de toiture | 50 kg/m ² |
| <i>Charges de neige (S)</i> | |
| Charge caractéristique | 60 kg/m ² |
| Coefficient de forme sans accumulation | 0,8 |
| <i>Charges de vent (W)</i> | |
| Pression dynamique de pointe q_p | 106 kg/m ² |
| Directions de vent | Transversale (W_T) Longitudinale (W_L) |
| Coefficients de pression interne | +0,2 -0,3 |
| Coefficients de pression externe | Selon Eurocode 1 partie 1-4 |

Tableau 6-2 : Charges appliquées à la structure

La figure suivante donne les sens de vent étudiés dans le but d'étudier le mode de ruine de la charpente bois-béton de l'entrepôt objet d'étude.

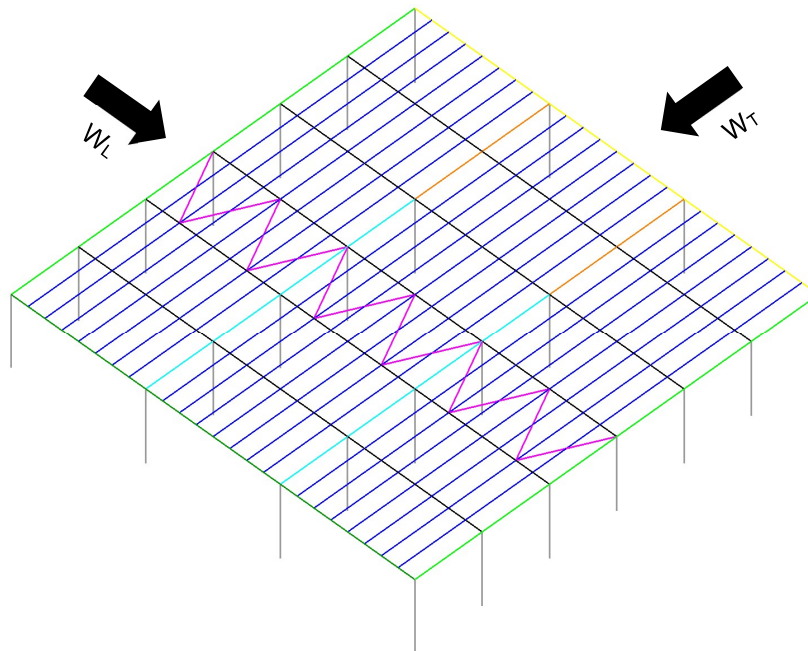


Figure 6-2 : Directions de vent étudiées

6.1.4. Combinaisons de charges étudiées

Les combinaisons d'actions en cas d'incendie étudiées sont celles mentionnées dans l'EN 1990 [11]a, à savoir :

$$G + 0,2 S$$

$$G + 0,2 W$$

Où G est la valeur caractéristique des charges permanentes, Q est la valeur caractéristique des charges d'exploitation, S est la valeur caractéristique des charges de neige et W est la charge caractéristique de vent. Compte tenu de l'objectif de l'étude, les trois combinaisons de charges seront étudiées. La combinaison impliquant la neige générant un maximum de charge gravitaire induisant des charges plus importantes sur les poutres principales ; les combinaisons impliquant le vent soulageant les pannes et permettant de maintenir leur charge pendant des durées plus longues sur les poutres principales.

6.1.5. Imperfections géométriques et défaut global d'aplomb

Les effets du second ordre dus aux imperfections géométriques sont pris en compte sous la forme de charges horizontales en tête des poteaux conformément au § 5.3a de l'Eurocode 2 partie 1-2. La charge horizontale à appliquer en tête d'un poteau est donnée par la formule suivante :

$$H_i = \theta_i N$$

Où N est l'effort vertical appliqué sur le poteau et θ_i est l'inclinaison qui est calculée par la formule qui suit :

$$\theta_i = \theta_0 \alpha_h \alpha_m$$

$\theta_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ rad est la valeur de base de l'inclinaison ;

α_h est un facteur de réduction relatif à la hauteur du poteau :

$$\alpha_h = \max\left(\frac{2}{3}; \min\left(\frac{2}{\sqrt{L}}; 1\right)\right)$$

α_m est un facteur de réduction relatif au nombre m des éléments verticaux contribuant à l'effet total :

$$\alpha_m = \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

Dans notre cas la valeur de l'inclinaison θ_i obtenue est $2.5 \cdot 10^{-3}$ rad.

6.1.6. Prise en compte des instabilités latérales des pannes

L'ANNEXE A présente des résultats de calculs paramétriques réalisés sur les pannes du bâtiment. Il apparaît que l'augmentation notable de la résistance flexionnelle du matériau n'apporte pas un décalage temporel important de l'instant de ruine de l'élément. Par contre, la prise en compte ou non du déversement modifie sensiblement les temps de ruine des pannes. Le déversement de ces éléments pouvant dépendre de plusieurs

facteurs difficilement quantifiables (maintien des entretoises, fixation au bac support d'étanchéité...), le calcul tenant compte du déversement aura plutôt tendance à être celui reproduisant le temps de stabilité au feu minimal des pannes. À l'inverse, un calcul sans prise en compte de ce phénomène au niveau des pannes aura tendance à être celui représentatif d'une situation avec un temps de stabilité au feu des pannes maximal.

Par conséquent, et compte-tenu des objectifs de l'étude (maintenir au plus longtemps la charge sur les poutres principales), il a été retenu de ne pas tenir compte du déversement des pannes. Le déversement des autres porteurs bois horizontaux sera par contre pris compte (voir §ANNEXE A pour le détail d'une analyse paramétrique d'une panne avec et sans prise en compte du déversement).

6.2. HYPOTHESES DE MODELISATION

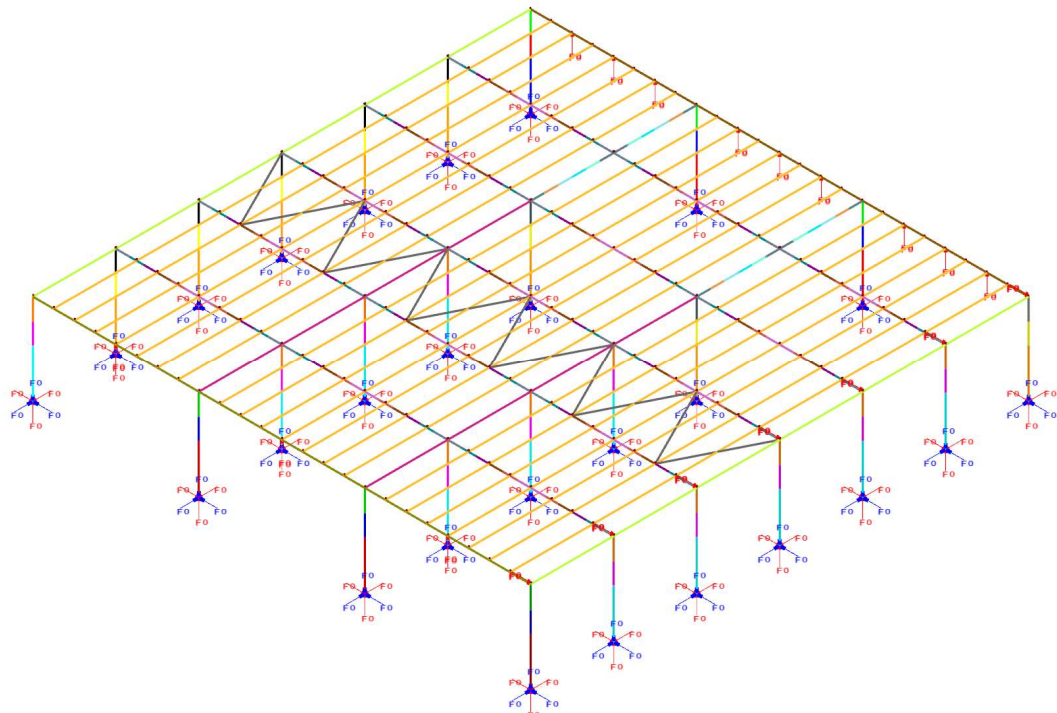
Le présent paragraphe détaille les principales hypothèses de modélisation prises en compte dans la réalisation des calculs thermomécaniques pour l'étude chronologique de la ruine de la charpente bois-béton de l'entrepôt.

6.2.1. Conditions aux limites

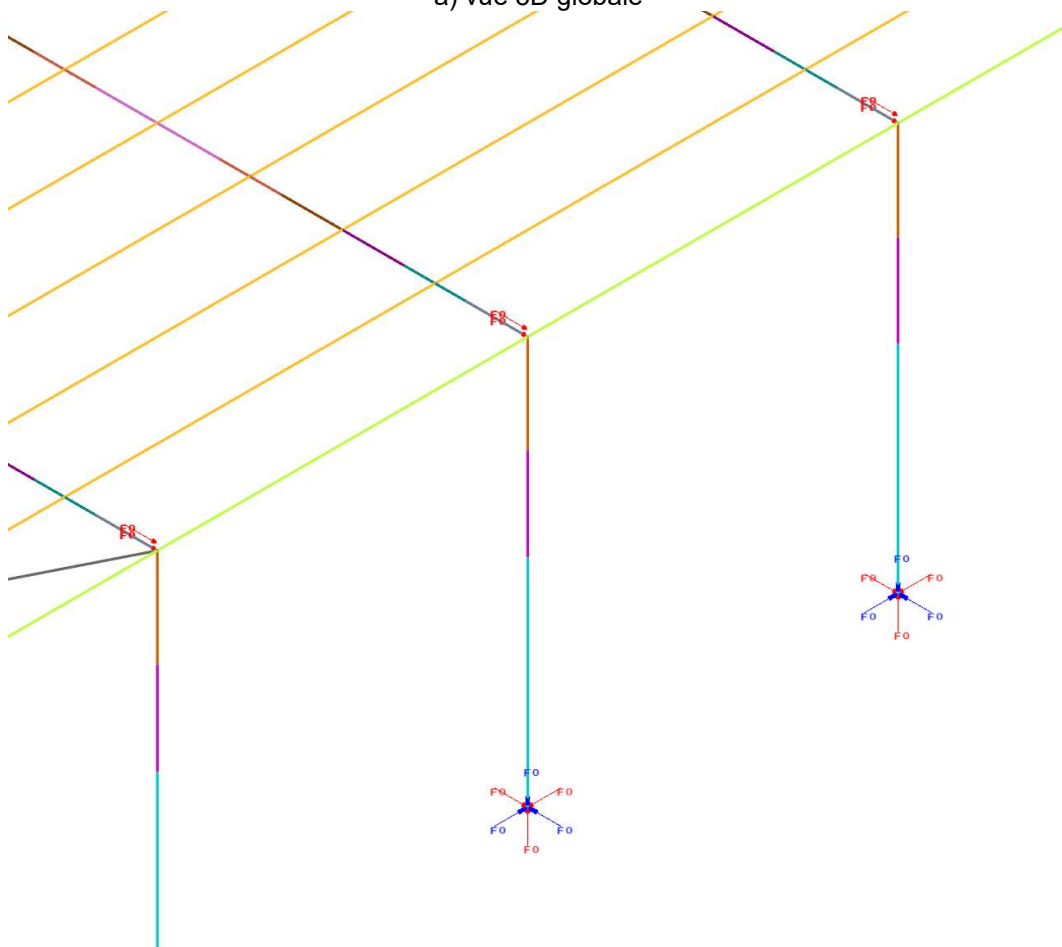
Les hypothèses suivantes sont intégrées dans le modèle thermomécanique :

- Les poteaux sont supposés encastres en pied et articulés en tête.
- Les liaisons entre poteaux béton et éléments horizontaux en bois (poutres, traverses et pannes butons) dans le modèle thermomécanique à barres sont des articulations qui sont considérées comme infiniment résistantes.
- Les poutres, les traverses et les pannes butons sont supposées isostatiques et il n'y a pas de continuité sur les appuis constitués par les poteaux.
- Quel que soit le modèle considéré, on tient compte d'une charge verticale uniformément répartie sur chacun des poteaux due à son poids propre.
- Pour le modèle global de la cellule échauffée, les charges liées à la cellule voisine sont reportées en tête de poteau au droit du mur séparatif. Un blocage hors plan en tête de poteau est considéré au niveau de la cellule froide.
- Pour le modèle global, les têtes de 7 poteaux du pignon et du mur coupe-feu sont supposées reliées entre elles par une poutre béton dans le sens transversal. Cette dernière ne faisant pas l'objet de l'étude, une condition aux limites de compatibilité de déplacement dans le sens transversal a été prise en compte sur l'ensemble de ces têtes de poteau.
- Pour le modèle global, dans l'objectif de déterminer la durée de stabilité minimale, les caractéristiques des sections liées à la torsion sont remises à jour en fonction du temps de ruine estimé. Cette procédure de mise à jour des propriétés de torsion est détaillée dans le paragraphe suivant.
- Dans le cas où une panne viendrait à ruiner avant un contreventement de la poutre au vent, il a été supposé de manière sécuritaire (et en accord avec les membres de la SNBL) que les diagonales situées sous ces pannes ruinaient simultanément.
- Un blocage au déversement (rotation selon l'axe des pannes) a été introduit dans les calculs dans le but de s'affranchir de la modélisation des entretoises et de manière sécuritaire (temps de tenue des pannes plus long).
- Les ramasse-pannes côté quais sont considérés comme des poutres simplement appuyées sur 5 appuis (3 appuis intermédiaires conférés par les potelets). Aucune information n'étant connue sur la nature des potelets au moment de la réalisation des calculs (hormis leur encastrement en pied), une faible raideur selon l'axe faible des ramasse-pannes a été introduite dans les modèles afin de tenir compte de leur présence (limitation des déplacements hors-plan à $L/80$, L étant la distance entre poteaux principaux).
- Les ramasse-pannes côté opposé aux quais sont considérés comme des poutres simplement appuyées sur 3 appuis (1 appui intermédiaire conféré par le potelet). Aucune information n'étant connue sur la nature des potelets au moment de la réalisation des calculs (hormis leur encastrement en pied), une faible raideur selon l'axe faible des ramasse-pannes a été introduite dans les modèles afin de tenir compte de leur présence (limitation des déplacements hors-plan à $L/80$, L étant la distance entre poteaux principaux).
- À noter que pour ces derniers éléments (ramasse-pannes côté quais et côté opposé aux quais), le dimensionnement à froid a été fait en prenant en compte un appui vertical et horizontal par les potelets béton.

La figure suivante illustre les conditions aux limites implémentées dans le modèle thermomécanique.



a) vue 3D globale



b) blocages des déplacements hors-plan des poteaux en commun avec la cellule froide adjacente

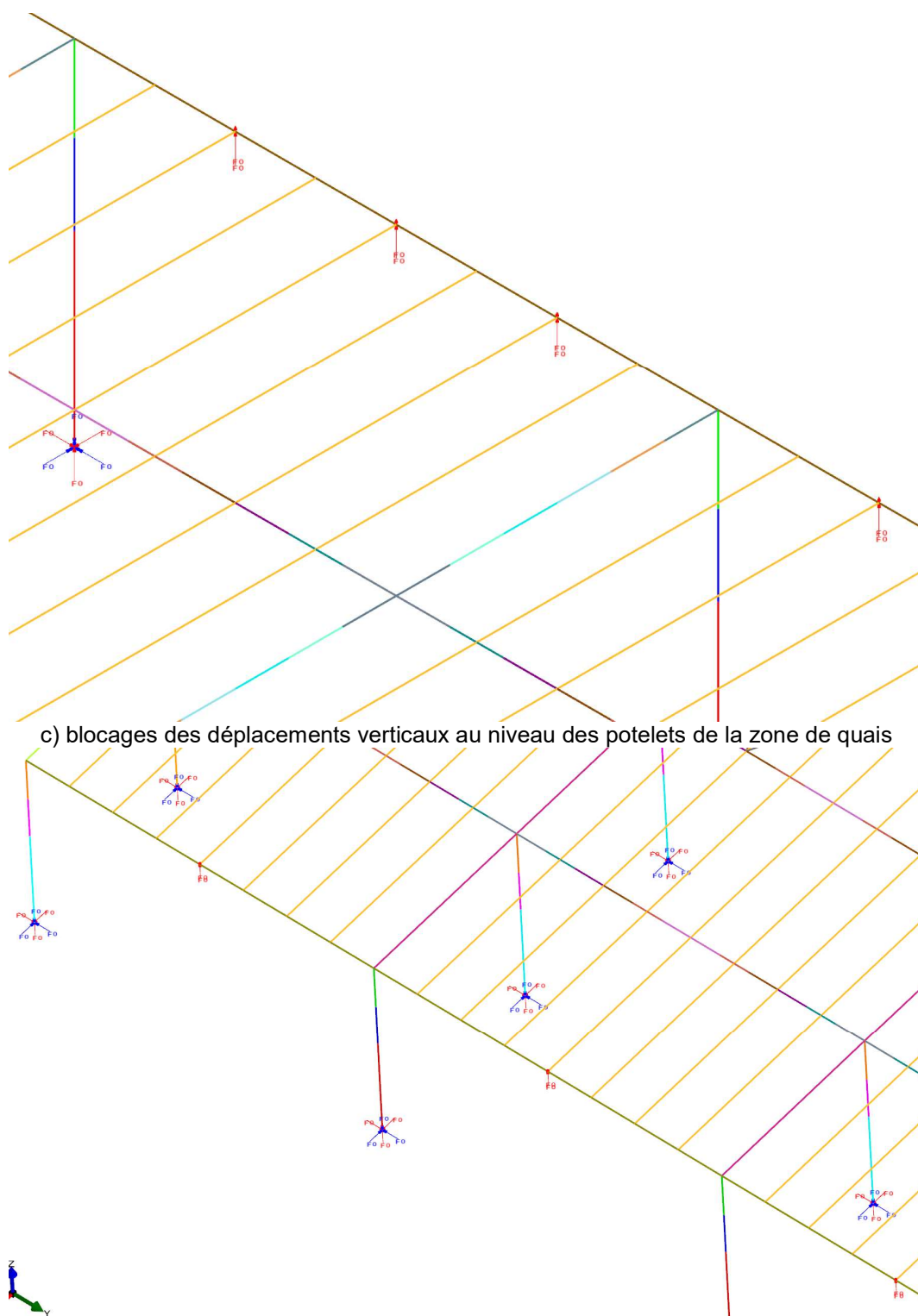


Figure 6-3 : Conditions aux limites

Pour prendre en compte l'excentrement de la charge verticale ramenée par les pannes sur les poutres et par les poutres sur les traverses, des éléments fictifs (de rigidité importante) ont été implémentés dans le modèle thermomécanique tel qu'illustré à la figure suivante.

