

Client demandeur :	TPEC
Référence et date de commande :	E-mail du 11/06/2015
Référence du document :	SRI – 15/154 – PR-MR-AS/NB

TPEC



COMPORTEMENT AU FEU DE DEUX BÂTIMENTS EN CHARPENTE METALLIQUE À DREUX (28)



« Établissement certifié qualité ISO 9001, le CTICM assure un suivi de chaque étude dans le plus strict respect de ses procédures qualité »

Date :	06/08/2015	Auteurs :	Patrice RUSSO Mohsen ROUSEFID Arnaud SANZEL	Nombre total de pages : (y compris celle-ci)	57
--------	------------	-----------	---	---	----

Révision	Date	Auteurs	Objet
A	06/08/2015	Patrice RUSSO Mohsen ROSEFID Arnaud SANZEL	Émission Originale
B			
C			
D			
E			

Date :	06/08/2015	Auteurs :	Patrice RUSSO Mohsen ROSEFID Arnaud SANZEL	Nombre total de pages : (y compris celle-ci)	57
--------	------------	-----------	--	---	----

Table des matières

1	Introduction	3
2	Documents de référence	4
2.1	Documents relatifs au bâtiment	4
2.2	Référentiel normatif et technique	4
3	Caractéristiques des deux batiments.....	6
3.1	Description générale du site	6
3.2	Description du bâtiment « messagerie »	6
3.2.1	Description de la structure porteuse de l’entrepôt.....	8
3.2.2	Caractéristiques du stockage.....	9
3.2.3	Plan d’évacuation	10
3.3	Description du bâtiment « stockage »	11
4	Vérification de la stabilité au feu R15 de la structure métallique du bâtiment « stockage ».....	14
4.1	Actions appliquées sur la structure en situation d’incendie.....	14
4.1.1	Charges permanentes.....	14
4.1.2	Charge de neige	14
4.2	Vérification des portiques.....	15
4.2.1	Principe et hypothèse de la modélisation des portiques	15
4.2.2	Résultats des simulations	16
4.3	Vérification des pannes.....	18
4.4	Vérification des contreventements	19
4.5	Vérification des pans de fer	19
4.5.1	Ramasse-pannes en UPN 100.....	19
4.5.2	Potelets le long des murs coupe-feu	20
4.6	Potelets en pignons du bâtiment.....	21
4.7	Conclusions	22
5	Etude du comportement du bâtiment « messagerie » sous incendies réels.....	23
5.1	Objectifs de sécurité et critères associés.....	23
5.2	Sélection des scénarios d’étude.....	23
5.2.1	Scénarios impactant la structure porteuse	24
5.2.2	Scénarios d’évacuation	25
5.3	Simulations du développement du feu et de l’évacuation	26
5.3.1	Logiciels utilisés	26
5.3.2	Domaine et hypothèses de modélisation	26
5.3.3	Résultats des simulations	29
5.4	Analyse du comportement au feu de la structure métallique.....	30
5.4.1	Échauffement des portiques métalliques.....	30
5.4.2	Comportement mécanique des portiques métalliques.....	37
6	Conclusions	42
	Annexe : Résultats détaillés des simulations.....	43
A.1	Résultats du scénario 1	43
A.1.1	Développement du feu et évacuation des personnes.....	43
A.1.2	Conditions de tenabilité	45
A.2	Résultats du scénario 2	48
A.2.1	Développement du feu et évacuation des personnes.....	48
A.2.2	Conditions de tenabilité	50

A.3	Résultats du scénario 3	52
A.3.1	Développement du feu et évacuation des personnes.....	52
A.3.2	Conditions de tenabilité	53

1 INTRODUCTION

À la demande de la société TPEC, cette étude a pour objet d'analyser le comportement au feu d'un entrepôt logistique appartenant à la société TRANSLOCAUTO, implantée sur la commune de Dreux, dans le département de l'Eure et Loir. Cet entrepôt est composé de deux bâtiments de stockage. Le premier bâtiment (dit bâtiment « messagerie ») représente une surface totale de 2 880 m² environ, sans compartimentage intérieur. Sa structure porteuse est une charpente métallique composée uniquement de profilés reconstitués soudés (PRS). Le second bâtiment (dit bâtiment « stockage ») est divisé en trois cellules structurellement indépendantes, de surface unitaire 2 511 m² et deux fois 3 803 m², et séparées par des murs coupe-feu auto-stables. La structure porteuse de chaque cellule est composée de profilés reconstitués soudés et de profilés laminés à chaud.

D'un point de vue réglementaire, les deux bâtiments sont classés sous la rubrique 1510 des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement et relèvent du régime de l'enregistrement qui exige un degré de résistance au feu normalisé R15 et une vérification des modes de ruine (non effondrement en chaîne et effondrement vers l'intérieur).

Compte tenu de la structure existante du bâtiment « messagerie » (charpente métallique constituée de profilés de type PRS à inertie variable), son degré de résistance au feu normalisé, considérant un incendie généralisé occupant l'ensemble de la cellule concernée dès le départ du sinistre, ne peut pas atteindre 15 minutes (R15).

Dans ce contexte, les objectifs de la présente étude consistent :

- D'une part, à vérifier que la structure métallique du bâtiment « stockage » est à minima R15 sous conditions d'incendie normalisé, sachant que ce bâtiment satisfait déjà les exigences de comportement structural (non effondrement vers l'extérieur, non effondrement en chaîne) [6] ;
- D'autre part, à vérifier que le bâtiment « messagerie » garantit un niveau de sécurité adéquat tel qu'en cas d'incendie réel se déclarant au sein du bâtiment, la cinétique d'incendie et la cinétique de ruine de la structure porteuse du bâtiment sont en adéquation avec les objectifs de sécurité des personnes, (occupants et services de secours).

Le bâtiment « messagerie » étant constitué d'une seule cellule, séparée d'une zone de bureaux structurellement indépendante par un mur coupe-feu auto-stable, le risque de ruine en chaîne peut-être écarté. Pour ce bâtiment, l'étude s'attache donc à vérifier qu'en cas d'incendie réel se déclarant au sein du bâtiment :

- Exigence 1 : il n'y a pas d'effondrement de la structure vers l'extérieur ;
- Exigence 2 : Le temps de stabilité au feu de la structure est compatible avec le temps d'évacuation des personnes ;
- Exigence 3 : la cinétique d'incendie est compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours.

Les analyses s'appuient sur la simulation numérique du développement et de la propagation du feu, afin de prédire l'évolution des températures et de l'enfumage, couplée à l'estimation du comportement mécanique de la structure porteuse du bâtiment. La démarche utilisée suit la méthodologie de l'Ingénierie de la Sécurité Incendie [15], à savoir que le risque incendie est évalué sur la base de scénarios d'incendie réel sélectionnés pour être majorants vis-à-vis des exigences attendues, à travers les étapes suivantes :

- Définition des critères de performance à atteindre ;
- Sélection des scénarios d'incendie ;
- Simulation des scénarios d'incendie ;
- Évaluation du risque incendie pour chaque scénario.

2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

2.1 DOCUMENTS RELATIFS AU BÂTIMENT

- [1] 01-G IMPLANTATION Entrepot+Bureau.pdf
- [2] 03-D COMBLES Entrepot+Bureaux.pdf
- [3] 04-C PORTIQUES Entrepot+Bureau.pdf
- [4] 05-E ELEVATIONS Entrepot+Bureau.pdf
- [5] Annexe ET non ruine en chaîne Translocauto note de calcul.pdf
- [6] Étude technique non ruine en chaîne.pdf
- [7] ind A plan de niveaux sur l'ensemble du projet_26.pdf
- [8] Ind indA Élévations coupes bureaux entrepôt_23.pdf
- [9] NDC C5938 1sur3.pdf
- [10] NDC C5938 2sur3.pdf
- [11] NDC C5938 3sur3.pdf
- [12] plan recollement IMC2 PDF.pdf
- [13] Translocauto B04.pdf
- [14] Translocauto C03.pdf

2.2 RÉFÉRENTIEL NORMATIF ET TECHNIQUE

- [15] NF ISO 23932, Ingénierie de la sécurité incendie - Principes généraux, Août 2009.
- [16] FD ISO/TR 16738, Ingénierie de la sécurité incendie - Informations techniques sur les méthodes d'évaluation du comportement et du mouvement des personnes, Décembre 2009.
- [17] McGrattan K., McDermott K., Hostikka S. & Floyd J., Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide, National Institute of Standards and Technology, Special Publication 1019-5, Octobre 2010.
- [18] McGrattan K., Hostikka S. & Floyd J., McDermott K., Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume 3 : Validation, National Institute of Standards and Technology, Special Publication 1018-5, Octobre 2010.
- [19] Korhonen T. & Hostikka S., FDS+Evac - Technical Reference and User's Guide, VTT Technical Research Centre of Finland, Mai 2010.
- [20] NF EN 1993-1-2, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier, Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu, Novembre 2005.
- [21] Hietaniemi J. & Mikkola E., Design Fires for Fire Safety Engineering, VTT Working Papers 139, 2010.
- [22] Babrauskas V., Ignition Handbook, Issaquah, USA: Fire Science Publishers, ISBN 0-9728111-3-3, 2003.
- [23] Fire Dynamics Tools (FDS) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, NUREG 1805, Décembre 2004.
- [24] XP ISO/TS 16733, Ingénierie de la sécurité incendie - Sélection de scénarios d'incendie de dimensionnement et de feux de dimensionnement, Février 2007.
- [25] Eurocode 1 - Actions sur les structures – Partie 1-2: Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu (NF EN 1991-1-2, Juillet 2003) et son Annexe Nationale (NF EN 1991-1-2/NA, février 2007).

- [26] ANSYS, ANSYS User's Manual for Revision 8.0 – Volume IV – Theory, Swanson Analysis SYSTEM, INC., Houston USA, 1992.
- [27] NF EN ISO 527-1, Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 1 : principes généraux, Mars 1996.
- [28] Renaud C., Sakji M.S. et Zhao B., Méthode de justification d'une stabilité au feu ¼ heure (R15) des ossatures en acier, Revue Construction métallique, n°2, 2010.
- [29] Eurocode 0 : Bases de calcul des structures, (NF 1990, Mars 2003) et son Annexe Nationale (NF EN 1990/NA, décembre 2011).
- [30] Eurocode 1 : Actions sur les structures, Partie 1-1 : Actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments (NF EN 1991-1-1, Mars 2003) et son annexe nationale (NF EN 1991-1-1/NA, mai 2007).
- [31] Eurocode 3 : Calcul des structures en acier, Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu (NF EN 1993-1-2, Novembre 2005) et son Annexe Nationale (NF EN 1993-1-2/NA, Octobre 2007).
- [32] Eurocode 1 : Actions sur les structures, Partie 1-4 : Actions du vent (NF EN 1991-1-4, Janvier 2005) et son annexe nationale (NF EN 1991-1-4).
- [33] Eurocode 1 : Actions sur les structures, Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu (NF EN 1991-1-2, Juillet 2003) et son Annexe Nationale (NF EN 1991-1-2/NA, Février 2007).
- [34] Flumilog, *Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt – Partie A*, DRA-09-90977-14553A Version 2, août 2011.
- [35] Wood Handbook, *Wood as an Engineering Material*, Centennial Edition, April 2010.
- [36] Eurocode 3 : Calcul des structures en acier, Partie 1-5 : Plaques planes (NF EN 1993-1-5, Mars 2007).