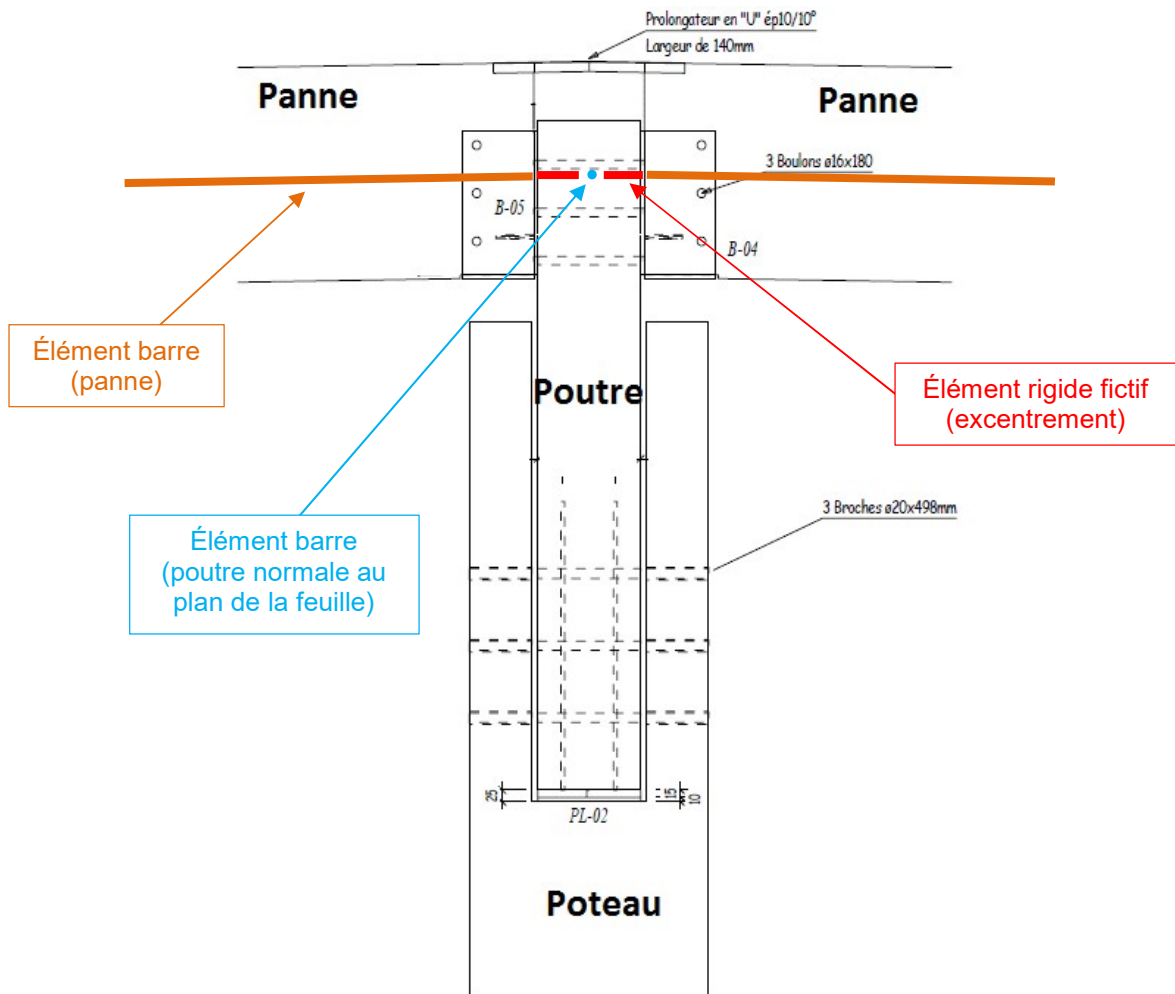
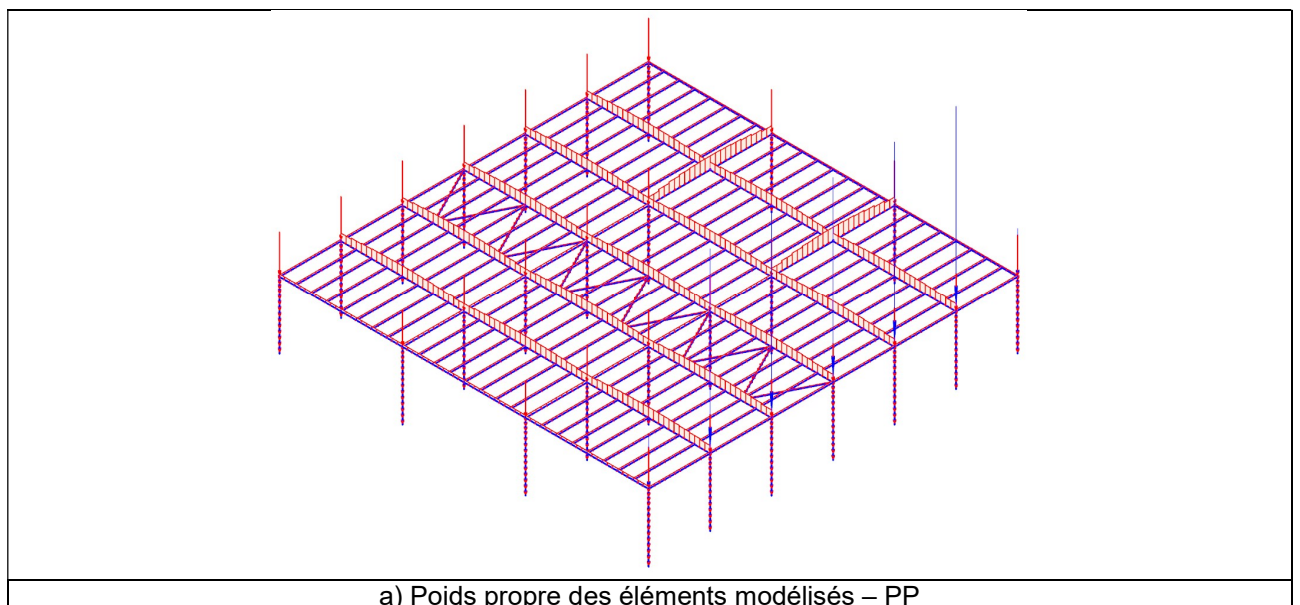
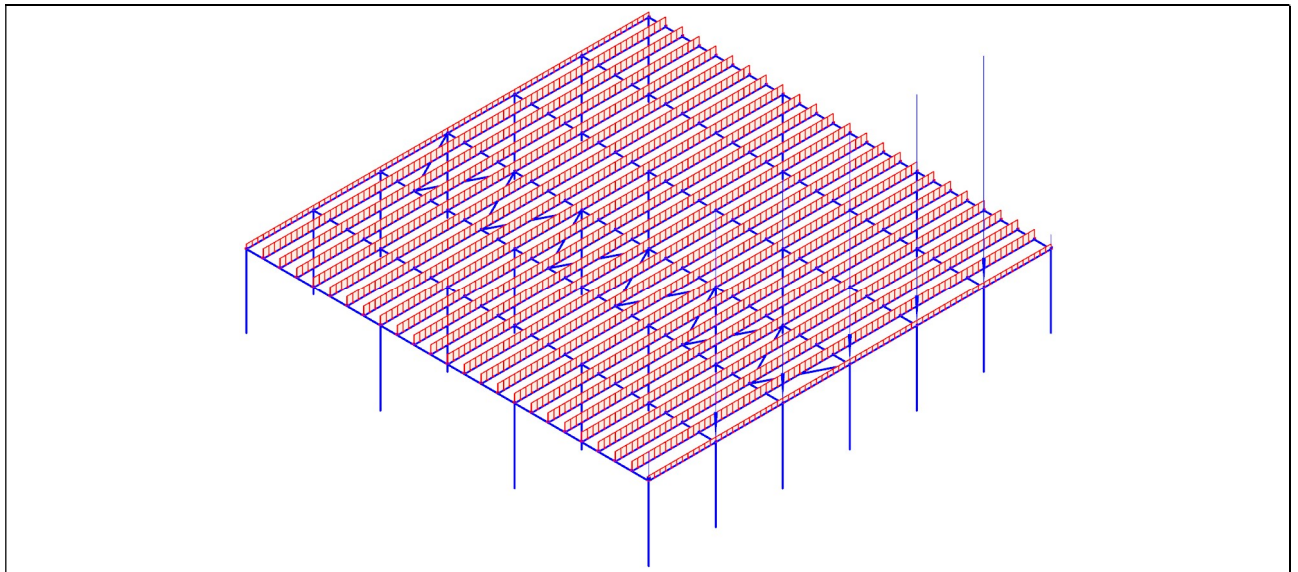


Figure 6-4 : Excentrement des charges verticales ramenées sur les éléments porteurs

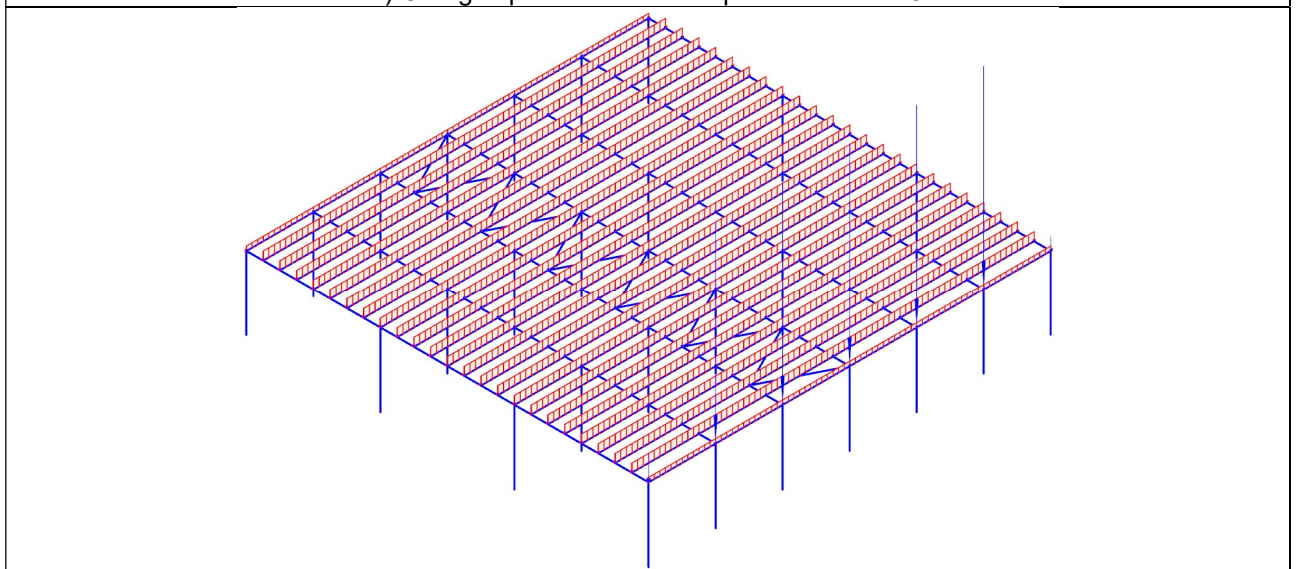
6.2.2. Cas de charge

Les figures suivantes présentent les différents cas de charges pris en compte dans les modèles thermomécaniques.

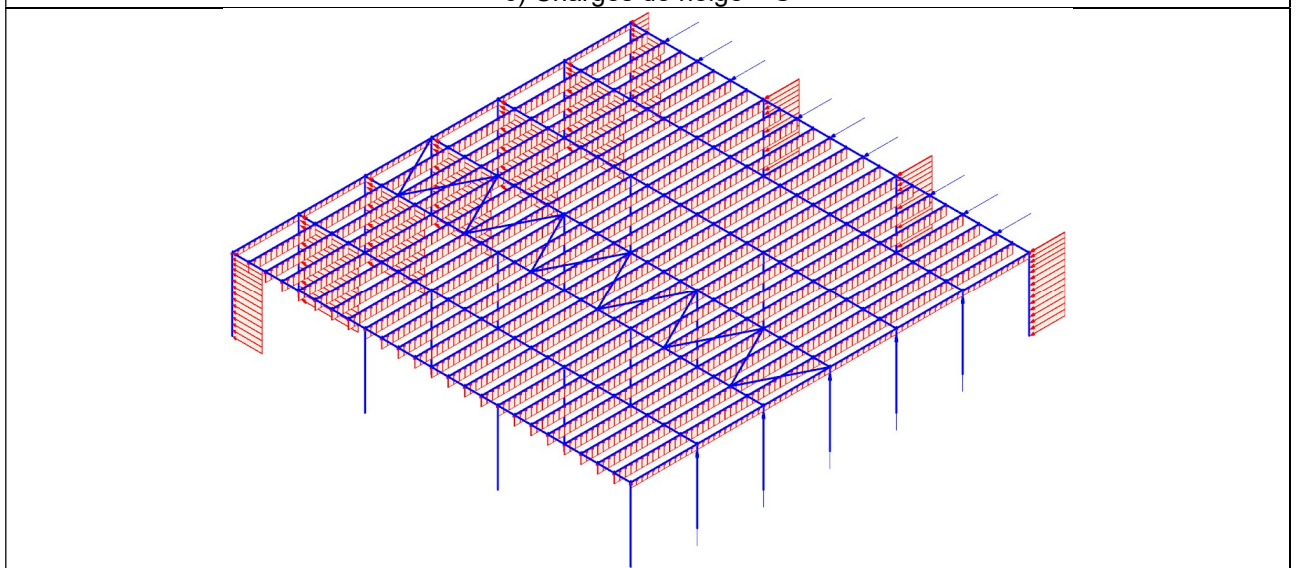




b) Charges permanentes complémentaires – G



c) Charges de neige – S



d) Charges de vent – W_T

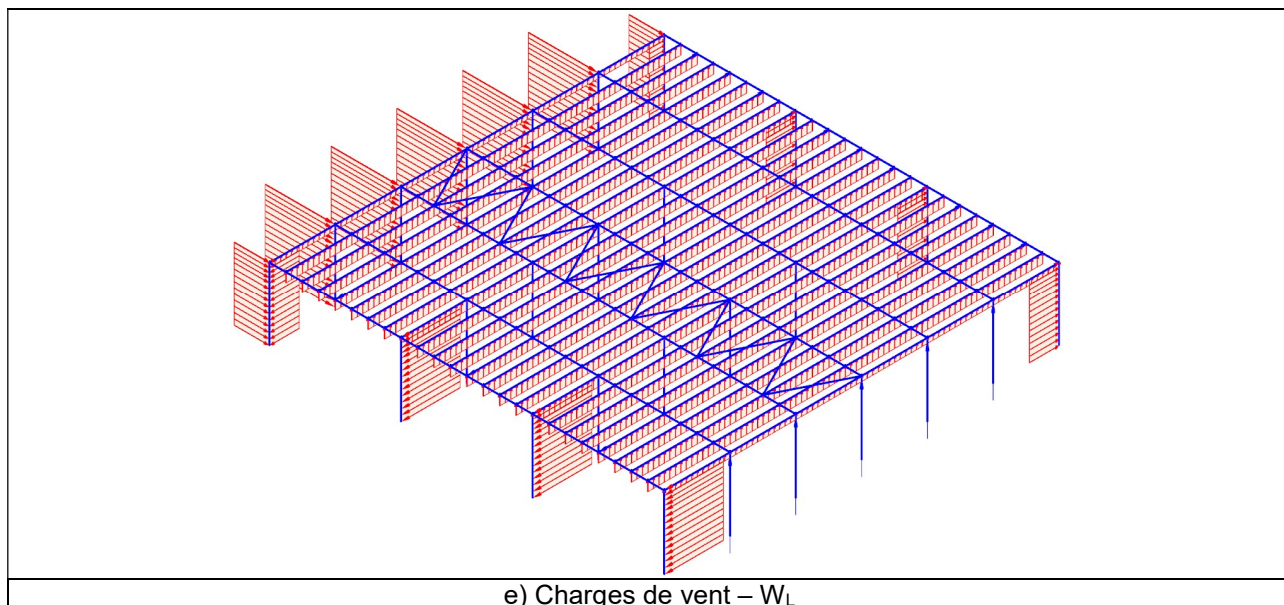


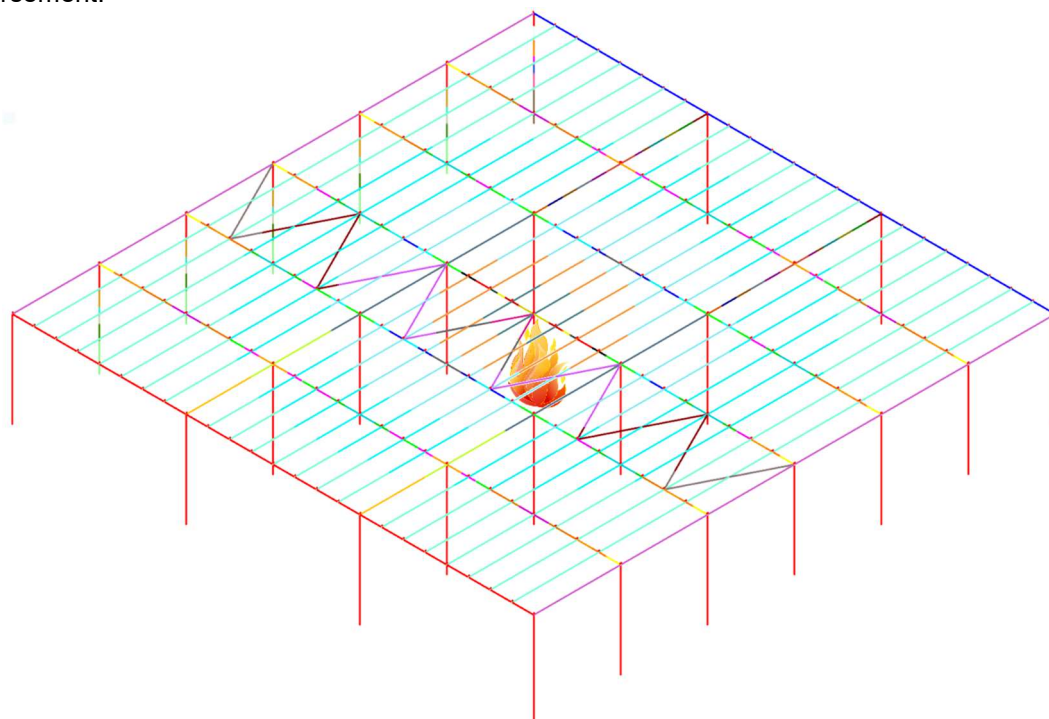
Figure 6-5 : Cas de charge pris en compte

6.2.3. Cas d'étude – positions du foyer

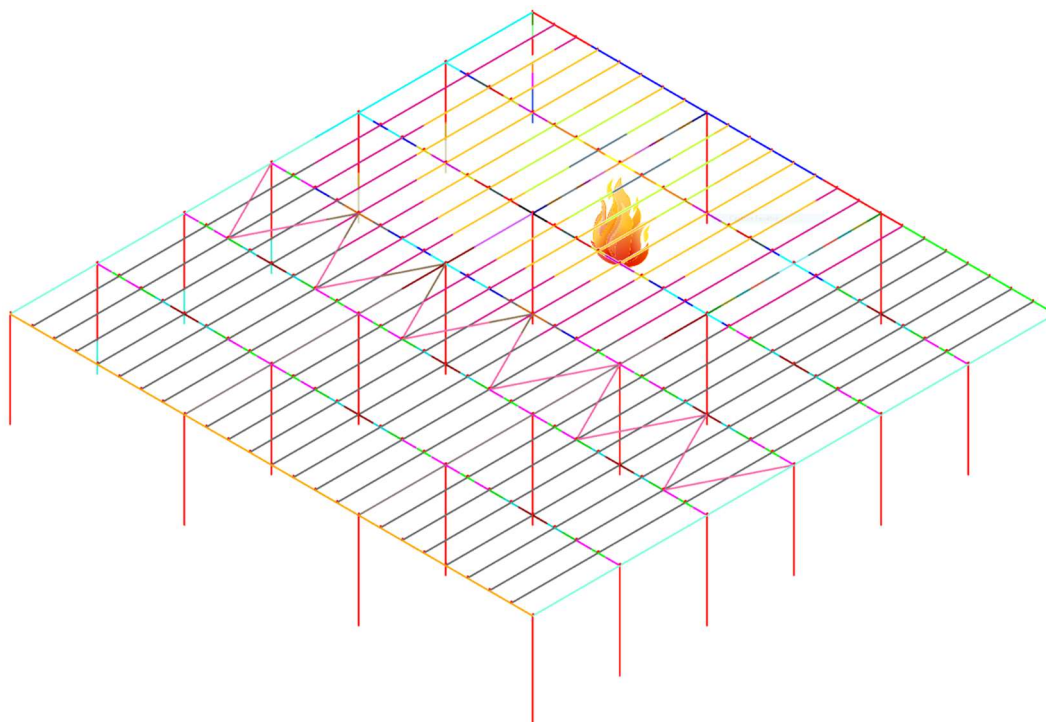
Deux positions du foyer seront prises en compte (voir Figure 6-6). Compte tenu de leur position, les actions thermiques issues du scénario 1 seront utilisées :

- Un foyer situé en partie courante
- Un foyer situé au niveau des traverses de la zone quai.

Ces deux cas de figure seront traités en maximisant la tenue au feu des pannes, soit sans prise en compte de leur déversement.



a) Cas 1 – Foyer au centre



b) Cas 2 – Foyer au droit d'une traverse de quai
Figure 6-6 : Position des foyers envisagés

Comme mentionné avec la commission technique de la SNBL lors de la présentation des résultats intermédiaires, afin de limiter les temps de calculs, cette seconde position de foyer ne sera pas étudiée complètement selon le modèle 3D. En effet, ce modèle a pour but de voir le comportement thermomécanique de la zone au droit de la traverse au niveau des quais qui constitue un point singulier de la configuration traitée.

Cette position de feu conduit à s'éloigner de la poutre au vent et donc de garantir sa stabilité un peu plus longtemps que dans le cas 1. Cette situation est donc moins défavorable vis-à-vis des phénomènes de déplacement hors-plan des poutres et des ramasse-pannes comme mentionné au paragraphe 6.2.5.

Ainsi, les calculs du cas 2 seront menés jusqu'à ruine de l'intégralité des pannes dans la zone matérialisée en rouge à la figure suivante. Les phénomènes pouvant survenir au niveau des pannes situées en dehors de cette zone pouvant ayant déjà pu être observés au niveau des zones éloignées de la position du départ de feu du cas 1.

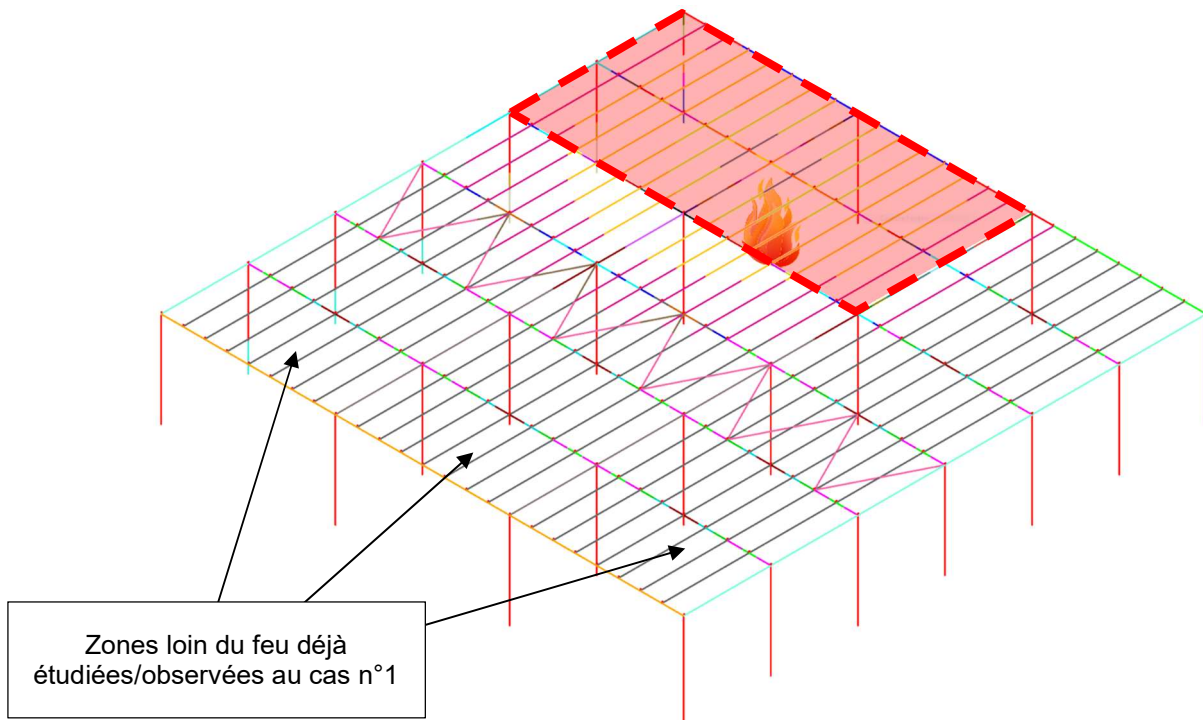


Figure 6-7 : Zone d'étude du cas 2

6.2.4. Procédure de calcul itératif pour la mise à jour des propriétés de torsion des éléments bois

Une procédure de calcul itérative a été mise en place dans le but d'obtenir une chronologie de la ruine de la charpente de l'entrepôt plus fine que ce qui est classiquement dans les études de mode de ruine dont l'approche utilisée est en générale majorante dans la mesure où elle permet de démontrer l'atteinte des objectifs. Par conséquent cette procédure devra tenir compte des points suivants pour aboutir à une chronologie de ruine la plus fine possible :

- Le cas échéant perte de la rigidité en torsion pour tenir compte du déversement possible des éléments (poutres principales et traverses) à l'instant t supposé de la ruine ;
- Excentrement des charges apportées par les pannes, engendrant dans certains cas des moments de torsion additionnels ;
- Itérations successives pour supprimer au fur et à mesure des ruines les éléments et les charges qu'ils apportent.

Ainsi, la procédure de calcul suivante a été mise en place et prend alors la forme du logigramme suivant.

Il est à noter que le **critère de convergence**⁽¹⁾ mentionné dans le logigramme suivant a été fixé à 30 secondes dans les calculs thermomécaniques réalisés.

1

¹ Le logiciel SAFIR ne tient pas compte de la perte temporelle de rigidité en torsion des éléments en fonction du champ de température dans la section. Ce paramètre doit être mis à jour et intégré par l'utilisateur au début de chaque calcul. Ainsi la première itération est réalisée en considérant l'inertie en torsion à froid des poutres. A la seconde itération cette inertie est réactualisée en fonction du temps de ruine obtenue à l'itération précédente et du champ de température dans les poutres à cet instant. Les itérations sont répétées jusqu'à ce que le temps de ruine obtenue corresponde au temps du champ de température pris en compte pour calculer l'inertie de torsion +/- 30 secondes. Ainsi, la précision de la rigidité en torsion des éléments de poutres est de 30 secondes d'exposition au feu au maximum.

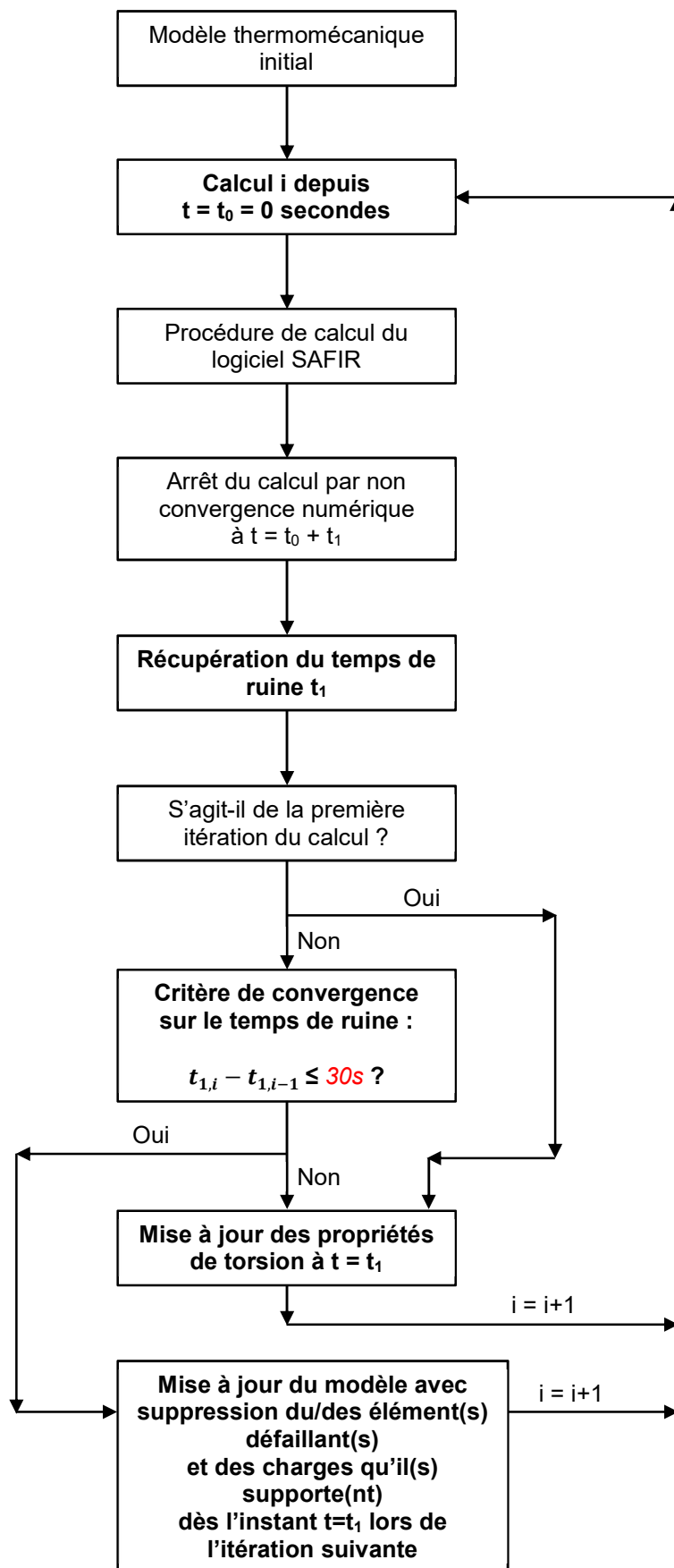


Figure 6-8 : Procédure de calcul itératif

6.2.5. Commentaire sur la non modélisation des potelets béton en façade

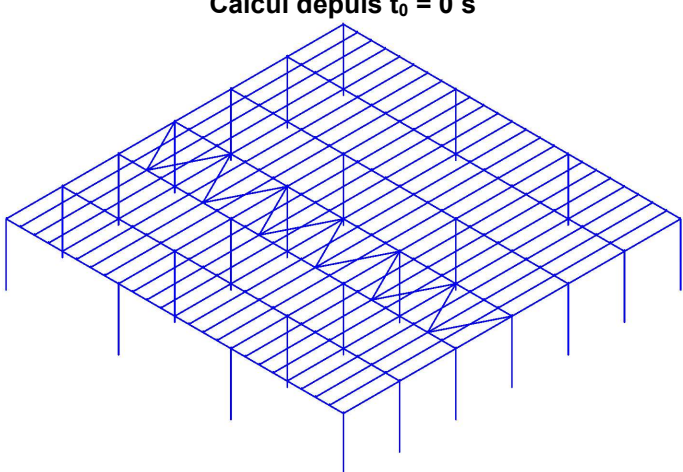
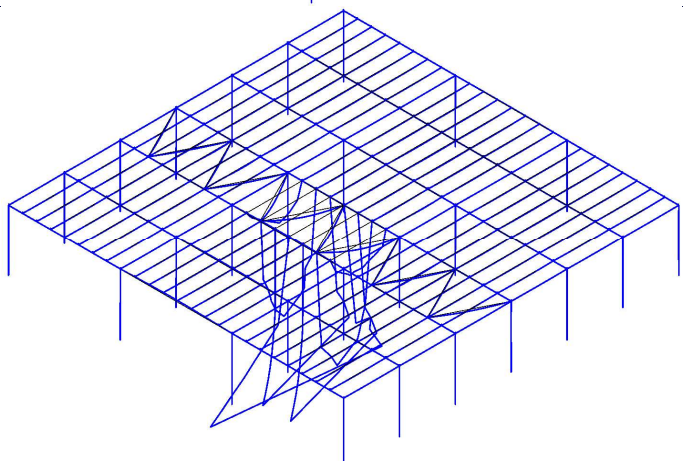
Les calculs ont été réalisés sans prise en compte des potelets béton au niveau des façades qui sont des éléments encastrés en pied. Cette hypothèse a montré que dans les combinaisons impliquant des charges de vent au niveau des longs pans, après ruine de la poutre au vent, des déplacements hors-plan importants au niveau des poutres principales étaient observés, non représentatifs de la réalité et très défavorables par rapport à l'objectif de démonstration de la présente étude chronologique (ne garder que les poutres principales après des temps importants).