3 CARACTÉRISTIQUES DES DEUX BATIMENTS

3.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SITE

Le site de la société TRANSLOCAUTO se situe au 23 rue des Livraindières à DREUX (28). Il se compose de trois bâtiments, d'un parking et d'une aire de circulation (cf. Figure 1). Ces bâtiments représentent un bâtiment de stockage composé de 3 cellules et de locaux administratifs d'une superficie d'environ 10 500 m², un bâtiment « Garage » servant d'atelier pour les véhicules d'environ 315 m² et un bâtiment dit « messagerie » composé d'une cellule de 2880,54 m².

Seul le bâtiment « messagerie » et le bâtiment de stockage sont concernés par la présente étude.

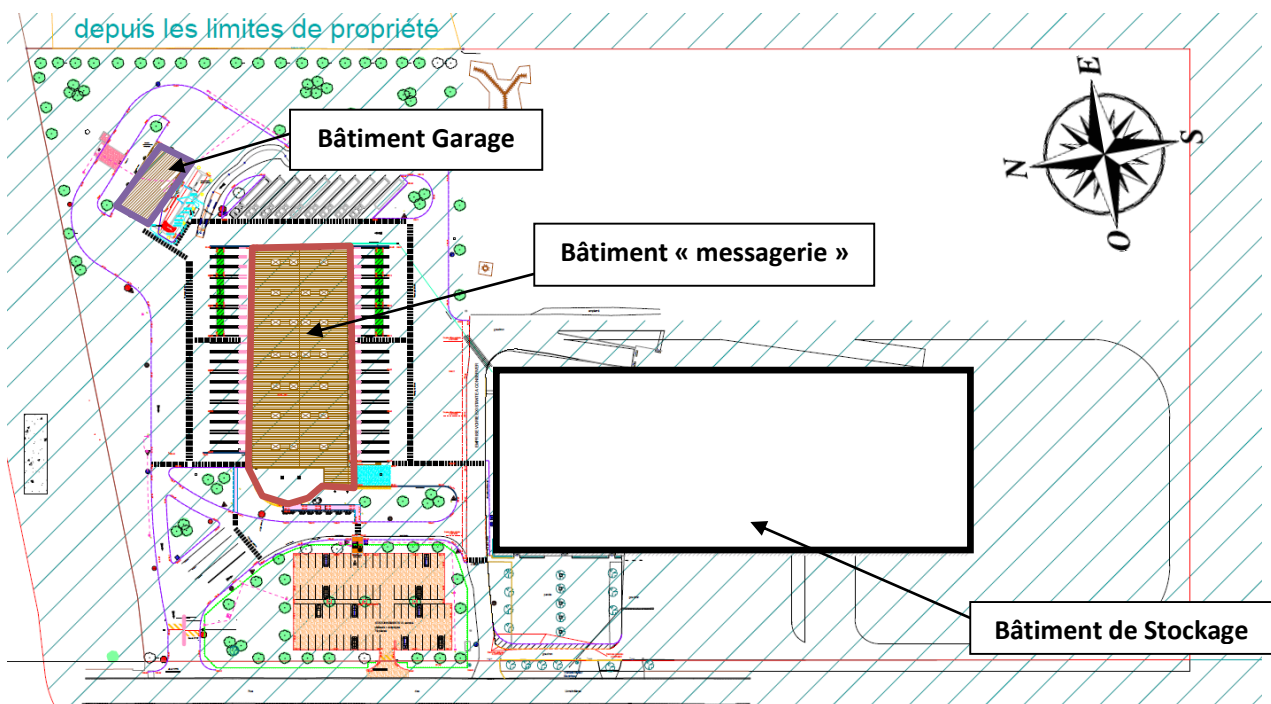


Figure 1 : Plan du site

3.2 DESCRIPTION DU BÂTIMENT « MESSAGERIE »

Le bâtiment « messagerie » est composé d'une cellule de 2 880,54 m², d'un local de charge pour les transpalettes et de locaux administratifs et sanitaires séparés par des murs coupe-feu. Cette cellule de stockage est une cellule de « cross docking », la marchandise y transitant sur une courte durée, inférieure à 24 h.

Les parois extérieures de l'entrepôt sont principalement constituées d'un bardage métallique double-peau avec isolant en laine de verre. Les murs de séparation entre la cellule et les locaux administratifs sont en parpaings coupe-feu 2 heures, avec une surélévation en toiture de 1 m et des débords latéraux de 1 m. Le mur nord est composé d'un mur en béton de 2 m de haut surmonté d'un bardage métallique double-peau avec isolant en laine de roche (cf. Figure 2). Les façades est et ouest de la cellule de stockage possèdent 21 portes de quai chacune.

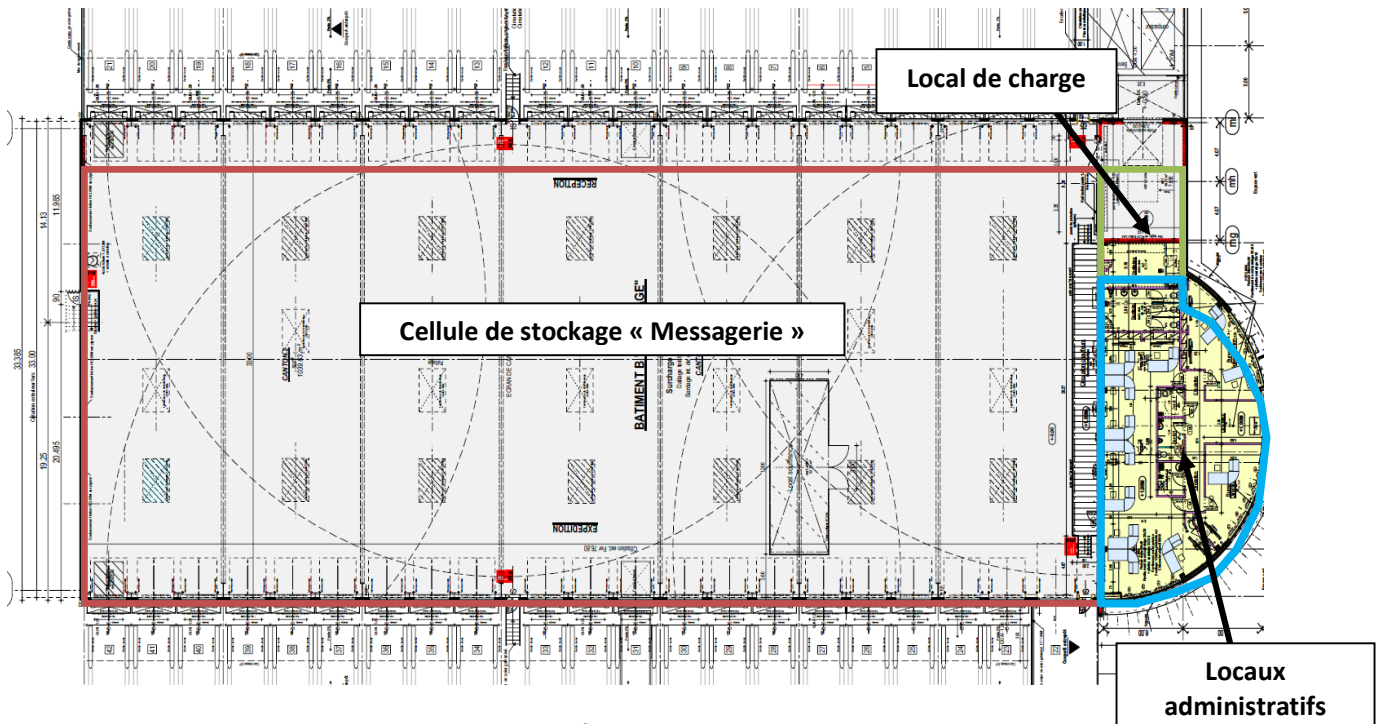


Figure 2 : Bâtiment « messagerie »



a) Façade Nord



b) Façade Sud

Figure 3 : Vues extérieures du bâtiment

Les principales caractéristiques de l'entrepôt sont résumées dans le Tableau 1.

<i>Cellule</i>	<u>Stockage</u>
<i>Surface au sol</i>	2880,54 m ²
<i>Hauteur sous poutre</i>	5 m
<i>Hauteur utile de stockage</i>	4 m
<i>Hauteur de référence des écrans de cantonnement</i>	4,5 m
<i>Toiture</i>	Bac acier isolé (laine de roche) avec étanchéité
<i>Éclairage naturel</i>	Lanterneaux en polycarbonate
<i>Surface de désenfumage</i>	2,1 %
<i>Détection incendie</i>	Détection optique couplée à une détection thermique
<i>Déclenchement du désenfumage</i>	Fusible thermique à 93°C

Tableau 1 : Caractéristiques de la cellule de stockage

3.2.1 Description de la structure porteuse de l'entrepôt

Selon la note de calcul et les plans d'exécution de la structure ([9], [10] et [11]), la structure porteuse de l'entrepôt est constituée de :

- Sept portiques à simple travée, identiques et constitués de profilés reconstitués soudés (files 2 à 8). Les portiques ont une longueur de 35 m environ et sont espacés de 10,5 m. Comme le montre la Figure 4, les profilés reconstitués soudés des portiques sont à inertie variable pour les poteaux et les jarrets d'une longueur de 4 m. Ils sont à inertie constante pour la partie courante des traverses ;
- Un pan de fer (file 1) constitué d'un ramasse-pannes en UPN 160 et de potelets en IPE 220, espacés au maximum de 6,2 m ;
- Un système d'empannage constitué de profilés minces PLS 3530 ou PLS 3535, dont l'espacement varie de 2,73 m à 3,0 m environ [3].

Les caractéristiques des PRS sont résumées dans les tableaux suivants et les dimensions sont données en millimètres :

Dimensions (mm)	Partie courante		Jarret			
	Âme	Semelles	À l'encastrement		À la sortie du jarret	
			Âme	Semelles	Âme	Semelles
Traverses (PRS)	830 x 5	250 x 10	1000 x 6	250 x 12	830 x 6	250 x 12

Tableau 2 : Section transversale des éléments de la structure de toiture

Dimensions (mm)	Poteaux de rive			
	En pied		En tête	
	Âme	Semelles	Âme	Semelles
Files 2, 5 et 7	400 x 6	300 x 10	1000 x 10	300 x 10
Files 3, 4, 6 et 8	400 x 8	250 x 10	1000 x 10	250 x 10

Tableau 3 : Section transversale des poteaux

La stabilité du bâtiment est assurée par une poutre au vent située entre les files 5 et 6 (cornières L40x4 et L60x6) renvoyant les efforts vers deux croix de Saint-André et deux portiques de stabilité en files A et B.

Portiques files 2, 5 et 7

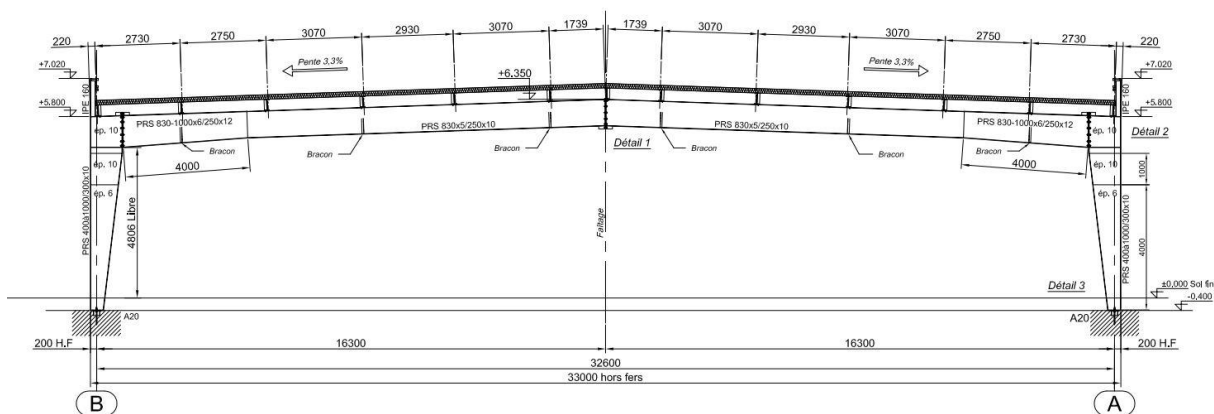


Figure 4 : Vue en coupe du portique pour les files 2, 5 et 7

Portiques files 3,4,6 et 8

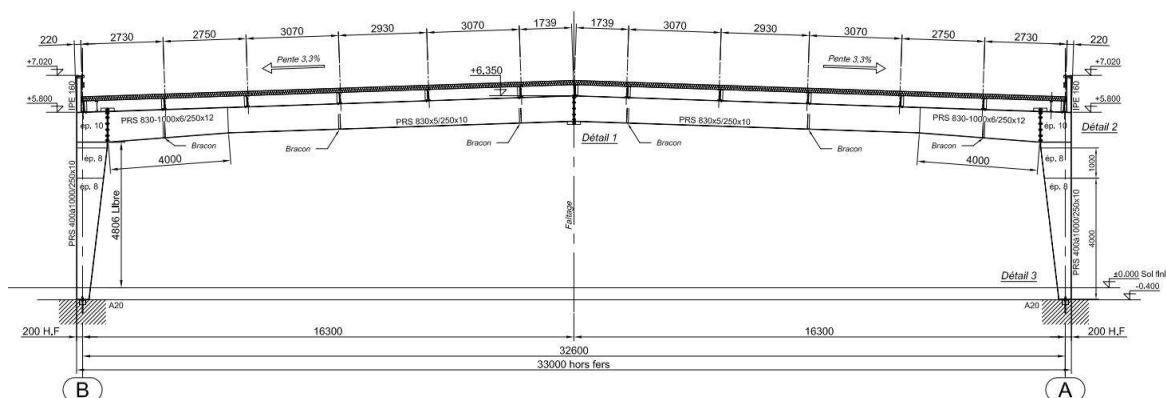


Figure 5 : Vue en coupe du portique pour les files 3, 4, 6 et 8

3.2.2 Caractéristiques du stockage

Les différents produits entreposés sont stockés sur des palettes en îlots de 14 m² en moyenne sur une hauteur moyenne de 2 m, certains étant également stockés sur un rack adossé à la façade nord. Ces produits sont majoritairement classés dans la rubrique 1510 de la nomenclature des ICPE (d'autres produits sont présents, mais en petite quantité ne dépassant pas le volume aboutissant au régime de la déclaration). La Figure 6 présente quelques exemples de produits stockés en transit.



Figure 6 : Exemple de produits stockés dans la cellule de stockage

3.2.3 Plan d'évacuation

L'emplacement des issues de secours est présenté sur la Figure 7. On dénombre au total 5 issues de secours. Ces issues sont numérotées sur la figure et serviront de références dans la suite du rapport. Les portes coupe-feu permettant le passage entre la cellule, les locaux administratifs et le local de charge ne sont pas considérées comme des sorties de secours.

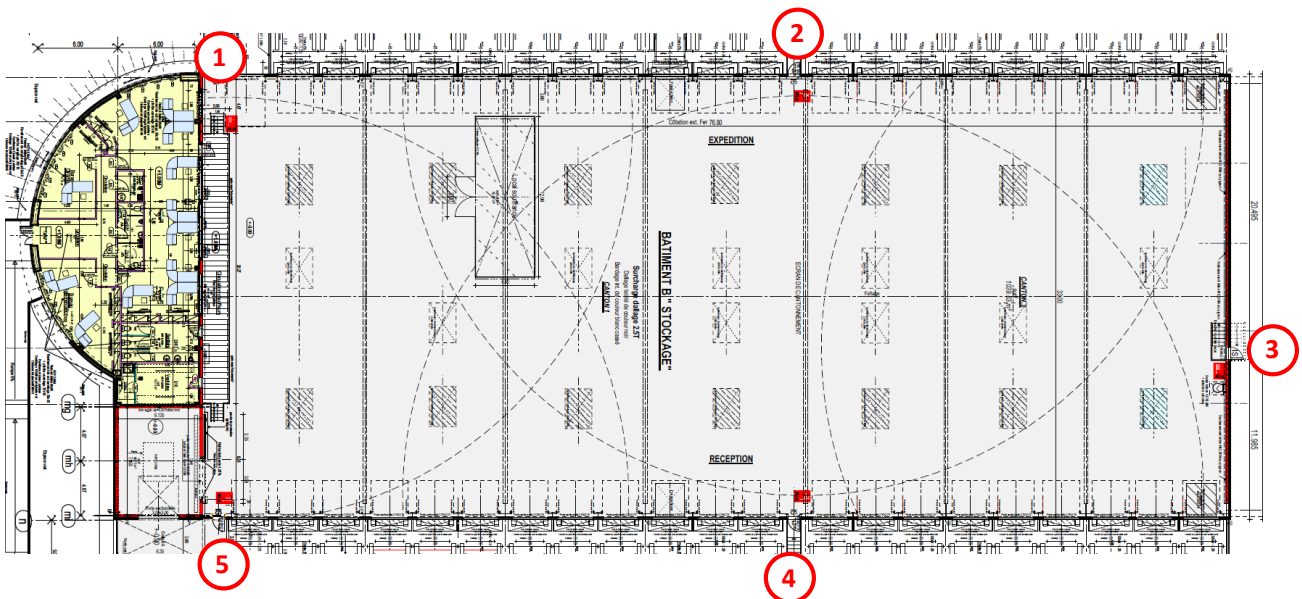


Figure 7 : Plan des issues de secours

A partir de ce plan, il est alors possible de déterminer la distance maximale d'évacuation pour la cellule. Cela permettra de calculer de manière simplifiée le temps d'évacuation (cf. § 5.2.2). Le trajet correspondant est indiqué en rouge sur la Figure 8. On obtient la distance maximale de 38 m.

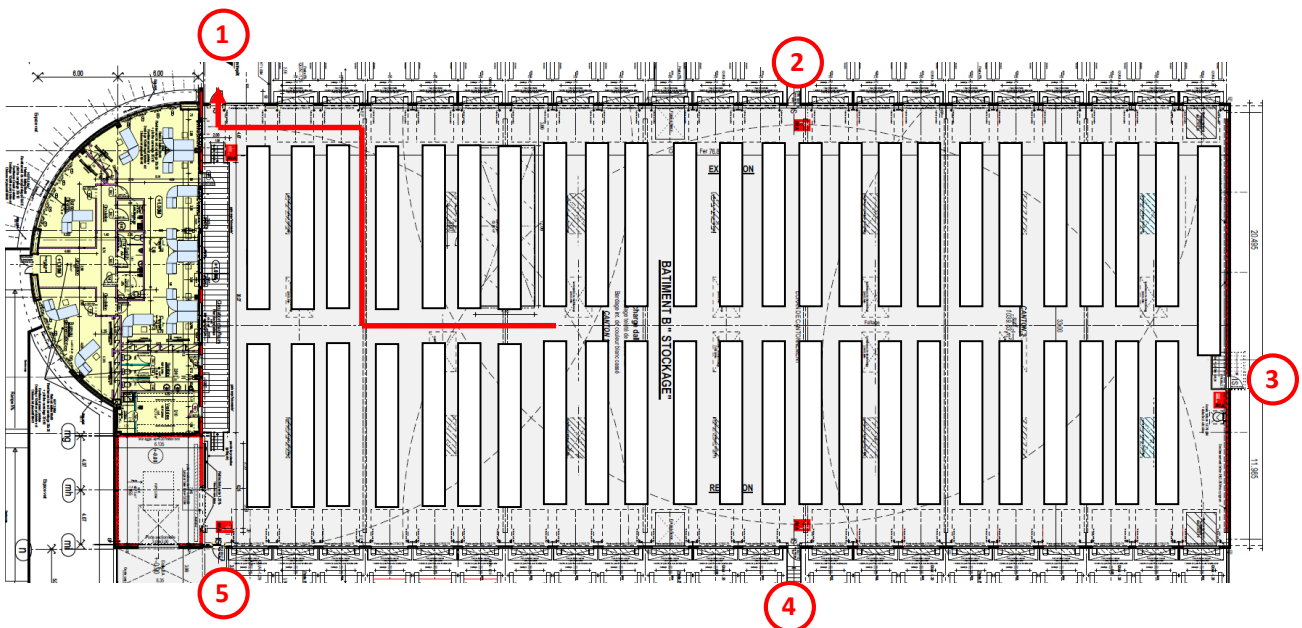


Figure 8 : Trajets les plus longs pour évacuer de chaque cellule

3.3 DESCRIPTION DU BÂTIMENT « STOCKAGE »

Le bâtiment « stockage » est composé de trois cellules d'une superficie de 2511 m² pour la première et de 3803 m² pour les deux autres cellules. Les cellules sont structurellement indépendantes et séparées par des murs coupe-feu auto-stables (désolidarisés de la structure principale de chaque cellule). La figure suivante illustre la vue en plan du bâtiment.