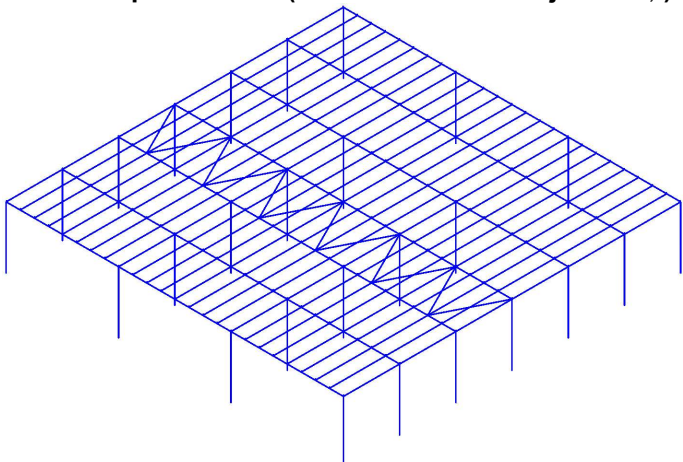
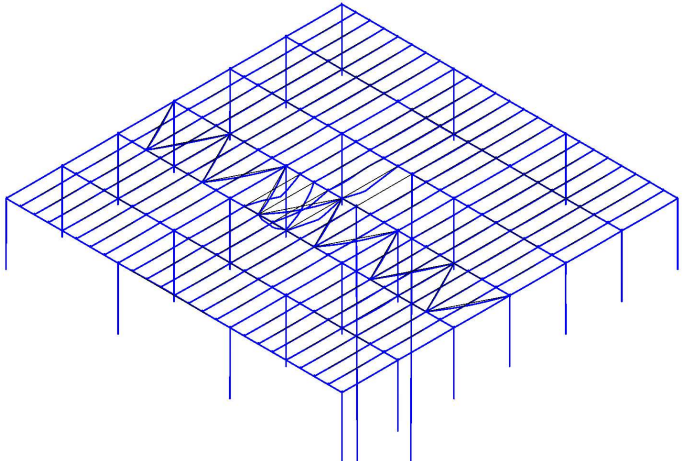
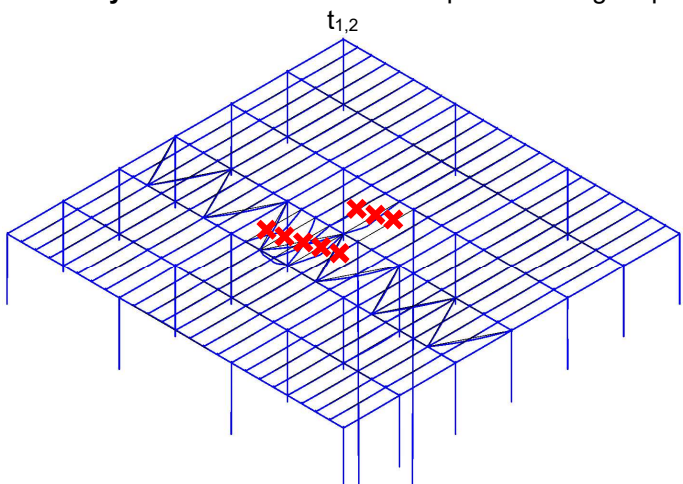
Des calculs complémentaires ont été réalisés dans le but de vérifier que la prise en compte des potelets béton à la place des appuis ponctuels conférés par ceux-ci dans le modèle 3D développé, limitait grandement ces déplacements hors-plan en cas de perte de la poutre au vent de manière prématurée (perte des pannes au-dessus de certaines diagonales de la poutre au vent).

Ainsi, une certaine raideur en translation hors-plan de la façade a été conservée dans les modèles de calcul (limitation de déplacement axe faible des ramasse-pannes à L/80 environ). Cette raideur n'intervenant que jusqu'au moment de la ruine des ramasse-pannes (une fois ceux-ci ruinés, l'effort de vent n'est plus transmis jusqu'aux poutres car les pannes ruinent également).

6.2.6. Illustration du déroulement de la méthode

Afin de clarifier la méthodologie employée dans la présente étude (et dont la Figure 6-8 fait la synthèse), les premières itérations sont illustrées aux figures suivantes.

| Étape | Description | Illustration | Valeurs récupérées importantes |
|-------|---|---|--------------------------------------|
| 1.1 | | <p>Calcul depuis $t_0 = 0$ s</p>  | |
| 1.2 | <p>Ruine des premières pannes à $t = t_1 = 1600$ s</p> |  | <p>$t_{1,1} = 1600$ s</p> |
| 1.3 | <p>Il s'agit de la première itération du calcul, il est donc possible de passer à l'étape suivante concernant la mise à jour des propriétés de torsion</p> | | |

| | | | |
|-----|---|--|-----------------------------|
| 1.5 | Mise à jour des propriétés de torsion à $t = t_{1,1} = 1600$ s - Calcul de la section réduite à $t = t_{1,1}$ - Calcul de la torsion de tous les éléments bois (sauf pour les pannes) à $t = t_{1,1}$ | | |
| 2.1 | Calcul depuis $t_0 = 0$ s (avec torsion mise à jour à $t_{1,1}$)  | | |
| 2.2 | Ruine des premières pannes à $t = t_{1,2} = 1605$ s |  | $t_{1,2} = 1605$ s |
| 2.3 | Il ne s'agit pas de la première itération du calcul donc il faut s'assurer que le critère de convergence torsion/ruine est validé | | |
| 2.4 | Vérification du critère de convergence sur le temps de ruine et les propriétés de torsion | $t_{1,1} = 1600$ s $t_{1,2} = 1605$ s $ t_{1,2} - t_{1,1} = 1605 - 1600 = 5$ s < 30 s → Critère de convergence validé | $ t_{1,2} - t_{1,1} = 5$ s |
| 2.6 | Suppression des éléments ayant ruiné du modèle ainsi que des charges qu'ils transfèrent pour $t > t_{1,2}$  | | |

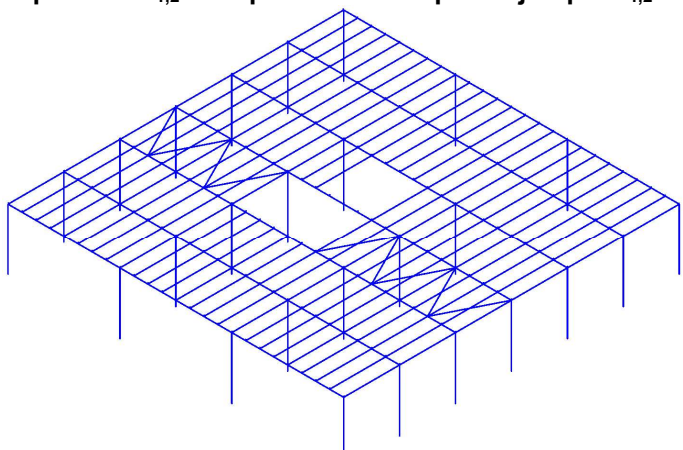
| | |
|------------|---|
| <p>3.1</p> | <p>Calcul depuis $t_0 = 0$ s, avec torsion mise à jour à $t_{1,1}$, suppression des éléments et charges à partir de $t_{1,2}$ et déplacements imposés jusqu'à $t_{1,2}$</p>  |
| <p>...</p> | <p>...</p> |
| <p>...</p> | <p>...</p> |

Figure 6-9 : Illustration de déroulement de la méthode de calculs

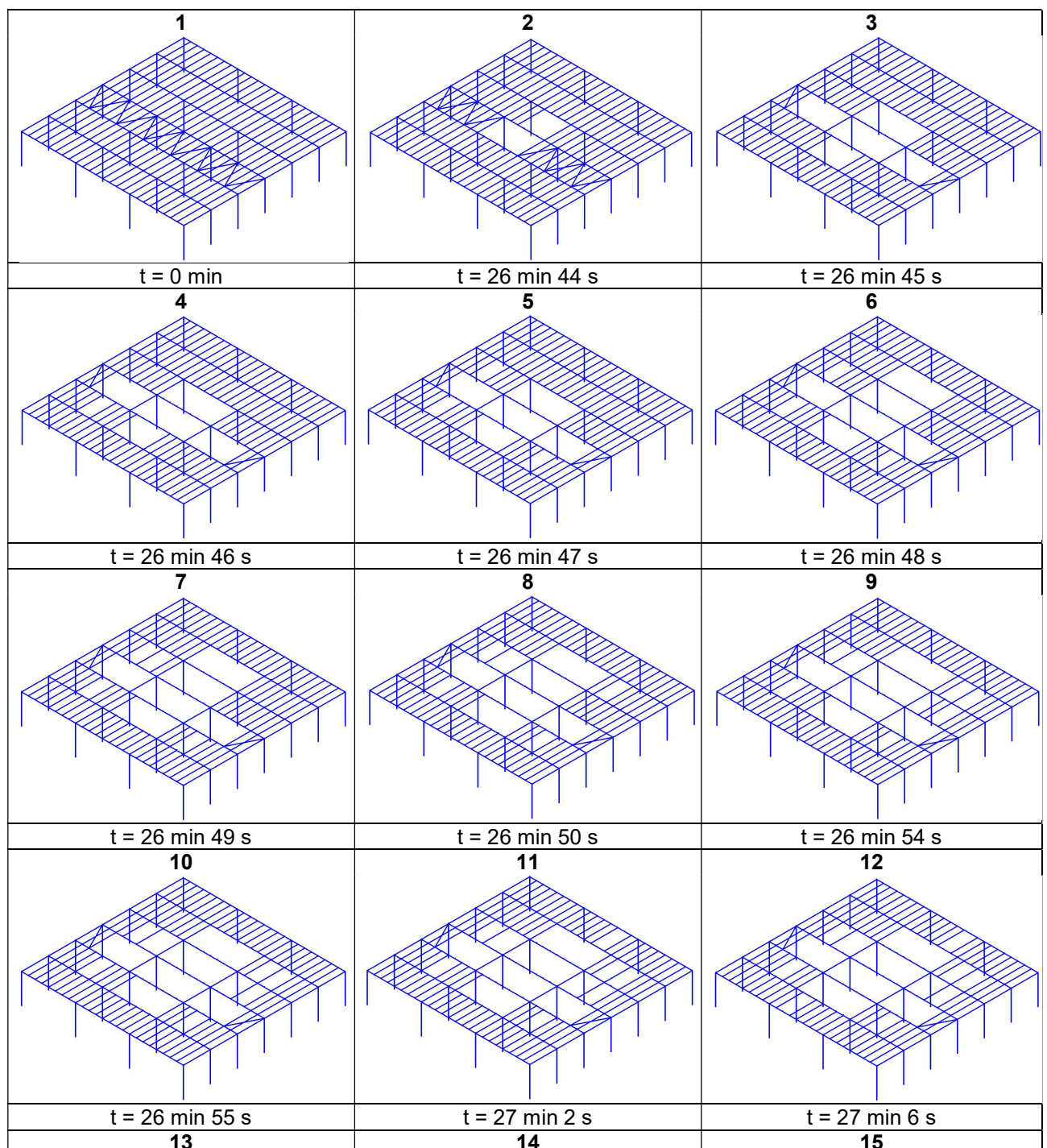
6.3. RESULTATS DES CALCULS THERMOMECHANIQUES ET CHRONOLOGIE DE RUINE

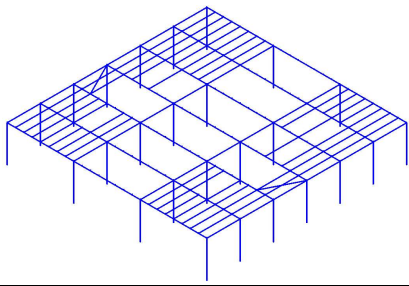
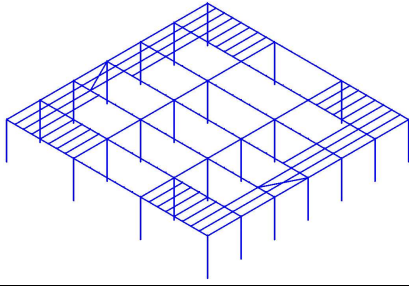
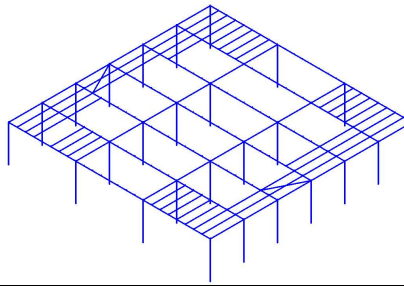
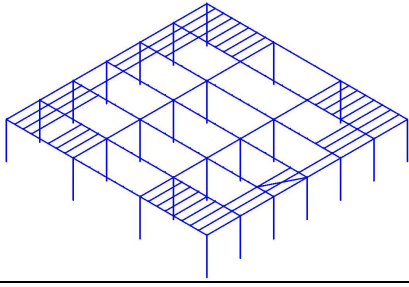
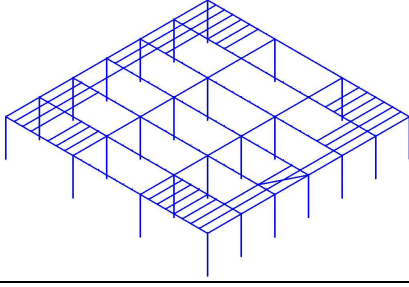
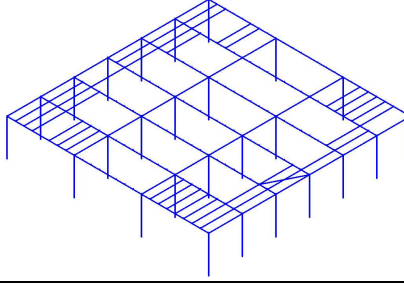
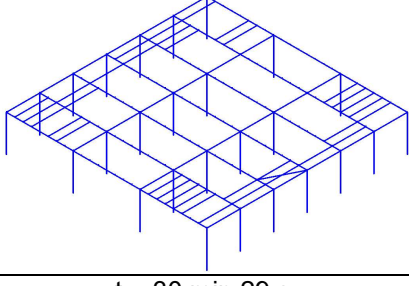
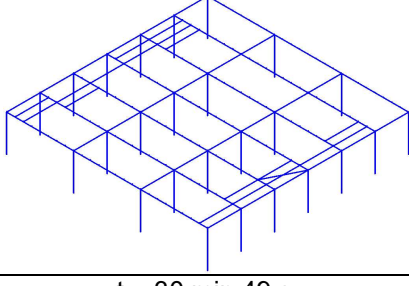
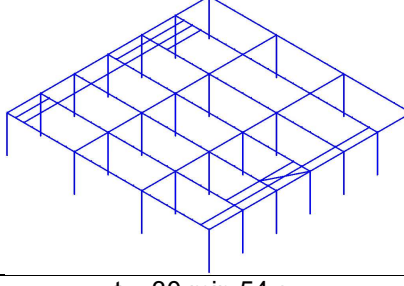
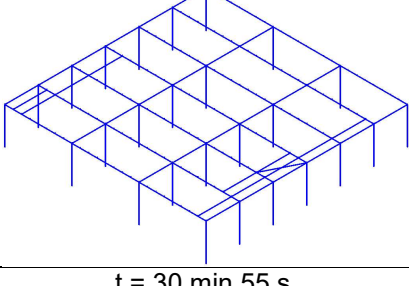
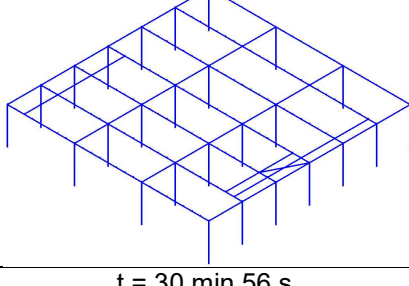
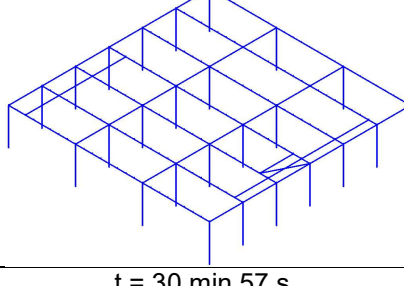
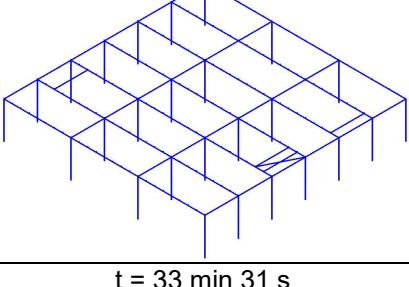
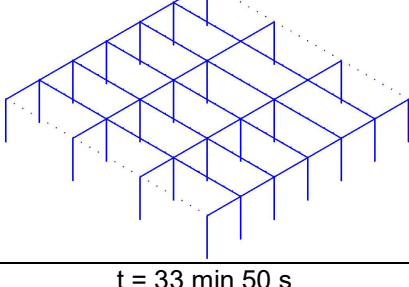
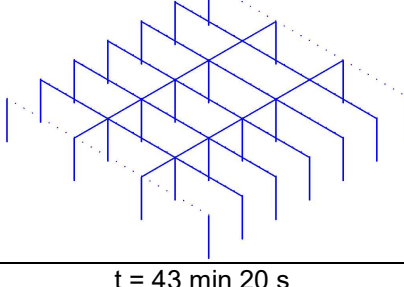
Les paragraphes suivant illustrent la chronologie de ruine des éléments bois en fonction des différentes positions de feu considérées et en fonction des différentes combinaisons de charges étudiées. La méthodologie de calcul employée est celle présentée au paragraphe 6.2.6. Ainsi, seuls les éléments supprimés sont présentés afin de ne pas alourdir la lecture du présent rapport.