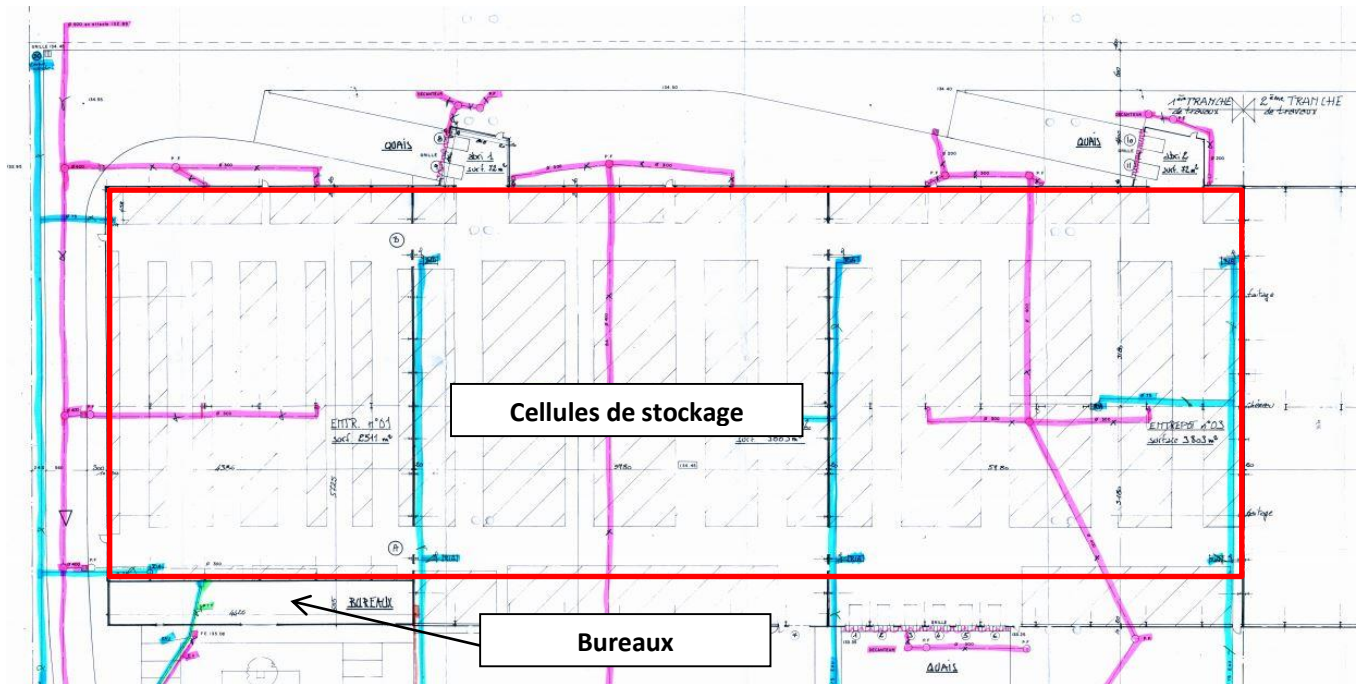


Figure 9 : Vue en plan du bâtiment de stockage

La vérification de la résistance au feu de ce bâtiment étant effectuée sous conditions d'incendie normalisé, la description du stockage et du plan d'évacuation n'est pas nécessaire. Seule une description de la structure porteuse des trois cellules du bâtiment est donnée ci-après.

En l'absence d'informations détaillées, des relevés ont été effectués in situ. Ces relevés indiquent que la charpente métallique de chaque cellule est constituée de :

- portiques métalliques à double travée en profilés reconstitués soudés espacés de 8 m. La portée des portiques est de 64 m environ (Cf. Figure 1). Les poteaux de rive sont des profilés reconstitués soudés à inertie constante tandis que le poteau central est un IPE 550. Concernant les traverses, les jarrets d'une longueur de 4 m de long sont à inertie variable et la partie courante est à inertie constante. La hauteur des poteaux sous poutre est d'environ 7 m et la hauteur au faîtage (sous poutre) est de 9 m environ ;
- de pans de fer constitués d'un ramasse-panne en UPN 100 et de potelets en IPE 220 espacés de 6 m maximum. L'espacement des pans de fer vis-à-vis des portiques est de 6 m environ ;
- d'un système d'empennage constitué de pannes en IPE 140, dont l'espacement varie de 1,5 m à 3 m environ.

Par ailleurs, la stabilité du bâtiment est assurée par des poutres au vent (une poutre longitudinale et une poutre transversale) en couverture renvoyant les efforts vers des croix de Saint-André.

Les caractéristiques des PRS sont résumées dans les tableaux suivants et les dimensions sont données en millimètres :

Dimensions (mm)	Partie courante		Jarret			
	Âme	Semelles	À l'encastrement		À la sortie du jarret	
			Âme	Semelles	Âme	Semelles
Traverses (PRS)	600 x 7	250 x 10	1000 x 8	250 x 12,5	600 x 8	250 x 12,5

Tableau 4 : Section transversale des traverses des portiques

Dimensions (mm)	Âme	Semelles
Poteaux de rive - PRS	620 x 10	300 x 20
Poteau interne - IPE 550	510 x 11,1	210 x 17,2

Tableau 5 : Section transversale des poteaux des portiques

Les figures suivantes illustrent la structure porteuse du bâtiment de stockage, ses principales dimensions ainsi que l'espacement entre les pannes et l'emplacement des bracons anti-déversement :

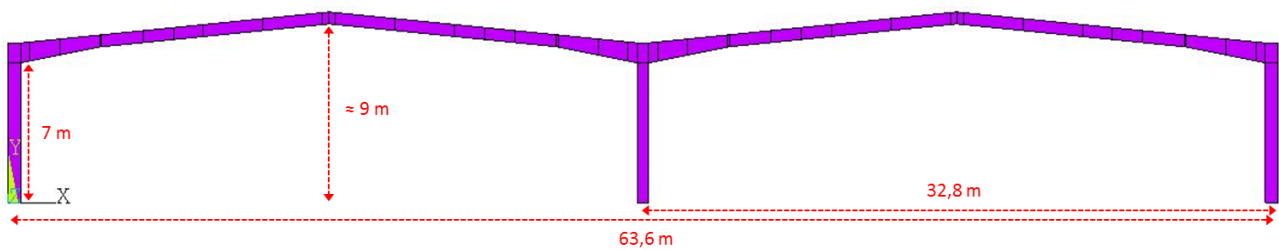


Figure 10 : Principales dimensions des portiques de la structure porteuse

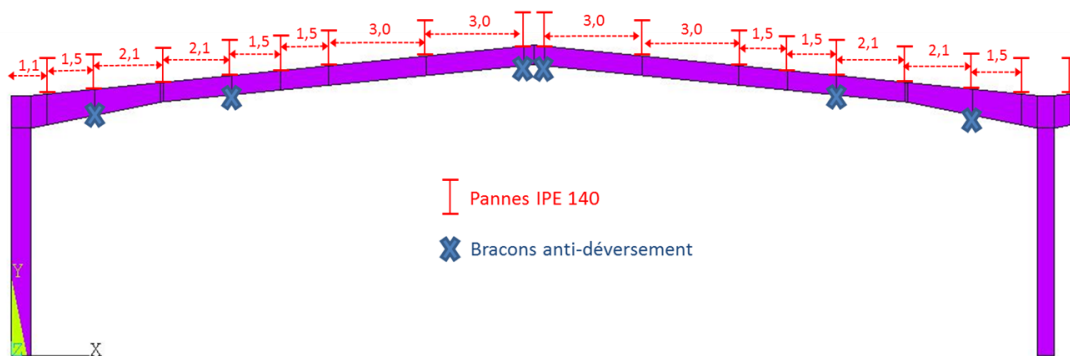


Figure 11 : Emplacement des pannes et des bracons anti-déversement le long du portique

4 VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ AU FEU R15 DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE DU BÂTIMENT « STOCKAGE »

La vérification de la stabilité au feu R15 (sous conditions d'incendie normalisé) de la structure métallique du bâtiment « stockage » est réalisée selon la procédure de calcul structural de la partie feu de l'Eurocode 1 [25].

Les calculs sont réalisés pour chaque élément constitutif de la structure, en utilisant soit un modèle de calcul avancé, soit un modèle de calcul simplifié selon la nature de l'élément :

- Compte tenu du caractère particulier des portiques, qui sont constitués en partie de profilés reconstitués soudés sensibles au voilement local (section de classe 4), la stabilité au feu de ces éléments est vérifiée à l'aide du logiciel aux éléments finis ANSYS ;
- Les systèmes de contreventement (palées de stabilité), les pannes et le pan de fer sont vérifiés à l'aide des méthodes de calcul simplifiées données dans le guide R15 [28] et la partie feu de l'Eurocode 3 ;

Les principaux résultats des calculs sont donnés ci-après.

4.1 ACTIONS APLIQUÉES SUR LA STRUCTURE EN SITUATION D'INCENDIE

Conformément au guide R15, les actions à prendre en compte pour la vérification de la stabilité au feu d'un entrepôt à simple rez-de-chaussée sont :

- les charges permanentes (incluant les éventuelles surcharges d'équipement), et
- les charges de neige

avec une pondération de 1,0 pour les charges permanentes et de 0,2 pour les charges de neige (cf. EN1991-1-1 [30]).

4.1.1 Charges permanentes

En plus du poids propre de la structure et en l'absence d'informations détaillées, des valeurs sécuritaires ont été adoptées pour les charges permanentes, à savoir :

- Couverture multicouche 25 kg/m² ;
- Bardage 15 kg/m² ;

4.1.2 Charge de neige

Les bâtiments étudiés sont construits au sein d'une zone industrielle en périphérie de Dreux. Cette ville est située dans le département de l'Eure et Loire (28) à une altitude maximale de 139 m. D'après la carte de neige issue de l'Annexe Nationale Française de l'EN 1991-1-3 (cf. Figure 12), la valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol, pour une altitude inférieure à 200 m et pour un département de la zone A1, est de 0,45 kN/m². En considérant par ailleurs un coefficient de forme μ_1 égal à 0,8 (pente de toiture inférieure à 30°), la valeur de calcul de la charge de neige prise en compte dans les analyses est donnée par :

$$S_n = 0,8 \times 0,45 = 0,36 \text{ kN/m}^2$$

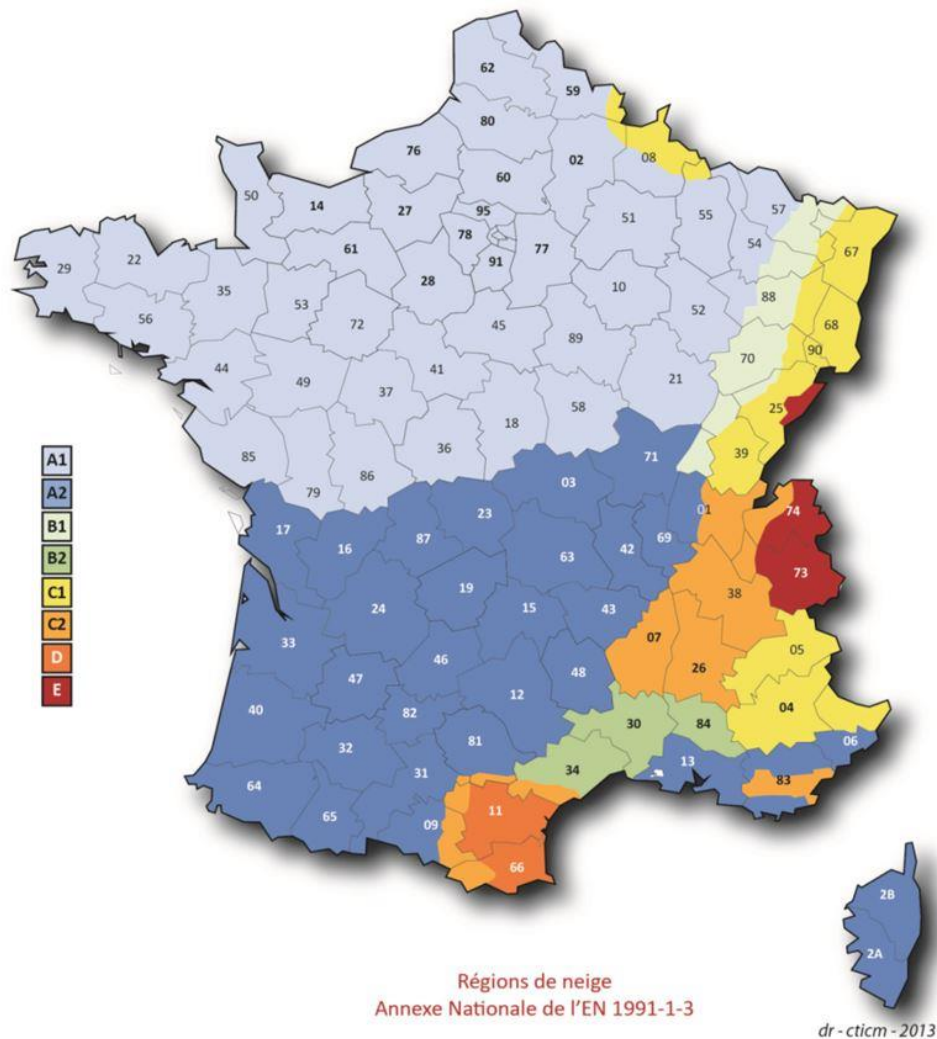


Figure 12 : Carte des régions de neige (EN 1991-1-3, Annexe Nationale Française)

4.2 VÉRIFICATION DES PORTIQUES

Compte tenu du caractère particulier des portiques, leur stabilité au feu est vérifiée à l'aide du logiciel aux éléments finis ANSYS.

4.2.1 Principe et hypothèse de la modélisation des portiques

Les hypothèses suivantes sont adoptées :

- Comme le montre la Figure 13, les portiques en profilés reconstitués soudés sont modélisés à l'aide d'éléments finis de type coque à 4 nœuds (SHELL 181) ;
- Les poteaux sont considérés comme articulés en pied. Ces conditions d'appui sont supposées inchangées pendant toute la durée d'exposition au feu. Par ailleurs, les platines en pied de poteau ont été modélisées afin de faciliter l'application des conditions aux limites.
- Afin de représenter le maintien hors-plan des portiques apporté par les pannes et les bracons, le déplacement Uz a été bloqué au niveau des différents emplacements de ces éléments ;
- Les assemblages poutre-poteau sont supposés parfaitement rigides et suffisamment résistants pendant toute la durée de l'exposition au feu du fait d'une rigidité plus importante au voisinage immédiat de ces assemblages, due à une montée en température plus lente (massivité plus élevée) que dans les autres parties du portique.

- Le chargement mécanique appliqué au portique est supposé constant pendant toute la durée d'exposition au feu. Ces charges sont appliquées à l'aide de charges nodales au niveau de l'emplacement de chaque panne (cf. Figure 14) ;
- Les caractéristiques thermo-physiques (chaleur spécifique, conductivité thermique et masse volumique) et les propriétés thermo-mécaniques de l'acier (facteur de réduction pour la résistance caractéristique, modèle mathématique pour les lois contrainte-déformation et la dilatation thermique) sont issues de l'Eurocode 3 partie 1-2. Par ailleurs, la nuance de l'acier utilisé pour la structure étant inconnue, de manière sécuritaire, toutes les analyses sont menées en considérant une nuance S235. Les caractéristiques à froid de l'acier sont donc les suivantes :
 - limite d'élasticité : $f_y=235 \text{ N/mm}^2$ et
 - Module d'Young : $E=210000 \text{ N/mm}^2$;
- L'incendie est représenté par la courbe température/temps normalisée et l'échauffement du portique est déterminé à partir de la méthode de calcul simplifiée de l'Eurocode 3 partie 1-2 [31], en considérant des éléments non protégés contre l'incendie et directement exposés au feu sur leurs 4 faces.

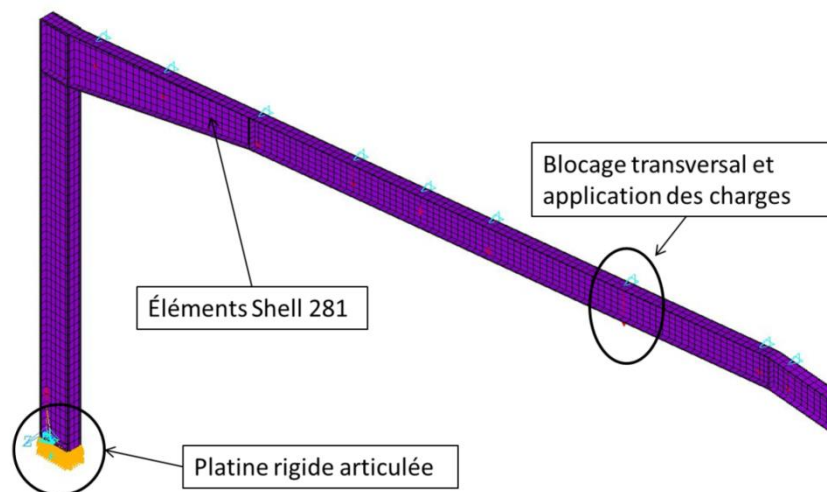


Figure 13 : Modélisation numérique des portiques

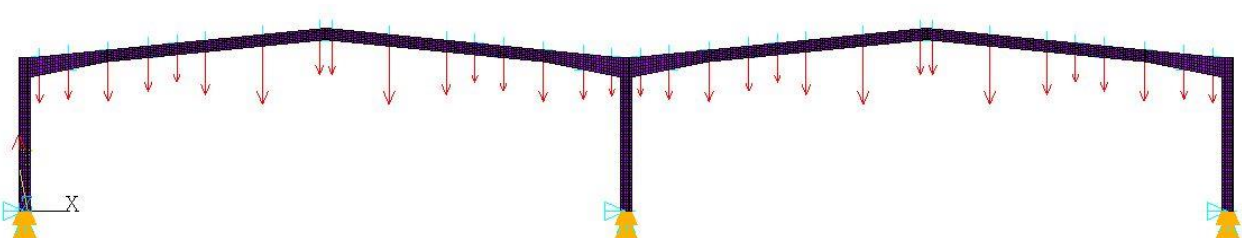


Figure 14 : Chargements et conditions aux limites

4.2.2 Résultats des simulations

Les figures suivantes résument les résultats des calculs effectués. Sont présentés :

- d'une part les évolutions au cours du temps des déplacements en quelques points du portique, et

- d'autre part l'état de déformation du portique au cours du temps.

À la lecture de ces figures, on constate que sous l'effet de la dilatation des traverses, les déplacements horizontaux calculés en tête des poteaux augmentent progressivement vers l'extérieur de la cellule au cours des premières minutes de l'incendie. Ensuite, le mouvement s'inverse et après 15,3 minutes, les poteaux se dirigent rapidement vers l'intérieur du bâtiment en raison de la ruine de la traverse sous l'effet combiné des températures et des charges appliquées.

Par conséquent, la stabilité des portiques sous feu normalisé est au moins de 15 minutes.