6.3.1. Cas 1 : feu au centre au droit de la poutre au vent

6.3.1.1. G+0.2S

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.



| | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| t = 27 min 9 s 16 | t = 27 min 52 s 17 | t = 29 min 43 s 18 |
|  |  |  |
| t = 29 min 44 s 19 | t = 29 min 45 s 20 | t = 30 min 19 s 21 |
|  |  |  |
| t = 30 min 29 s 22 | t = 30 min 49 s 23 | t = 30 min 54 s 24 |
|  |  |  |
| t = 30 min 55 s 25 | t = 30 min 56 s 26 | t = 30 min 57 s 27 |
|  |  |  |
| t = 33 min 31 s | t = 33 min 50 s | t = 43 min 20 s |

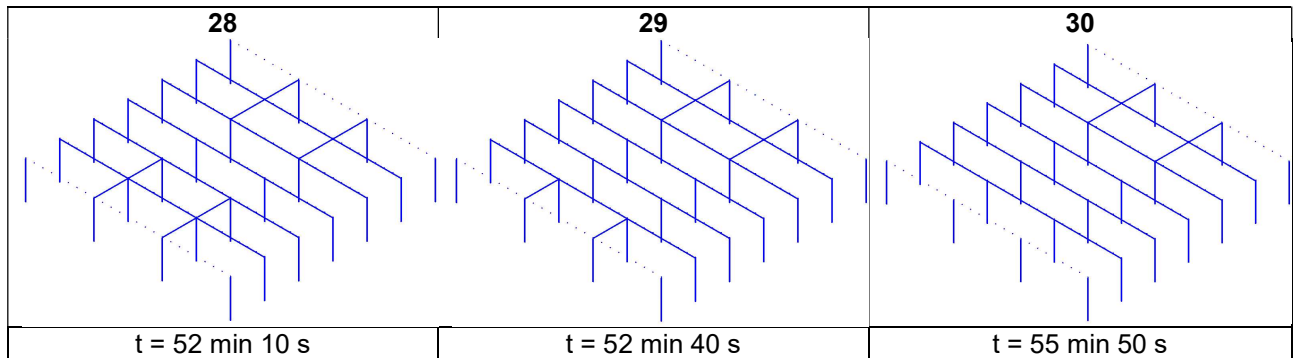


Figure 6-10 : Ruine des éléments - Sc1 - G+0.2S

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des premières pannes intervient après 26 minutes d'incendie (calculs de la durée de stabilité des pannes sans prise en compte du déversement) ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau au droit du foyer ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- les dernières pannes courantes ruinent après 33 minutes d'incendie ;
- après 55 minutes, seules les poutres principales, les traverses et les poteaux béton restent en place (éléments seulement sollicités par leur poids propre).
- la ruine suivante interviendra au niveau des traverses et des poutres les supportant après 1 h 30 min d'incendie.

La figure suivante donne l'évolution de la flèche d'une poutre principale (au droit du foyer et loin du foyer) et d'une des traverses au niveau de la zone de quais. Il est à noter qu'il s'agit du déplacement « absolue » à mi portée des poutres tenant compte de la dilatation des poteaux béton, ce qui explique les déplacements verticaux ascendants.

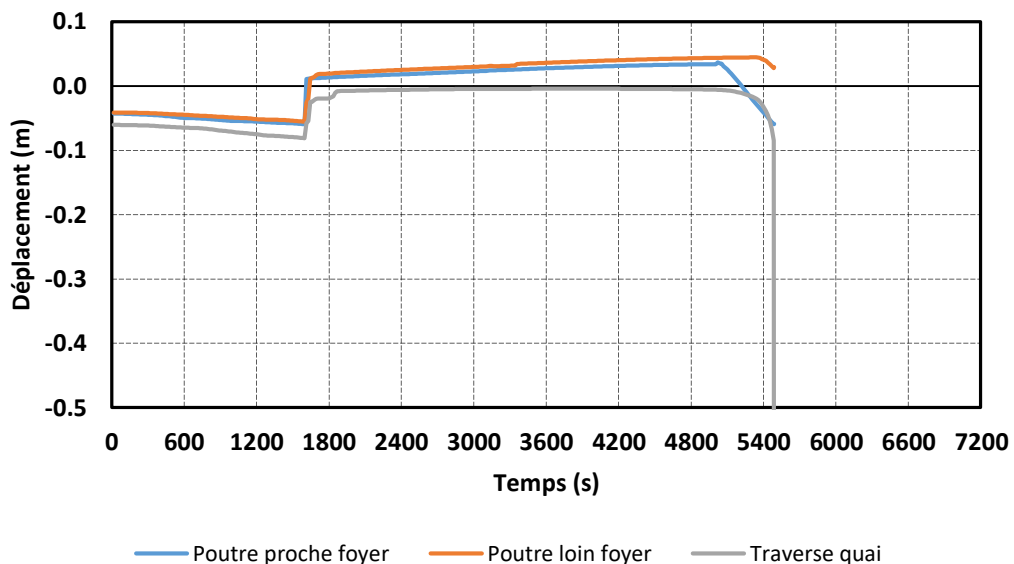


Figure 6-11 : Évolution des déplacements verticaux

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

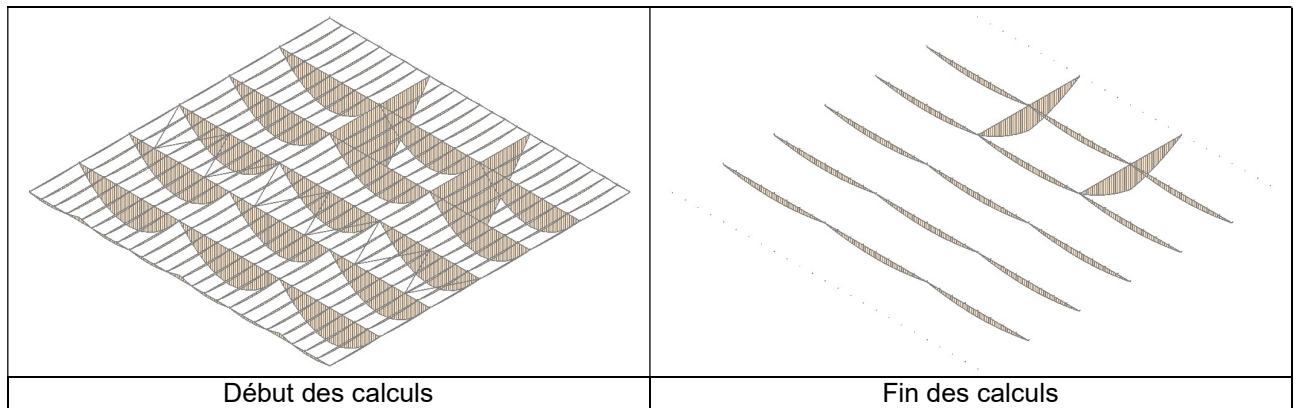
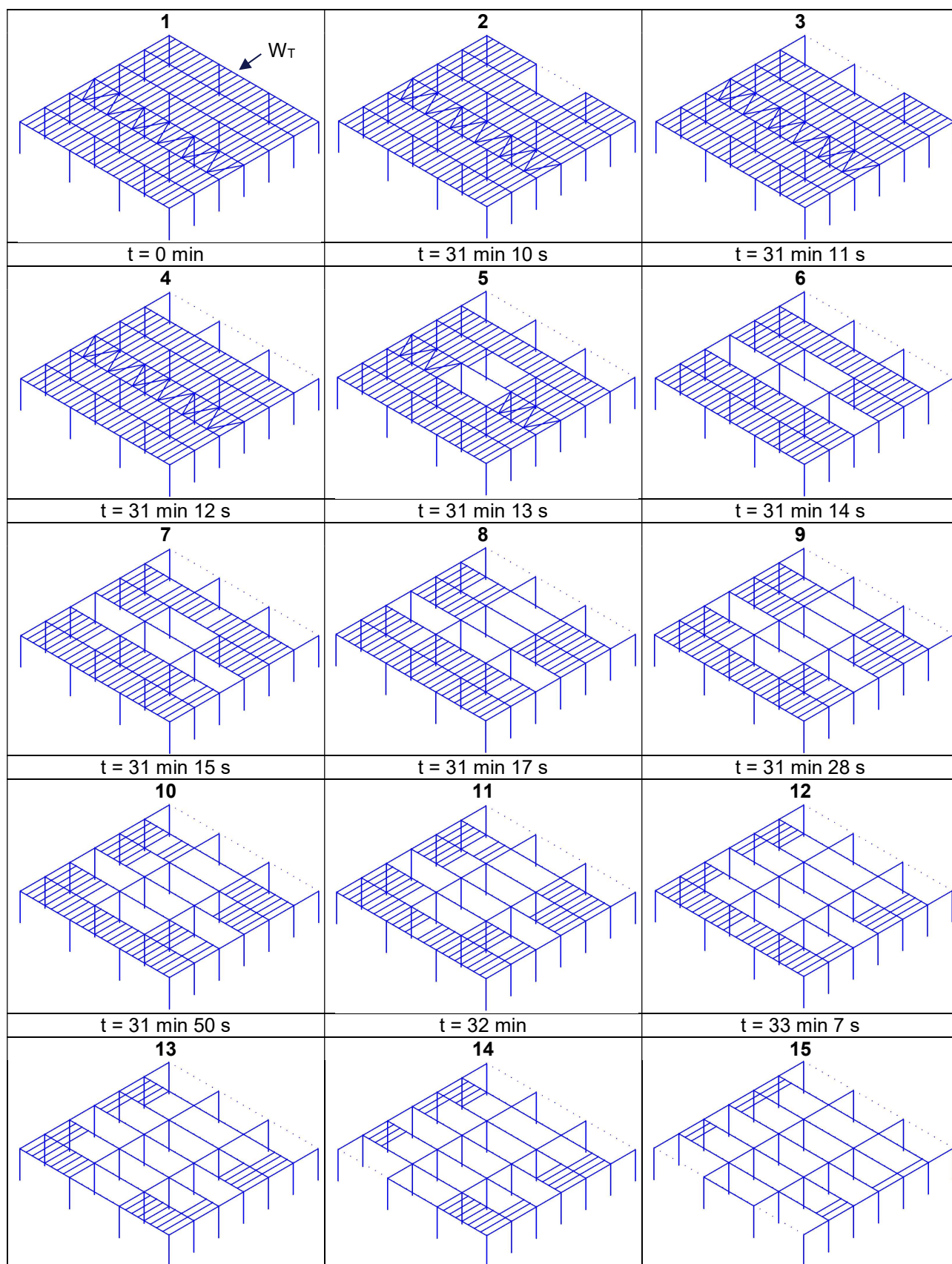


Figure 6-12 : Évolution des moments

6.3.1.2. G+0.2WT

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.



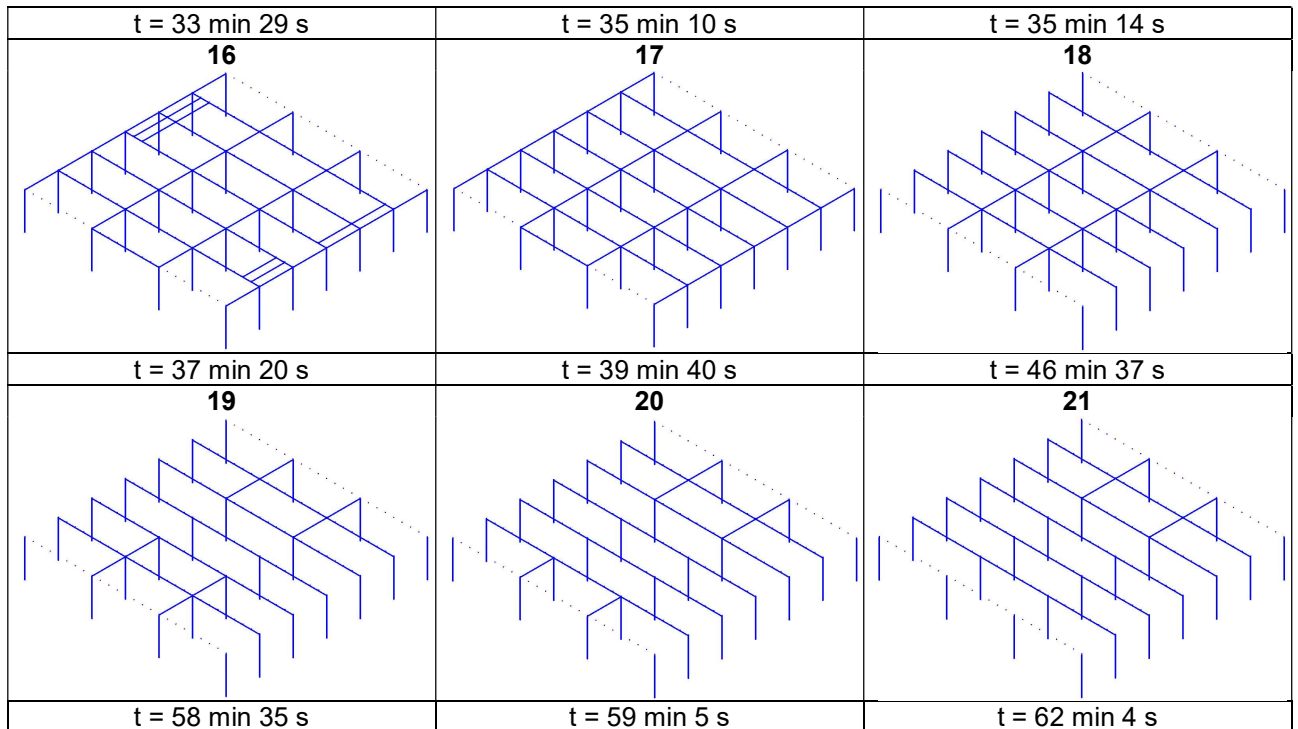


Figure 6-13 : Ruine des éléments - Sc1 - G+0.2WT

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des premières pannes intervient après 31 minutes d'incendie ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau des long-pans et au droit du foyer ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- les dernières pannes courantes ruinent après 37 minutes d'incendie ;
- après 62 minutes, seules les poutres principales, les traverses et les poteaux béton restent en place (éléments seulement sollicités par leur poids propre).
- la ruine suivante interviendra au niveau des traverses et des poutres les supportant après 1 h 30 min d'incendie.

La figure suivante donne l'évolution de la flèche d'une poutre principale (au droit du foyer et loin du foyer) et d'une des traverses au niveau de la zone de quais.

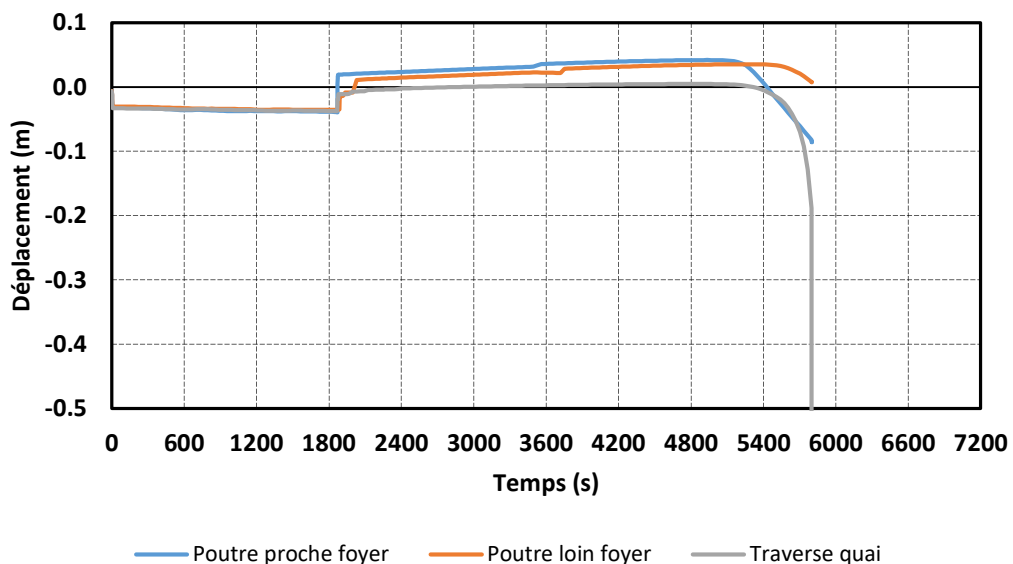


Figure 6-14 : Évolution des déplacements verticaux

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

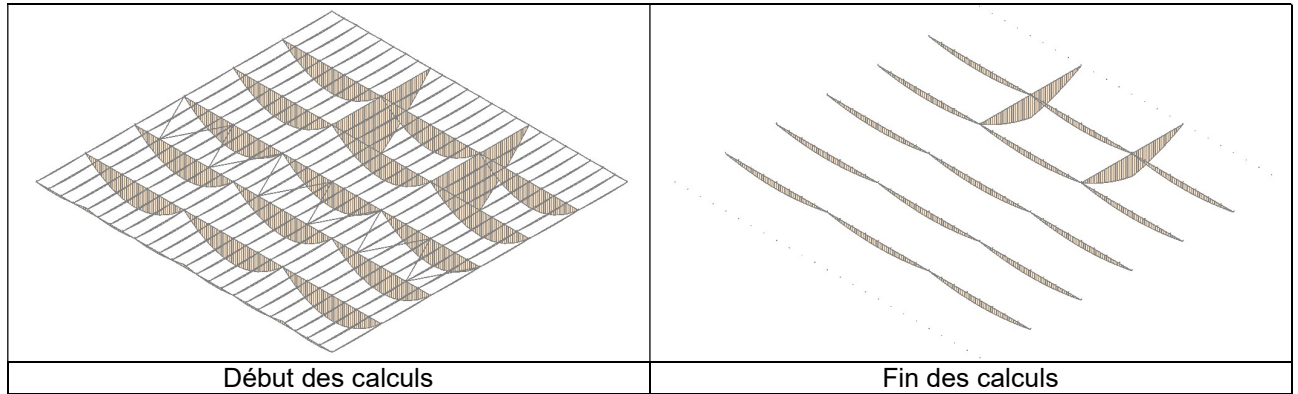
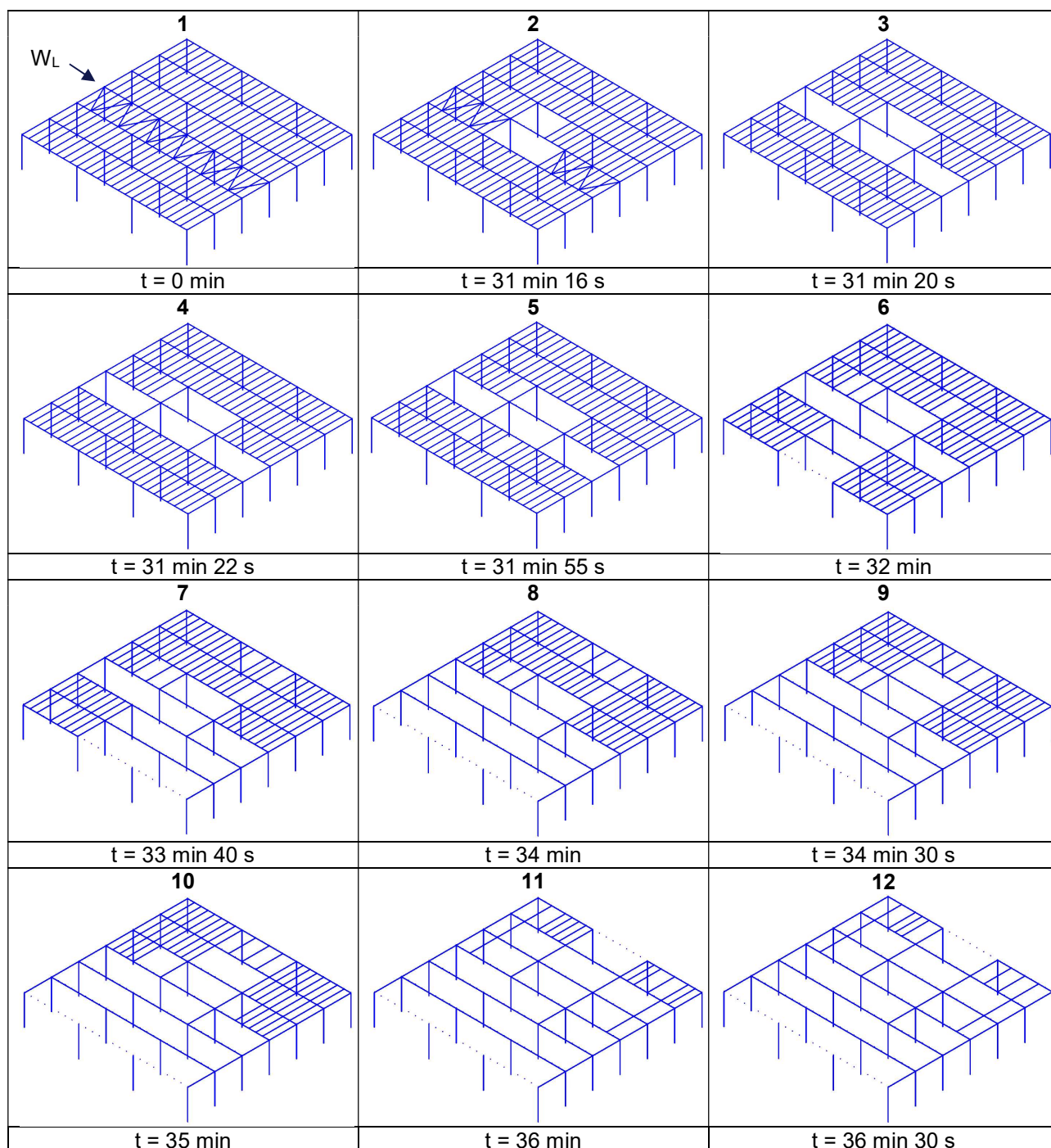


Figure 6-15 : Évolution des moments

6.3.1.3. G+0.2WL

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.



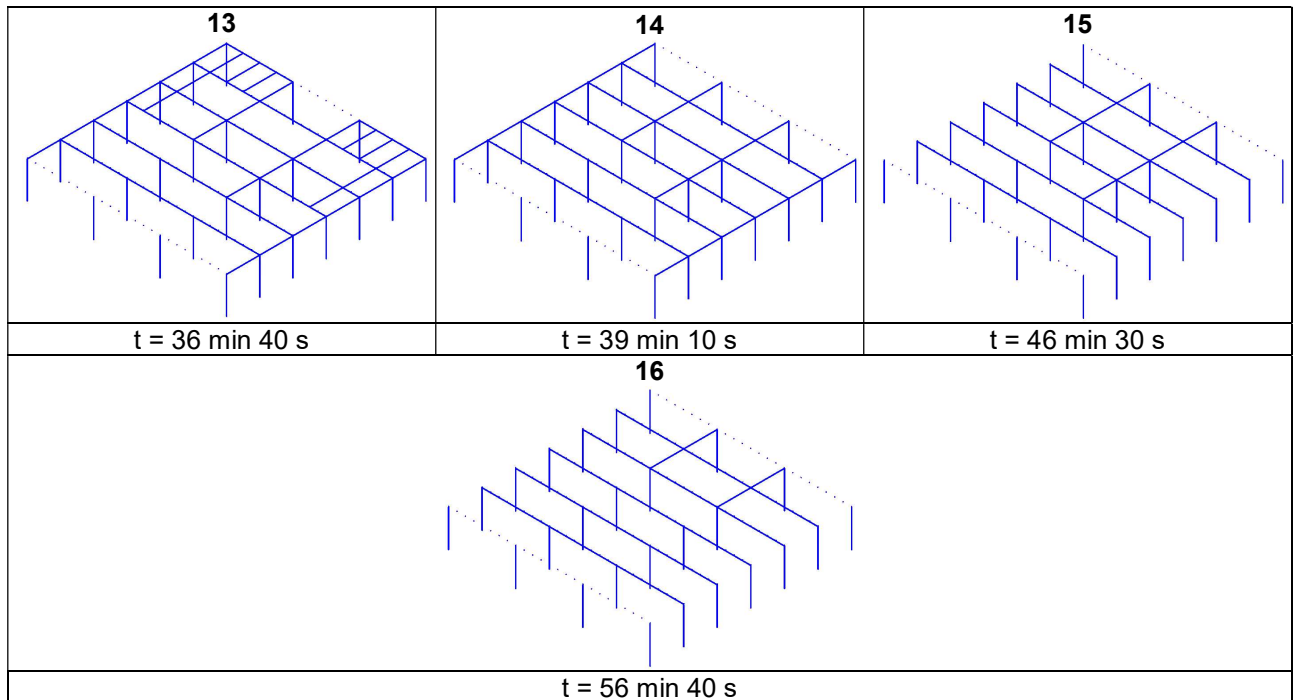


Figure 6-16 : Ruine des éléments - Sc1 - G+0.2WL

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des première pannes intervient après 26 minutes d'incendie ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau au droit du foyer ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- les dernières pannes courantes ruinent après 36 minutes d'incendie ;
- après 56 minutes, seules les poutres principales, les traverses et les poteaux béton restent en place (éléments seulement sollicités par leur poids propre) ;
- la ruine suivante interviendra au niveau des traverses et des poutres les supportant après plus de 1 h 30 min d'incendie.

La figure suivante donne l'évolution de la flèche d'une poutre principale (au droit du foyer et loin du foyer) et d'une des traverses au niveau de la zone de quais.

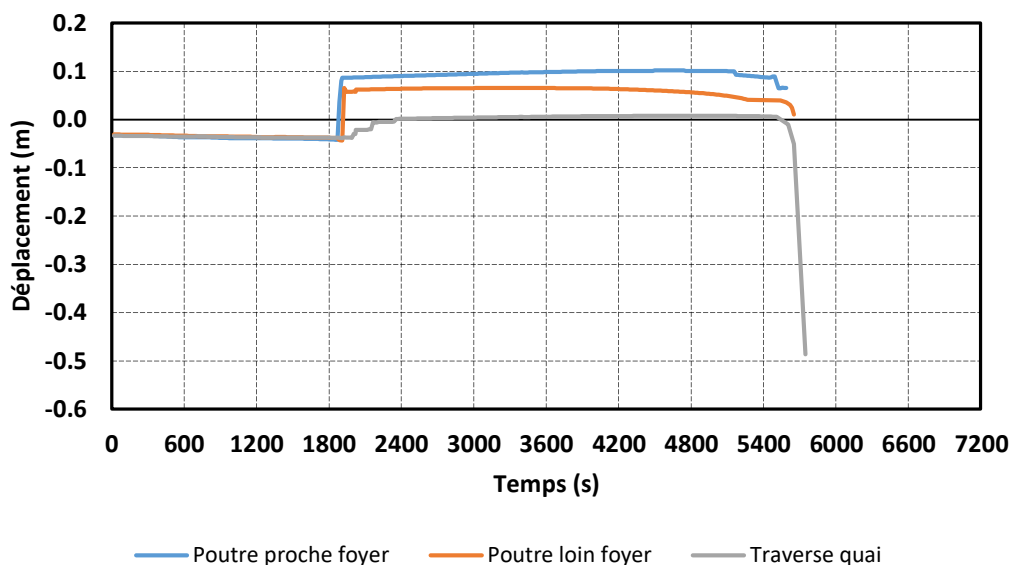


Figure 6-17 : Évolution des déplacements verticaux

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

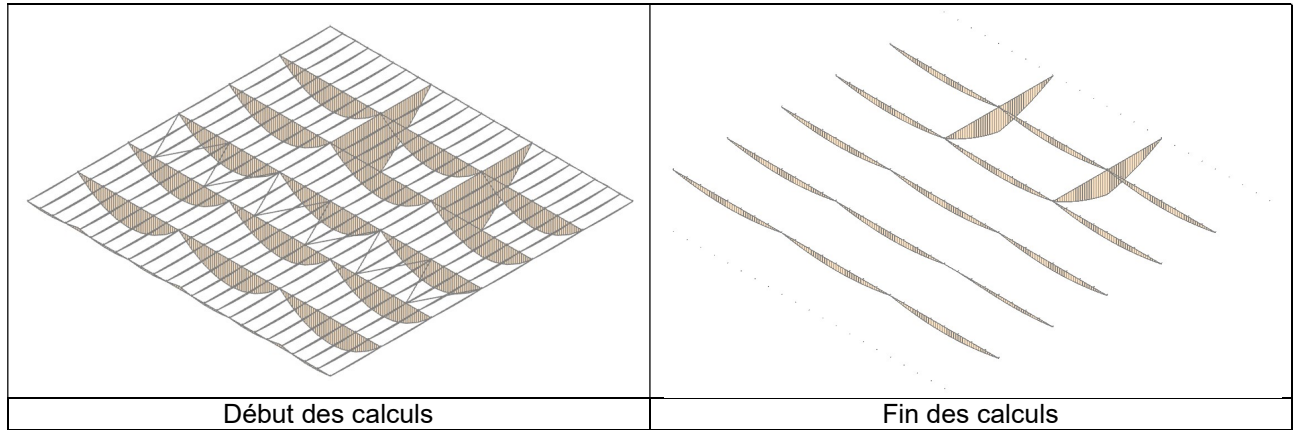


Figure 6-18 : Évolution des moments

6.3.2. Cas 2 : feu au droit d'une traverse de quai

6.3.2.1. G+0.2S

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.