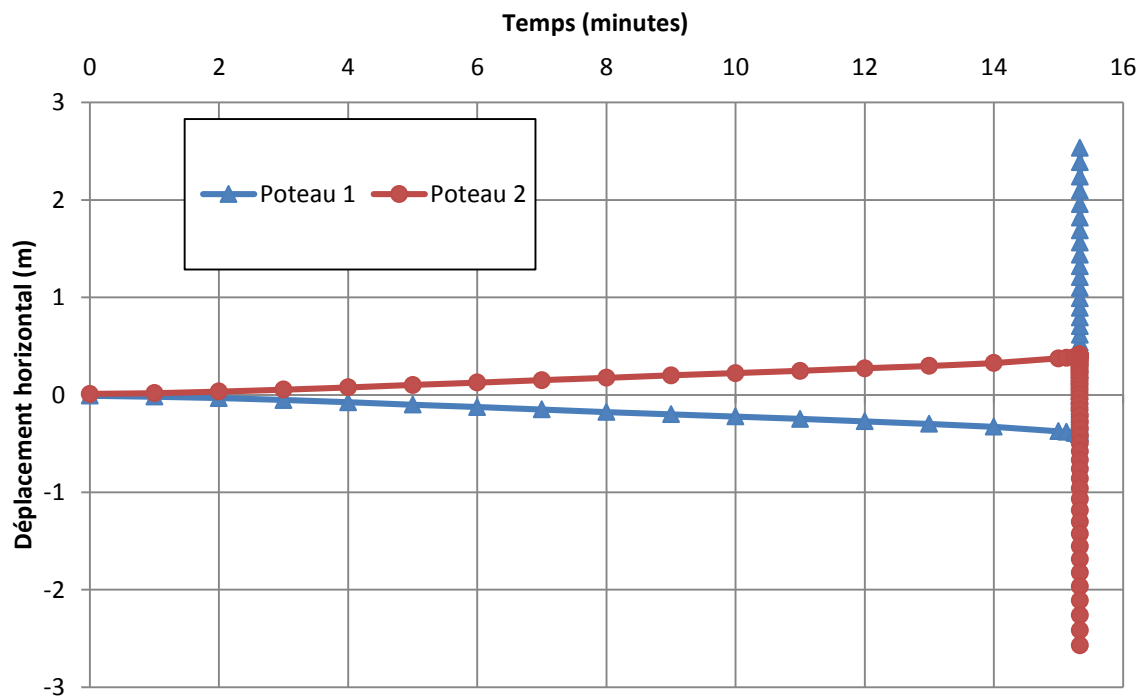


Figure 15 : Évolution au cours du temps des déplacements horizontaux calculés en tête des poteaux

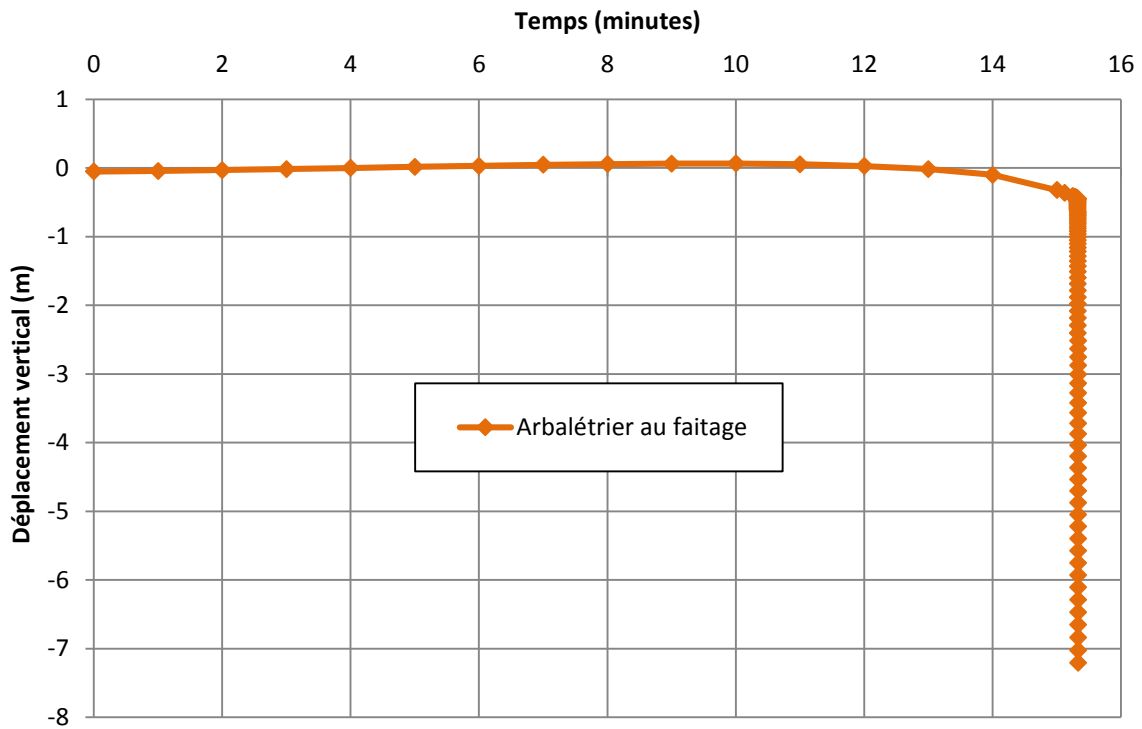


Figure 16 : Évolution au cours du temps du déplacement vertical de l'arbalétrier au niveau du faitage

1
NODAL SOLUTION
STEP=104
SUB =7
TIME=919.971
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =7.25423
SMN =-7.1656
SMX =.167919

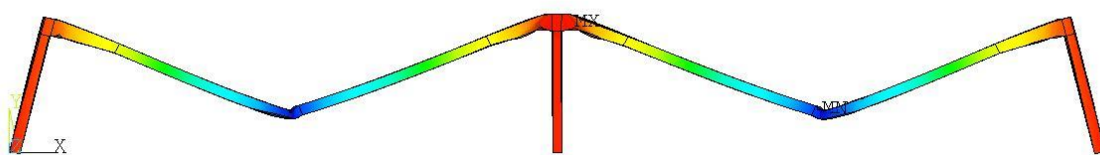


Figure 17 : Déformée du portique lors de la ruine (en m)

4.3 VÉRIFICATION DES PANNES

La stabilité au feu des pannes est vérifiée en appliquant les règles de calcul du guide R15 permettant de prendre en compte le comportement en chaînette des pannes.

Selon ce guide [28], la stabilité au feu R15 des pannes peut être jugée satisfaite lorsque que le critère suivant est vérifié :

$$q_{fi,Ed} \leq q_{fi,Rd} = 0,16 \frac{A_s f_y}{L}$$

où $q_{fi,Ed}$ est la charge linéique [N/m] (égale à la charge surfacique multipliée par l'espacement des pannes) appliquée sur la panne en situation d'incendie et $q_{fi,Rd}$ est la résistance de calcul des pannes après 15 minutes d'exposition au feu normalisé (avec A_s : section nette de la panne, f_y : limite d'élasticité de cette panne et L : distance entre portiques).

En considérant l'espacement entre pannes maximal, à savoir 3 m, la charge appliquée en situation d'incendie sur les pannes est :

$$q_{fi,Ed} = [0,25 \times 3,0 + 0,13] + 0,2 \times [0,36 \times 3,0] = 1,04 \text{ kN/m}$$

La résistance de calcul des pannes à 15 minutes d'exposition au feu normalisé est donnée par :

$$q_{fi,Rd} = 0,16 \times \frac{A_s f_y}{L} = 0,16 \times 1640 \times \frac{235}{8000} = 7,71 \text{ N/mm}$$

Soit $q_{fi,Rd} = 7,71 \text{ kN/m}$

On constate facilement que la relation $q_{fi,Ed} \leq q_{fi,Rd}$ est vérifiée.

Selon le guide R15, il est également nécessaire de s'assurer que les assemblages de continuité et les assemblages des pannes sur les traverses ou les ramasse-pannes peuvent assurer la transmission des efforts de traction induits par la mise en chaînette des pannes. Dans le cas présent, le cas le plus critique est celui de l'assemblage des pannes sur les ramasse-pannes qui est réalisé par simple boulonnage des semelles, à l'aide de deux boulons. Dans ce cas, l'effort de traction est donné par :

$$N_{fi,Ed} = 1,29 \times q_{fi,Ed} \times L = 1,29 \times 1,04 \times 6 = 8,01 \text{ kN}$$

En l'absence d'informations détaillées sur ces boulons, il est supposé que les assemblages sont réalisés avec deux boulons M12 de qualité 4.6 (correspondant au diamètre minimal et à la qualité minimale des boulons pouvant être utilisés en construction métallique).

La résistance au feu des assemblages dépend principalement de la résistance au cisaillement des boulons utilisés. A 15 minutes d'exposition au feu normalisé, elle est donnée par :

$$F_{v,fi,Rd} = 2 \times k_{y,\theta} \alpha_v f_{ub} A = 2 \times 0,22 \times 0,6 \times 400 \times 84,3 = 8,9 \text{ kN}$$

où 0,220 est le facteur de réduction pour la résistance ultime des boulons à la température de 600°C qui a été jugée comme une température enveloppe de la température atteinte par les boulons à 15 minutes d'exposition au feu conventionnel.

Étant donné que $N_{fi,Ed} \leq F_{v,fi,Rd}$, la résistance des assemblages est suffisante et la stabilité au feu de degré R15 des pannes est vérifiée.

4.4 VÉRIFICATION DES CONTREVENTEMENTS

Les contreventements sont dimensionnés à froid pour reprendre les efforts dus au vent avec un coefficient de pondération de 1,5xW, alors qu'un coefficient de 0,2xW est utilisé pour le dimensionnement au feu. Ainsi, le niveau de chargement des contreventements à l'incendie est 0,14. Comme la température des éléments de structure reste inférieure à 740 °C après 15 minutes (ISO 834 à t=15 min est de 739 °C), le coefficient de réduction de l'acier pour la limite d'élasticité est de 0,18, valeur qui est supérieure au niveau de chargement. Par conséquent, les contreventements sont stables au feu 15 minutes.

4.5 VÉRIFICATION DES PANS DE FER

4.5.1 Ramasse-pannes en UPN 100

La stabilité au feu des ramasse-pannes peut être jugée satisfaite si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$q_{fi,Ed} \leq q_{fi,Rd}$$

où $q_{fi,Ed}$ est la charge linéique [N/m] (égale à la charge surfacique multipliée par l'espacement des pannes) appliquée sur ramasse-pannes en situation d'incendie et $q_{fi,Rd}$ est la « résistance de calcul » des ramasse-pannes [N/m] après 15 minutes d'exposition au feu normalisé.

En considérant la combinaison d'actions en situation d'incendie $q_{fi,Ed} = G + 0,2 \times S$ et un espacement entre ramasse-pannes et portiques de 6 m, la charge linéique appliquée en situation d'incendie sur les ramasse-pannes est donnée par la relation suivante :

$$q_{fi,Ed} = [0,25 \times 6,0/2 + 0,106] + 0,2 \times [0,36 \times 6,0/2] = 1,072 \text{ kN/m}$$

La « résistance de calcul » en situation d'incendie des ramasse-pannes peut être évaluée par une analyse plastique, en considérant un mécanisme de ruine avec l'apparition successive de deux rotules plastiques en partie de rive (sur deux travées), la première rotule plastique se formant soit au droit de l'appui intermédiaire, soit en travée de rive (cf. Figure 18).

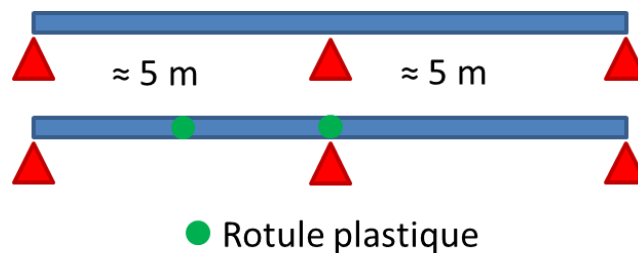


Figure 18 : Mécanisme de ruine des ramasse-pannes

Sur la base de ce principe, la résistance de calcul des ramasse-pannes peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$q_{fi,Rd} = \frac{2M_{pl,\theta}}{L^2} \times (3 + 2 \times \sqrt{2}) = \frac{2W_{pl} \times f_y \times k_{y,\theta}}{L^2} \times (3 + 2 \times \sqrt{2}) = 1,450 \text{ kN/m}$$

Où

- $\Theta=684^\circ\text{C}$ est la température atteinte dans les ramasse-pannes à 15 minutes d'exposition au feu normalisé ;
- $k_{y,\theta} = 0,27$ est le facteur de réduction pour la limite d'élasticité de l'acier à la température de 684°C ;
- $W_{pl,y} = 49,0 \text{ cm}^3$ pour un UPN 100 ;
- $L=5\text{m}$ est l'espacement entre potelets

Étant donné que $q_{fi,Ed} \leq q_{fi,Rd}$, la stabilité au feu de degré R15 des ramasse-pannes est vérifiée.

4.5.2 Potelets le long des murs coupe-feu

Les potelets des pans de fer situés de part et d'autre des murs coupe-feu sont des IPE 220. Ils ont une hauteur de 9 m au maximum et sont reliés entre eux par une barre métallique située à 3 m du sol environ, limitant la longueur de flambement selon l'axe faible à 6 m maximum.

Selon l'EN 1993-1-2, la résistance au feu R15 des potelets peut être jugée satisfaite si l'échauffement de ces éléments après 15 minutes d'exposition au feu normalisé $T_{15\text{min}}$ reste inférieur à leur température critique T_{crit} (définie comme la température au-delà de laquelle l'élément n'est plus susceptible de supporter les charges mécaniques qui lui sont appliquées pour la situation de l'incendie).

En considérant la combinaison d'actions en situation d'incendie, $q_{fi,Ed} = G + 0,2 \times S$, l'effort de compression maximal repris par les potelets en situation d'incendie peut être estimé à :

$$N_{fi,Ed} = 6 \times 4 \times (0,25 + 0,2 \times 0,36) = 7,73 \text{ kN}$$

Pour un IPE 220 de nuance d'acier S235 en compression simple, la température critique est :

$$T_{crit} = 832^\circ\text{C}$$

Par ailleurs, l'échauffement IPE 220 exposé au feu sur ses 4 faces est de 683 °C au bout de 15 minutes d'exposition au feu normalisé.

Par conséquent :

$$T_{15min} \leq T_{crit}$$

Les potelets en IPE 220 sont donc stables au feu pendant 15 minutes au moins.

4.6 POTELETS EN PIGNONS DU BÂTIMENT

Les potelets des pans de fer situés le long des pignons du bâtiment sont également des IPE 220. Ils sont espacés au maximum de 6 m.

Pour ces potelets, les analyses doivent être effectuées en considérant les charges de vent et la combinaison de charges suivante :

$$G + 0,2 \times W$$

L'action due au vent est réévaluée selon l'Eurocode 1 [32] sur la base des hypothèses suivantes :

- Région de vent n°2, pour laquelle la pression dynamique de référence est $q_{b,0} = 0,35 \text{ kN/m}^2$
- Les coefficients de saison et de direction c_s et c_d sont choisis, de manière sécuritaire, égaux à 1.
- Le bâtiment a une hauteur de 10 m et situé en catégorie de terrain IIIb : Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers. Le coefficient d'orographie est donc pris égal à 1,0. Ainsi :

$$c_e(z) = 1,411$$

- La hauteur du bâtiment est inférieure à sa longueur et à sa largeur. Par conséquent, $q_p(z)$ est uniforme dans la hauteur du bâtiment et vaut 0,494 kN/m².
- Les pressions extérieures (w_e) ou intérieures (w_i) à appliquer à chaque surface sont calculées en considérant que toutes les parois extérieures (façades, couvertures,...) sont imperméables.
- Le coefficient de pression extérieure est fixé de manière sécuritaire à -1,2 et le coefficient de pression intérieure est fixé à -0,3. Par conséquent la pression dynamique de pointe donnant les charges de vent est égale à :

$$q_p(z) = (-1,2 - 0,3) \times 0,494 = -0,741 \text{ kN/m}^2$$

Selon l'EN 1993-1-2, la résistance au feu R15 des potelets peut être jugée satisfaite si l'échauffement T_{15min} de ces éléments après 15 minutes d'exposition au feu normalisé reste inférieur à la température critique T_{crit} .

En considérant une couverture multicouches de 25 kg/m² et un bardage de 15 kg/m², l'effort de compression maximal en situation d'incendie appliqué sur les potelets de façade peut être estimé à :

$$N_{fi,Ed} = 10 \times 6 \times 0,15 + 6 \times 4 \times 0,25 = 15 \text{ kN}$$

Pour un espacement entre potelets de 6 m, le moment de flexion maximal dû aux effets du vent peut être calculé de manière sécuritaire comme suit :

$$M_{fi,Ed} = \frac{q_{fi,Ed} \times L^2}{8} = \frac{0,2 \times 0,741 \times 6 \times 81}{8} = 9 \text{ kN.m}$$

Pour un IPE 220 de nuance d'acier S235, comprimé et fléchi, la température critique est :

$$T_{\text{crit}} = 679 \text{ °C}$$

Par ailleurs, l'échauffement d'un IPE 220 exposé sur ses 3 faces est de 662°C au bout de 15 minutes d'exposition au feu normalisé.

Par conséquent :

$$T_{15\text{min}} \leq T_{\text{crit}}$$

Les potelets en IPE 220 sont donc stables au feu pendant 15 minutes au moins.

4.7 CONCLUSIONS

La stabilité au feu de degré R15 (15 minutes sous conditions d'incendie normalisé) des éléments porteurs de la structure métallique du bâtiment « stockage » est vérifiée.

5 ETUDE DU COMPORTEMENT DU BÂTIMENT « MESSAGERIE » SOUS INCENDIES RÉELS

5.1 OBJECTIFS DE SÉCURITÉ ET CRITÈRES ASSOCIÉS

Dans le cadre d'une démarche ISI, les exigences en matière de sécurité incendie sont déclinées selon les trois niveaux suivants :

- Objectifs de Sécurité ;
- Exigences Fonctionnelles ;
- Critères de Performance.

Dans notre cas, les objectifs sont d'éviter toute mise en danger des occupants, à savoir les salariés de l'entreprise et les services de secours.

En cas de survenue d'un incendie, les dispositions générales doivent permettre une évacuation de l'établissement sans que les occupants aient à subir les effets de l'incendie. Les conditions de tenabilité ne doivent pas varier de façon brutale avant l'évacuation de l'établissement. Cela peut s'exprimer par les exigences suivantes :

- Une visibilité permettant de distinguer les sorties ;
- Une cinétique de l'incendie compatible avec l'évacuation.

Les secours doivent eux pouvoir effectuer une reconnaissance dans l'établissement et évacuer les personnes présentes.

Afin de satisfaire l'objectif de protection des personnes et les exigences fonctionnelles associées, les critères d'acceptation suivants sont définis (avant la fin de l'évacuation) :

- La température à 1,8 m du sol ne doit pas être supérieure à 60°C dans le bâtiment ;
- La distance de visibilité à 1,8 m du sol ne doit pas être inférieure à 10 m ;
- Le flux radiatif incident à 1,8 m du sol ne doit pas être supérieur à 2,5 kW/m² ;
- Absence de ruine de la structure à l'endroit où les occupants ainsi que les services de secours seraient encore présents.

Indiquons que concernant les risques liés au feu et aux fumées, outre la perte de visibilité et le risque thermique, il existe aussi un risque toxique, lié aux espèces chimiques présentes dans les fumées. Cependant, aucun critère de toxicité n'a été retenu car dans ce genre de bâtiment (grand volume unique), ce risque est tributaire d'une diminution de la hauteur libre sous la couche de fumées, et il sera nécessairement couvert par le critère de visibilité (si une personne inhale des gaz toxiques, c'est qu'elle se trouve dans les fumées et donc qu'elle a déjà subi une perte de visibilité importante).

5.2 SÉLECTION DES SCÉNARIOS D'ÉTUDE

Des scénarios d'incendie d'étude doivent être sélectionnés pour évaluer le niveau de sécurité du bâtiment. Un scénario d'incendie est défini comme la description des éléments clef du déroulement possible d'un incendie, compte tenu des dangers identifiés : contexte, inflammation, développement, propagation, décroissance et extinction de l'incendie. Le détail d'un scénario consiste en un enchaînement chronologique et logique d'évènements conditionnant le déroulement de l'incendie.

Le nombre de scénarios d'incendie susceptibles de se réaliser pour un bâtiment peut être considérable. Par conséquent, l'analyse des risques visera à définir les scénarios les plus défavorables utilisés pour l'évaluation du risque incendie.

Concernant les dangers, l'analyse est facilitée par le fait que :

- Le stockage est supposé identique dans toute la cellule, puisqu'on utilise des palettes type 1510 ;
- On considère dans tous les cas la possibilité de l'acte malveillant, permettant ainsi de supposer la possibilité d'une inflammation sur n'importe quel matériau combustible, quelle que soit sa localisation dans l'entrepôt.

S'agissant maintenant de l'enchaînement d'évènements conditionnant le déroulement de l'incendie, les scénarios se limiteront à la phase d'inflammation des premiers éléments combustibles, et donc de leur localisation dans l'entrepôt. En effet, les phases de développement du feu le long d'un îlot, de propagation vers d'autres îlots, ainsi que les évènements ayant trait au désenfumage ou à la fusion des éléments d'éclairage seront directement traités par les simulations numériques (cf. § 5.3.2).

La sélection des scénarios d'incendie se résume alors à choisir judicieusement les départs du feu de manière à être majorants et réalistes :

- Du point de vue du comportement au feu de la structure porteuse (exigences n° 1 et 2) ;
- Vis-à-vis de l'évacuation des personnes (exigence n°3).

Les scénarios d'étude sélectionnés sont indiqués sur la Figure 19. Les paragraphes suivants indiquent pourquoi ils ont été choisis.