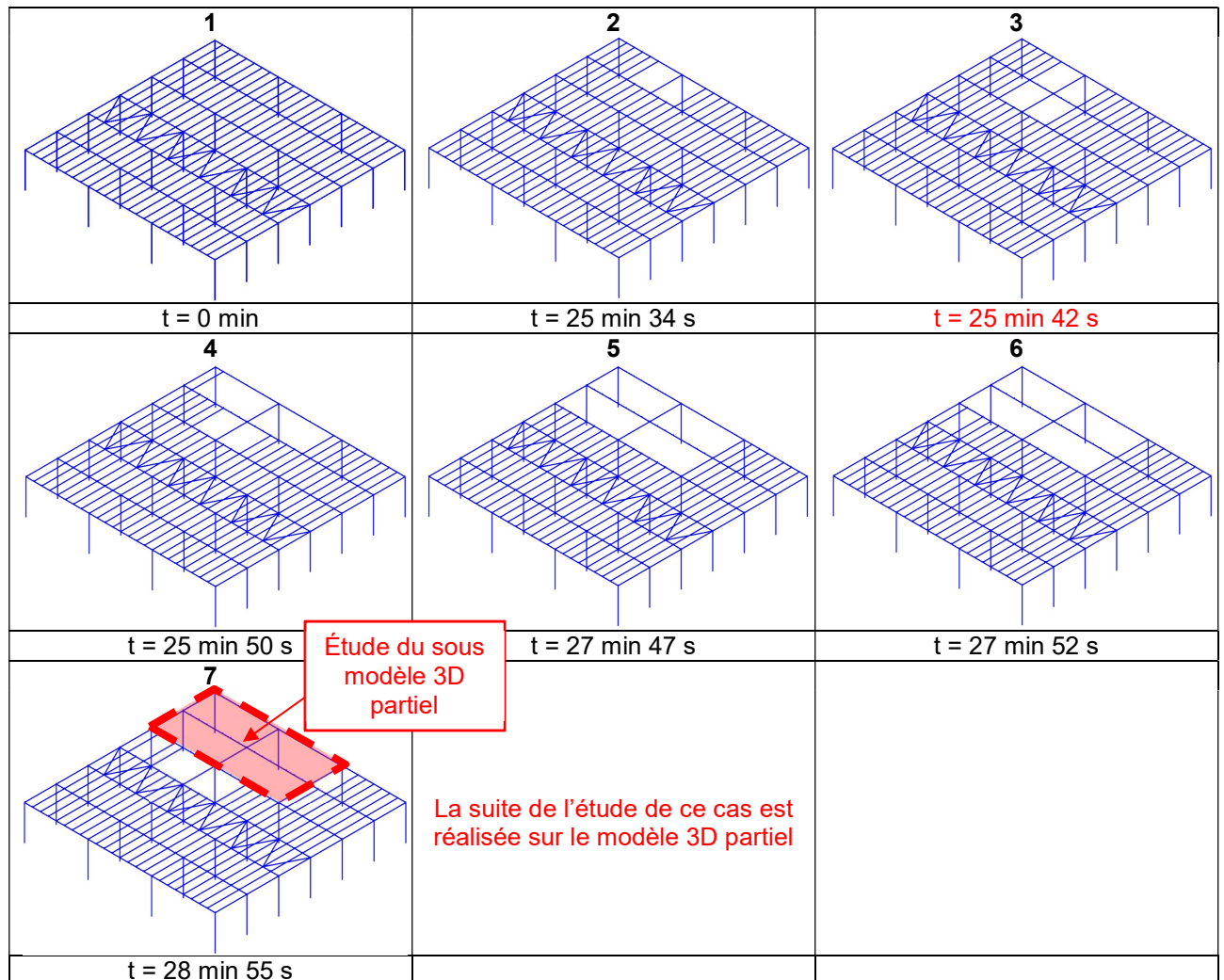


Figure 6-19 : Ruine des éléments – Sc2 - G+0.2S

Comme mentionné précédemment, les calculs ont été arrêtés à ce moment des itérations. La zone encore présente dans le modèle n'étant pas différente de celle déjà traitée au paragraphe 6.3.1.1.

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des premières pannes intervient après 25 minutes d'incendie ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau au droit du foyer ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- la ruine des traverses intervient avant celle observée pour l'autre position du foyer, après moins de 90 minutes d'incendie.

La figure suivante donne l'évolution de la flèche d'une poutre principale et de la traverse directement au droit du foyer, dans le cas du sous-modèle 3D partiel de la zone d'étude.

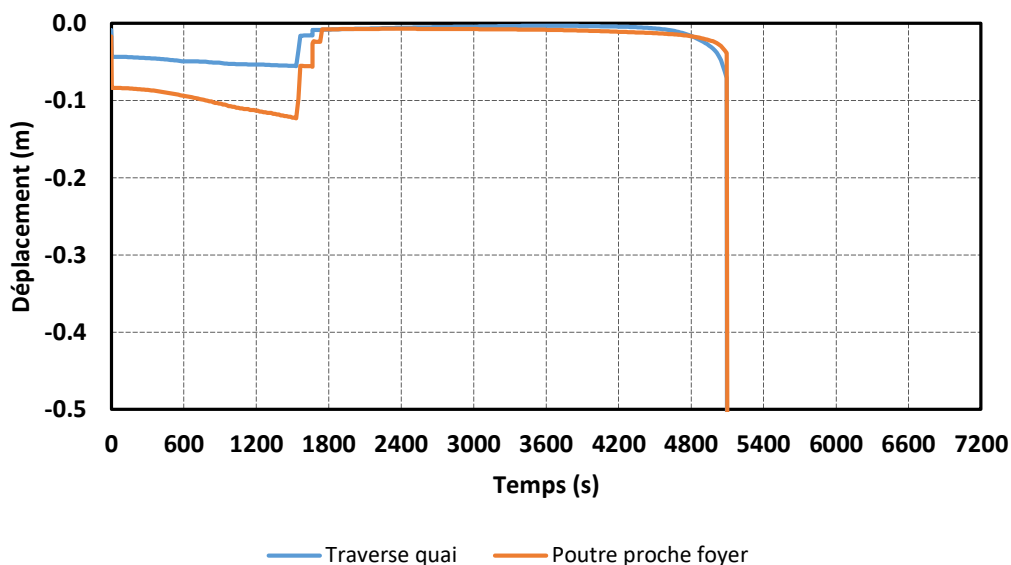


Figure 6-20 : Évolution des déplacements verticaux (modèle partiel)

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

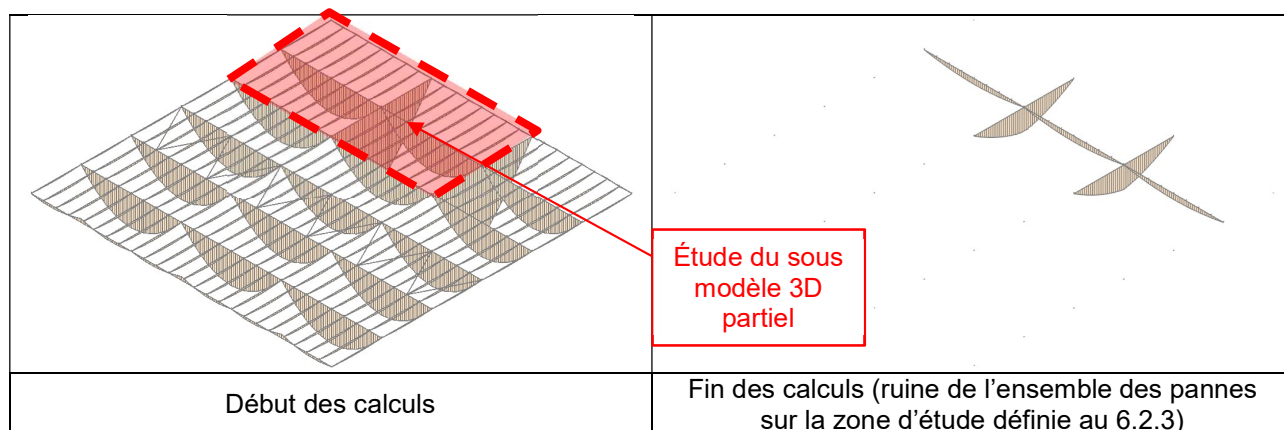


Figure 6-21 : Évolution des moments

6.3.2.2. G+0.2WT

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.

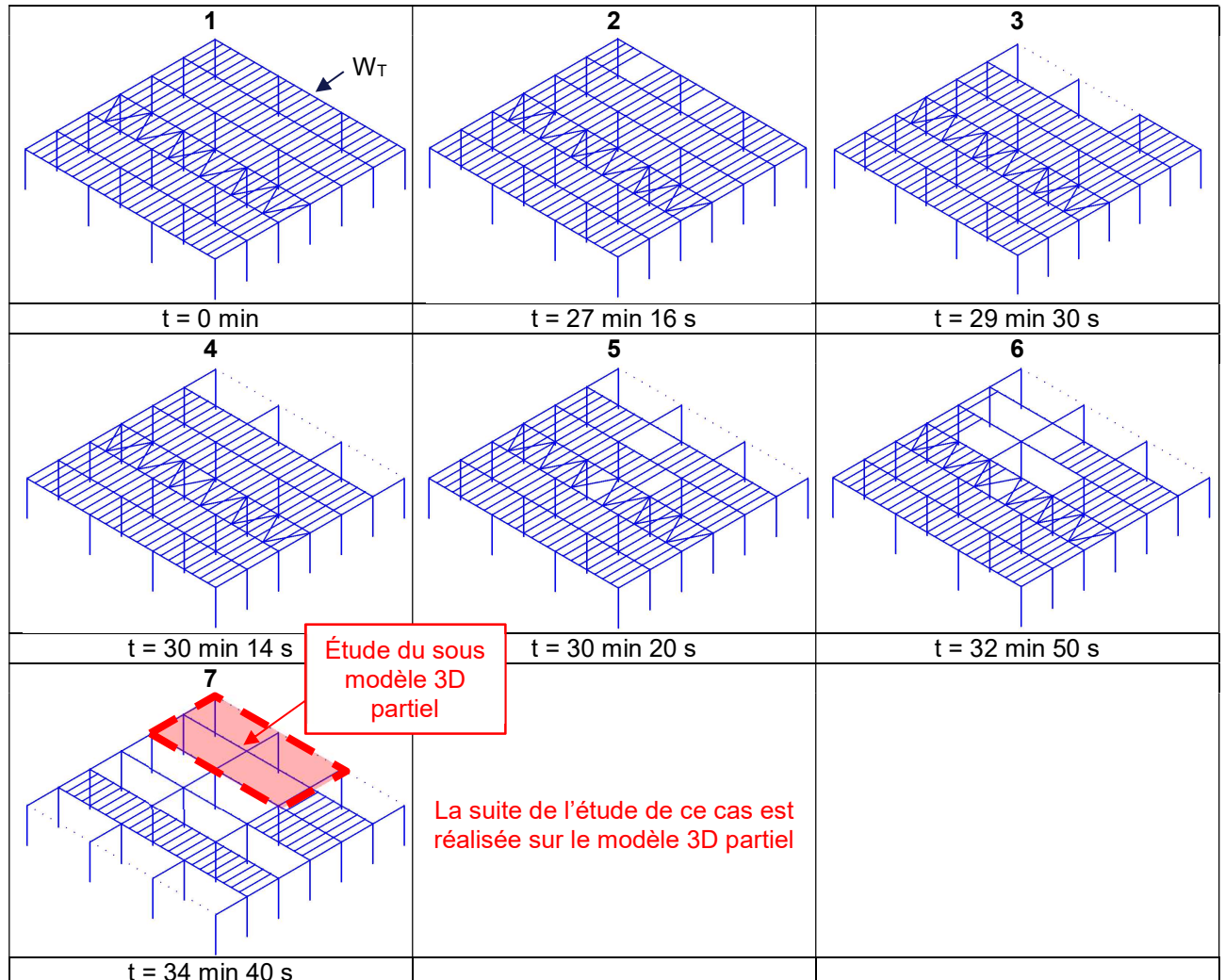


Figure 6-22 : Ruine des éléments – Sc2 - G+0.2WT

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des première pannes intervient après 27 minutes d'incendie ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau au droit du foyer au niveau des pannes en compression de par l'effort de vent transversal ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- la ruine des traverses intervient avant celle observée pour l'autre position du foyer, après environ de 90 minutes d'incendie.

La figure suivante donne l'évolution de la flèche d'une poutre principale et de la traverse directement au droit du foyer, dans le cas du sous-modèle 3D partiel de la zone d'étude.

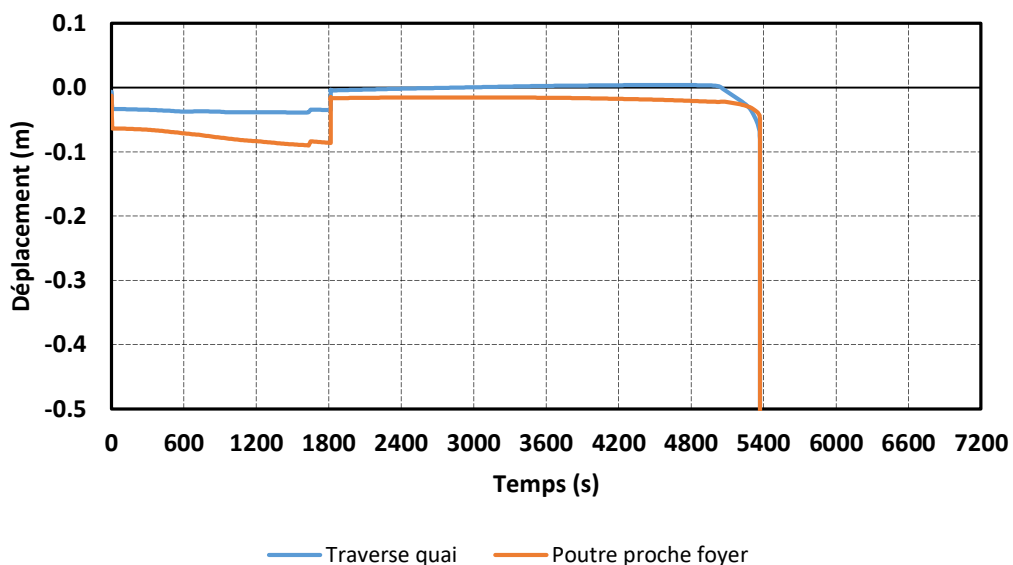


Figure 6-23 : Évolution des déplacements verticaux

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

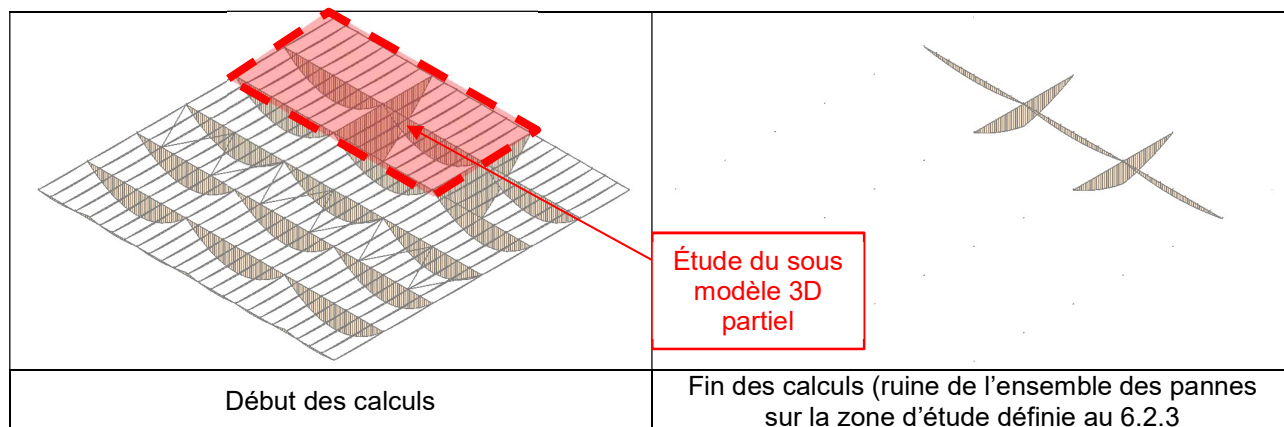


Figure 6-24 : Évolution des moments

6.3.2.3. G+0.2WL

Les figures suivantes présentent la ruine des éléments de manière chronologique et illustrent la suppression des éléments du modèle en fonction du temps de ruine de ces derniers.

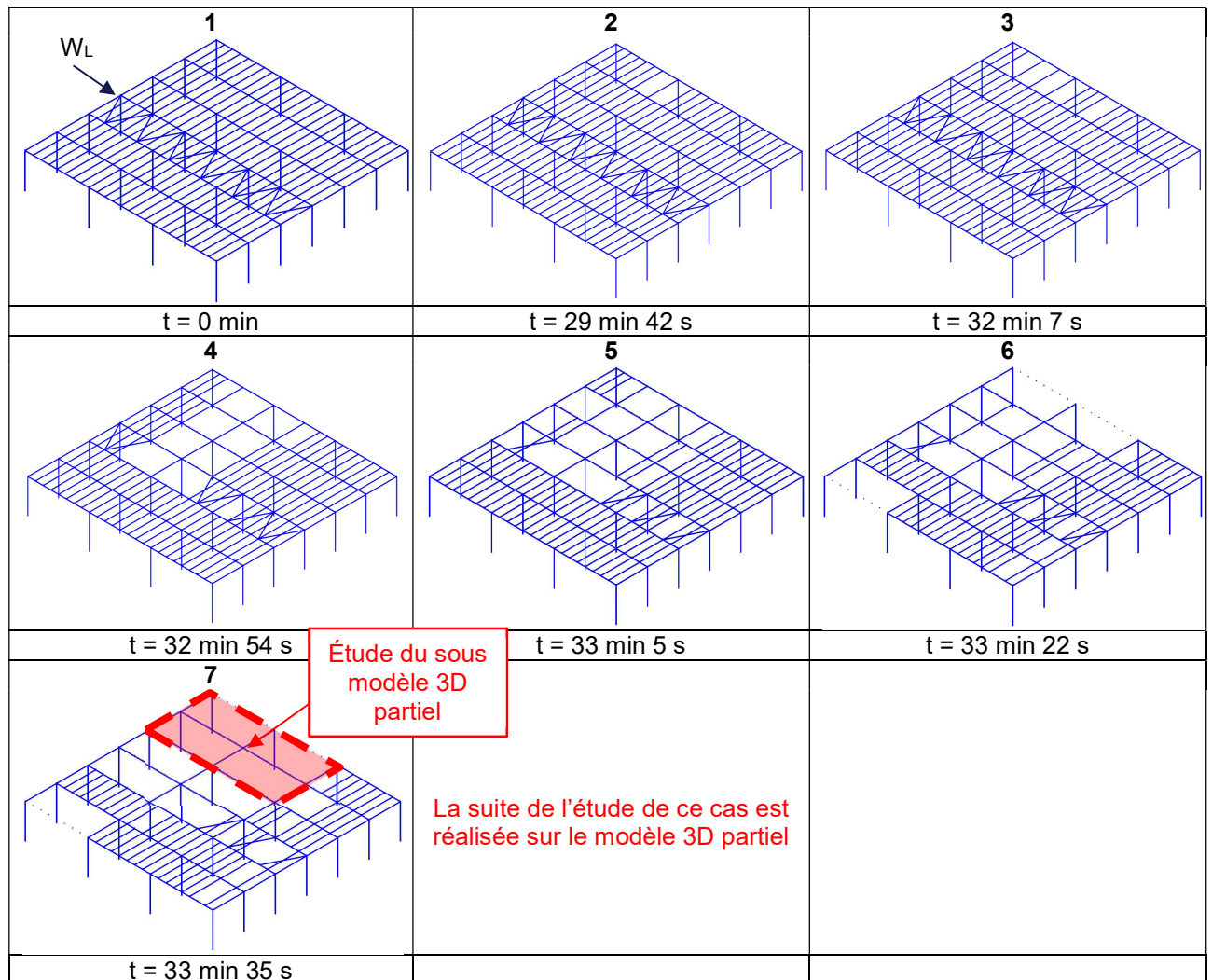


Figure 6-25 : Ruine des éléments – Sc2 - G+0.2WL

Les calculs réalisés permettent de dire que :

- la ruine des premières pannes intervient après 29 minutes d'incendie ;
- la ruine des pannes se fait d'abord au niveau au droit du foyer et au niveau des pannes et ramasse-panne reprenant un effort de vent ;
- la zone de ruine des pannes progresse de la zone au droit du foyer vers les zones plus éloignées ;
- la ruine des traverses intervient avant celle observée pour l'autre position du foyer, après environ de 90 minutes d'incendie.

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

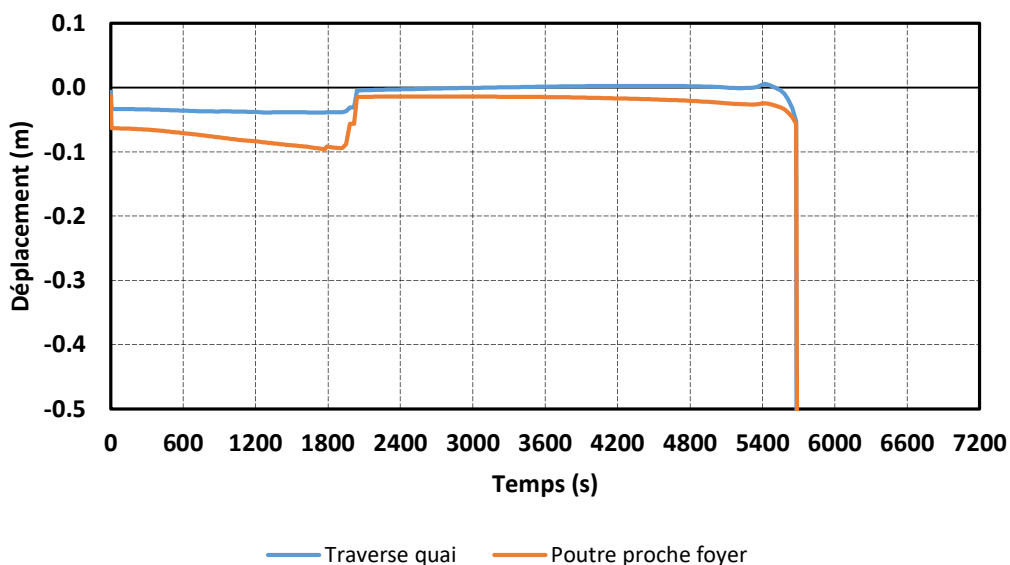


Figure 6-26 : Évolution des déplacements verticaux

La figure suivante présente la différence d'allure des moments agissant dans les éléments bois principaux de la toiture entre le début et la fin des calculs itératifs.

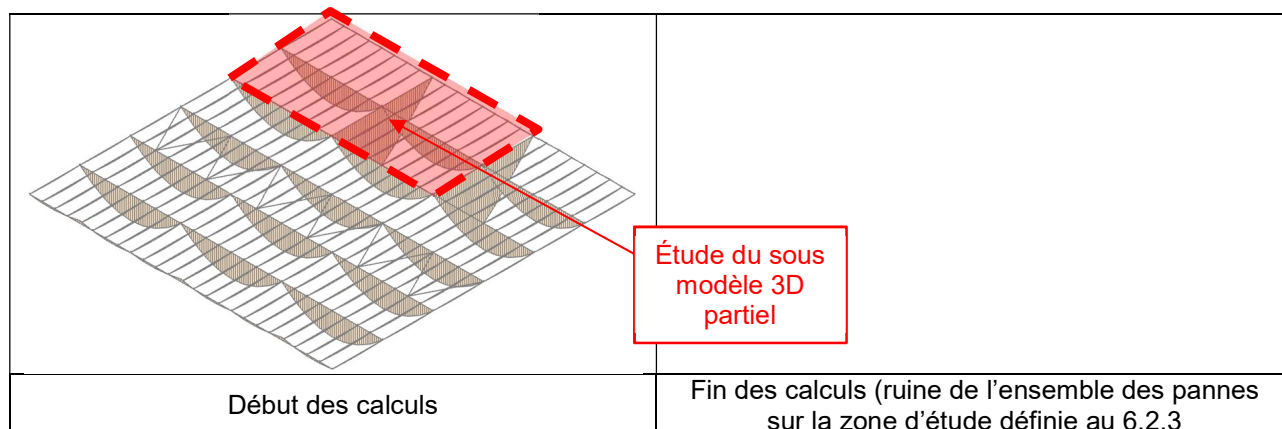


Figure 6-27 : Évolution des moments

6.4. CONCLUSIONS SUR L'ANALYSE DE LA CHRONOLOGIE DE RUINE DES ELEMENTS BOIS

Les calculs effectués ont permis de montrer qu'en considérant les sollicitations thermiques issues de l'analyse d'un feu réel, la différence de stabilité au feu entre les éléments mis en œuvre entraîne dans un premier temps la ruine des pannes avant celle des poutres et traverses principales. Simultanément à leur exposition au feu, les poutres et traverses sont progressivement déchargées, ce qui leur permet d'atteindre des durées de stabilité au feu supérieure à l'heure d'exposition.

Ces calculs ont été réalisés en considérant des hypothèses très sécuritaires sur les temps de ruine des pannes (blocage au déversement, pas de mise à jour des propriétés de torsion sur ces éléments, ...) qui conduisent à maximiser leur temps de tenue au feu. Dans ces conditions :

- La ruine des pannes de la cellule intervient entre 25 minutes et 35 minutes d'exposition au feu.
- La ruine des poutres et traverses intervient au plus tôt aux alentours des 80 minutes d'incendie.

Ainsi, la différence de tenue au feu initiale entre éléments permet de démontrer que la chronologie des événements est telle que l'ensemble des pannes ruinent avant de remettre en cause la tenue des éléments principaux (poutres et traverses).

Les calculs ont aussi mis en évidence que pour les cas de vent mettant en dépression/pression les faces latérales de l'entrepôt (et donc par la même occasion les ramasse-pannes) pouvaient induire des déplacements importants selon l'axe faible des poutres principales dans le cas où la poutre au vent centrale avait ruiné prématurément. Pour pallier ce problème, plusieurs options sont possibles :

- valoriser les potelets béton de façades encastrés en pied dans les calculs (ce qui a été fait pour ces cas posant problème par la mise en œuvre de raideur horizontale limitant les déplacements axe faible des ramasse-pannes). Les potelets béton devant permettre d'obtenir une limitation du déplacement des ramasse-panne/poutres principales à $L/80$ (L étant la portée des poutres) selon leur axe faible. La mise en place de poteaux baïonnette pouvant être une bonne solution dans ce cas précis.
- dédoubler les poutres au vent et les positionner sur les premières files de chaque façade problématique de manière à ce qu'au moins une des deux poutres au vent soit située assez loin du départ de feu pouvant ainsi permettre de stabiliser les poutres principales selon leur axe faible et conduire à la ruine des pannes avant la ruine des diagonales des poutres au vent.

7. CONCLUSION

Cette étude a pour but de continuer les travaux réalisés pour le CODIFAB par le CTSB et EFECTIS sur le comportement au feu des entrepôts bois-béton en lamellé-collé. Une première étude ayant abouti à la réalisation d'un guide de vérification de ce type d'entrepôt.

La commission technique de la SNBL a jugé intéressant reproduire pour 2 situations de calcul jugée enveloppes la chronologie des événements de manière plus fine, sous feu réel, à l'aide du modèle thermomécanique 3D global déjà développé. Ainsi, une méthode de calcul itérative prenant en compte la ruine des différents éléments bois a été développée et est expliquée dans le présent rapport (suppression itérative des éléments, mise à jour itérative des propriétés de torsion pour le déversement des éléments bois, ...). Elle permet de considérer l'action des pannes sur le blocage des poutres au déversement ainsi que la prise en compte des instants de ruine des pannes sur le déchargement des éléments.

Les calculs effectués sous feu réel ont permis de montrer pour le cas d'étude examiné que :

- un écart important, en termes de temps de tenue au feu, existait entre les pannes (chargées de manière normale par les charges permanentes, de neige ou de vent) et les poutres principales (ne supportant plus que leur poids propre en fin de calcul, les pannes ayant ruiné préalablement) lorsque l'on tient compte de la chronologie des relâchements et déchargements.
- Dans ces conditions, la ruine des pannes n'était pas en mesure d'induire la ruine des poutres principales.
- les poutres principales et traverses avaient un temps de tenue au feu supérieure à 60 minutes lorsque l'on tient compte de la chronologie des événements.
- un état final d'une cellule sinistrée avec l'ensemble des poutres principales et traverses encore en place alors que l'ensemble des pannes avait ruiné est trouvé.

Les calculs ont également mis en évidence des déplacements importants selon l'axe faible des poutres principales dans certains cas de vent pouvant mener à leur ruine prématurée. Ces phénomènes sont liés au contreventement de l'ossature et des solutions constructives sont évoquées au paragraphe 6.4 (dédoublage des poutres au vent, limitation des déplacements hors plan de la façade des ramasses pannes par la présence de potelets encastés en pied...).

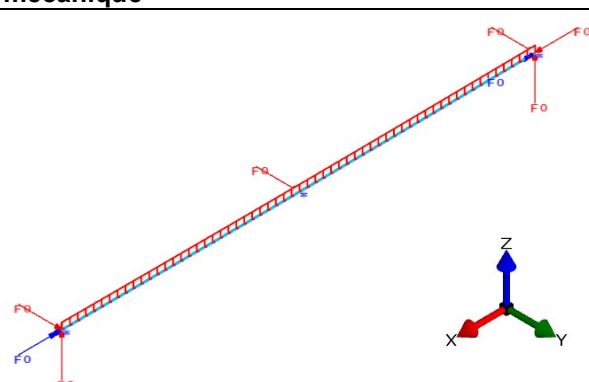
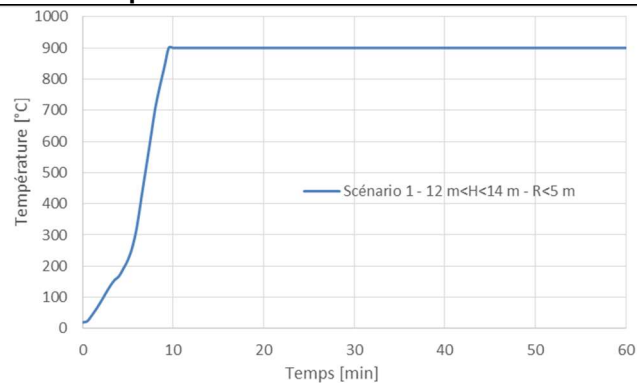
Il est par ailleurs nécessaire de garder à l'esprit, à la lecture du présent rapport, que les résultats mentionnés correspondent à une situation bien particulière d'un entrepôt et permet d'apporter des éléments lors d'éventuelles discussions avec les autorités pour les entrepôts de dimensions courantes devant respecter un degré de stabilité au feu R15. Cependant, un examen critique d'une configuration au regard de celle ayant fait l'objet de cette étude doit être réalisé (nature des produits stockés et conditions de stockage pouvant conduire à des scénarios d'incendie différents, les sections, géométries et taux de travail des différents élément de la structure, le différentiel initial de tenue au feu entre pannes et poutres principales, les charges appliquées, le système de contreventement...) pour s'assurer que les principes et résultats fondamentaux du présent rapport puissent être reconduits et/ou extrapolés.

ANNEXE A ETUDE PARAMETRIQUE D'UNE PANNE

Suite aux discussions avec le groupe de travail, il ressort que si l'Eurocode permet de justifier la durée de tenue au feu d'un élément, il ne permet pas pour autant de déterminer avec certitude l'instant de sa ruine. En effet, il existe, notamment sur les caractéristiques des matériaux, de l'incertitude sur les valeurs prises en compte (calcul en situation d'incendie avec caractéristiques mécanique correspondant au fractile 20%).

Le temps de ruine des pannes peut avoir une incidence sur le comportement global de la structure et notamment sur la tenue des poutres du fait de leur apport de charge et de leur maintien au déversement. Les calculs suivants présentent les résultats obtenus par calcul thermomécanique d'une panne isolée, avec différentes hypothèses sur les matériaux et les conditions aux limites afin de quantifier l'impact des différents paramètres.

Les hypothèses relatives au cas étudié sont rappelées au tableau suivant.

| Modèle mécanique | |
|---|--|
| Panne Isostatique : <ul style="list-style-type: none"> - Portée de calcul 12 m - Blocage hors plan et déversement à mi portée - Charge répartie : 150 daN/ml (correspondant aux charges permanentes appliquées sur les pannes) |  |
| Matériau : Bois lamellé-collé GL24h | |
| Module d'élasticité $E_{0,05}$ | 9 600 MPa |
| Module de cisaillement $G_{0,05}$ | 540 MPa |
| Résistance à la flexion $f_{m,k}$ | 24 MPa |
| Résistance à la compression $f_{c,0,k}$ | 24 MPa |
| Résistance à la traction $f_{t,0,k}$ | 19,2 MPa |
| Coefficient k_{fi} pour passage au fractile à 20% | 1,15 |
| Coefficient de poisson ν | $\frac{E_{0,05}}{2 \cdot G_{05}} - 1$ |
| Sollicitations thermiques | |
| La sollicitation retenue pour réaliser ces calculs paramétriques correspond à la courbe d'action thermique applicable aux poutres au droit du foyer du scénario 1 |  |

| Cas d'étude | |
|--------------------|---|
| Cas 1 | Instabilités latérales bloquées – Flexion pure |
| Cas 1b | Idem cas 1 avec $f_{m,y,d,fi} = 1,5 \times 1,15 \times 24 = 41,4$ MPa |
| Cas 2 | Calcul avec prise en compte des instabilités latérales |
| Cas 2b | Idem cas 2 avec $f_{m,y,d,fi} = 1,5 \times 1,15 \times 24 = 41,4$ MPa |
| Cas 2c | Idem cas 2 avec : - $f_{m,y,d,fi} = 1,5 \times 1,15 \times 24 = 41,4$ MPa - $E_{fi} = 1,5 \times 1,15 \times 9600 = 16560$ MPa - $G_{fi} = 1,5 \times 1,15 \times 540 = 930$ MPa |

Le tableau suivant présente les résultats obtenus en terme de durée de stabilité au feu.

| | t ruine |
|--------|----------------|
| Cas 1 | 31 min |
| Cas 1b | 35 min |
| Cas 2 | 18 min |
| Cas 2b | 18 min 15 s |
| Cas 2c | 20 min |

On constate que la prise en compte ou non du déversement des pannes a une influence majeure sur la durée de tenue au feu de ces éléments qui peut être ainsi augmentée de plus de 100%. L'augmentation des propriétés mécaniques du bois a un impact plus limité.