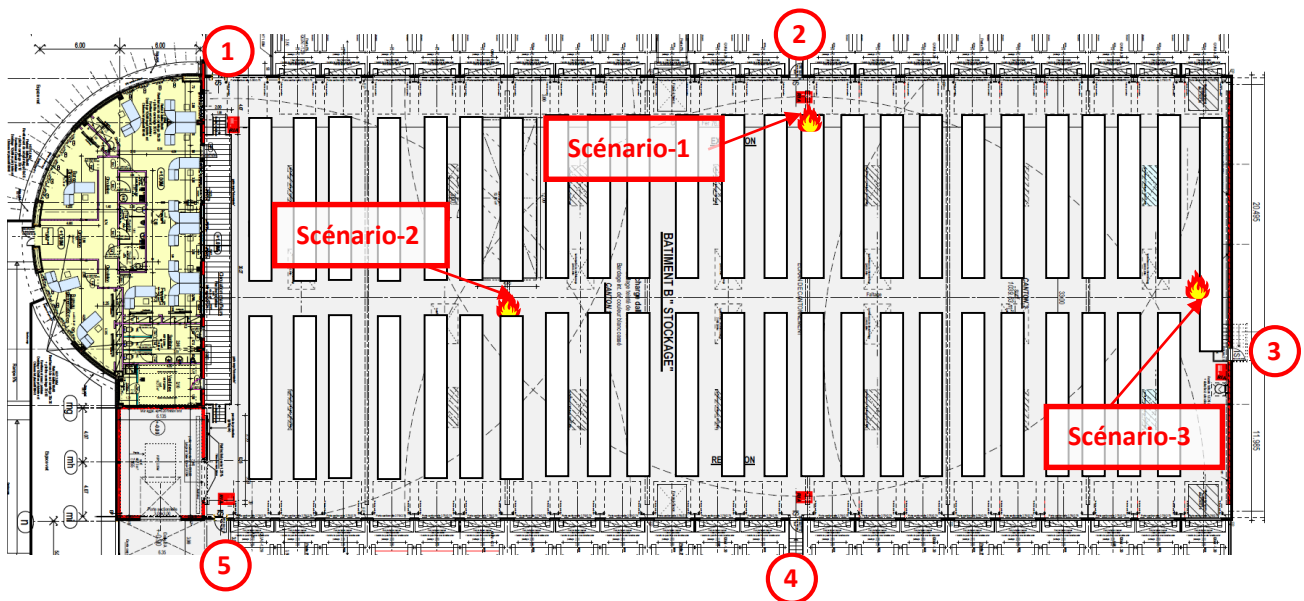


Figure 19 : Position du départ du feu pour chaque scénario

5.2.1 Scénarios impactant la structure porteuse

En première approche, on peut considérer que les scénarios d'incendie apparaissant comme défavorables vis-à-vis du risque d'effondrement de la structure sont ceux :

- avec un départ de feu à proximité d'un poteau de portique ;
- avec un départ de feu pouvant impacter un portique à mi-portée.

Ces considérations faites, 3 scénarios d'incendie sont retenus :

- Scénario 1 : Départ du feu en bout d'îlot, à proximité du poteau du portique de la file 5 au niveau de la sortie de secours 2 ;
- Scénario 2 : Départ du feu en bout d'îlot au niveau de l'allée centrale, sous un portique à mi-portée ;
- Scénario 3 : Départ du feu dans le rack accolé à la paroi nord, à mi-portée du portique de la file 8.

5.2.2 Scénarios d'évacuation

En ce qui concerne l'évacuation des personnes, plusieurs hypothèses doivent d'abord être formulées. Le temps nécessaire à l'évacuation dépend en effet de plusieurs processus, qui se décomposent en la somme [16] :

- Du temps écoulé entre l'initiation et la détection du feu ;
- Du temps de pré-mouvement, c'est-à-dire le temps nécessaire pour prendre conscience de l'urgence et pour effectuer une série d'activités avant la phase de cheminement d'évacuation ;
- Du temps de déplacement, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que les occupants se rendent dans un endroit sécurisé.

Afin que l'étude soit sécuritaire, les hypothèses conduisant à des temps d'évacuation plus longs qu'en réalité ont été privilégiées, à savoir :

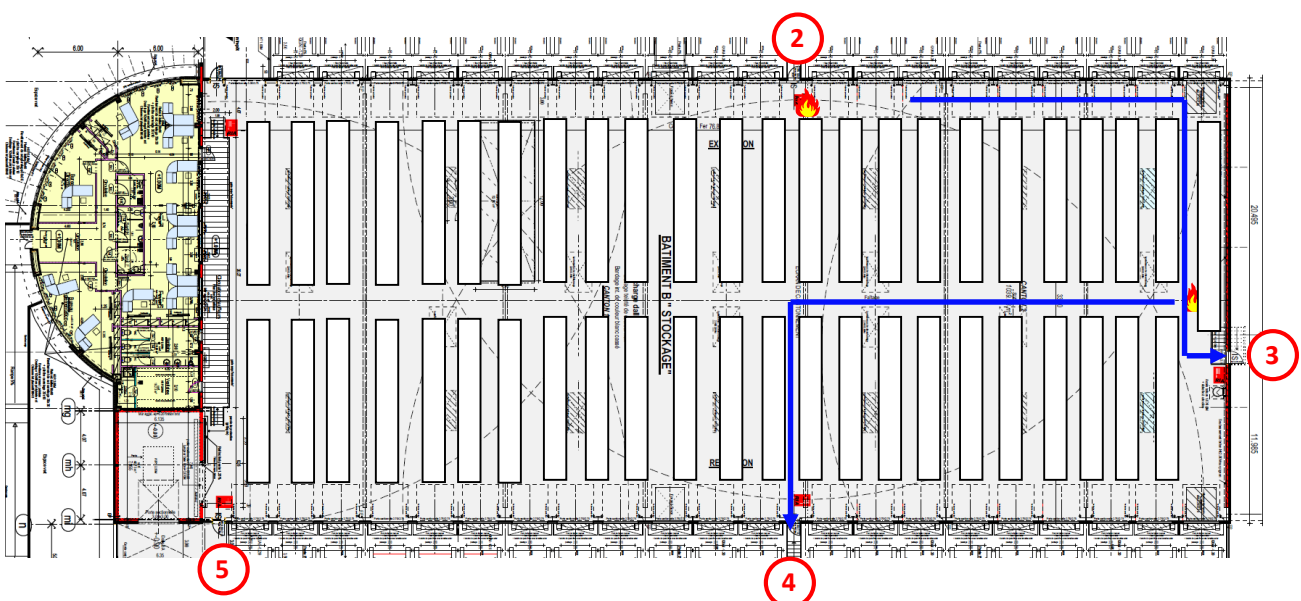
- Un temps de détection de 3 minutes, sécuritaire car une détection de l'incendie est réalisée par l'installation d'un système de détection optique et thermique qui quadrille la cellule et qui actionne l'alarme d'évacuation immédiate audible en tout point du bâtiment ;
- Un temps de pré-mouvement de 1 minute, sécuritaire car il s'agit ici d'un bâtiment simple rectangulaire à un seul niveau, permettant de prendre rapidement connaissance de l'incendie ;
- Une densité de personnes présentes dans chaque cellule égale à 0,02 p/m² soit 60 personnes, ce qui est sécuritaire compte-tenu que l'effectif maximal dans l'entrepôt est d'environ 40 personnes.

En ce qui concerne le temps de déplacement, celui-ci sera obtenu à partir des simulations numériques (cf. § 5.2.2). La principale hypothèse concerne la vitesse de déplacement des personnes en l'absence de fumées, qui est fixée à 1 m/s. Un calcul simplifié du temps de déplacement sera également réalisé, sur la base des distances maximales à parcourir pour évacuer dans chaque cellule.

L'évacuation des personnes sera alors étudiée dans les 3 scénarios précédents (cf. § 5.2.1) comprenant deux situations défavorables vis-à-vis de l'évacuation. En effet, pour les scénarios 1 et 3, le départ du feu se situe respectivement à proximité des issues de secours 2 et 3, interdisant alors leur accès.

Pour ces 2 scénarios, on peut également calculer les distances maximales d'évacuation, comme au § 3.2.3. Les valeurs obtenues sont (trajets en bleu sur la Figure 20) :

- Scénario 1 : 41 m
- Scénario 3 : 46 m



5.3 SIMULATIONS DU DÉVELOPPEMENT DU FEU ET DE L'ÉVACUATION

5.3.1 Logiciels utilisés

5.3.1.1 Modélisation du développement du feu

Le code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS) version 5.5.3, développé par le NIST Building and Fire Research Laboratory [17], a été utilisé pour cette étude. C'est un modèle CFD (« Computational Fluid Dynamics ») de simulation numérique tridimensionnelle destiné à prédire les écoulements représentatifs des situations d'incendie, qui a fait l'objet de nombreuses validations [18].

Les modèles CFD sont des modèles qui divisent le domaine fluide étudié en un grand nombre de volumes de contrôle ou « mailles » au niveau desquels les grandeurs sont supposées uniformes. À chaque maille sont attribuées des inconnues représentant les valeurs des grandeurs physiques recherchées. Il s'agit alors de résoudre numériquement, de manière locale et instationnaire, des équations traduisant les lois d'échange et de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie.

Les simulations numériques permettent d'obtenir les champs de température des gaz chauds, des flux thermiques, des fumées, ainsi que les champs de vitesse en fonction du temps. L'ensemble de ces variables peut être visualisé à l'aide du logiciel SmokeView également développé par le NIST.

5.3.1.2 Modélisation de l'évacuation des personnes

Le logiciel EVAC est utilisé pour simuler l'évacuation des personnes [19]. C'est un outil développé par le Centre de recherche technique de Finlande (VTT), prévu pour fonctionner conjointement avec le code de calcul FDS et bénéficier ainsi de ses prédictions concernant les conditions de tenabilité dans les bâtiments.

Le modèle d'évacuation utilisé par EVAC nécessite, pour chaque niveau du bâtiment, la création d'un « champ de directions » calculé à l'aide d'un maillage 2D indépendant du maillage utilisé par FDS. Dans cette approche, les portes sont vues comme des bouches d'extraction, le champ de vecteurs étant la solution d'un problème d'écoulement incompressible. Ce champ permet de déterminer la direction préférentielle de chaque personne en fonction de sa position dans le plan.

Les forces qui s'appliquent sur chaque individu sont de nature physique (forces de contact, gravité, etc.) et psychologiques (effets de l'environnement et interaction avec les autres personnes). Chaque occupant est traité de façon individuelle pendant l'évacuation, ce qui lui permet d'avoir son propre comportement.

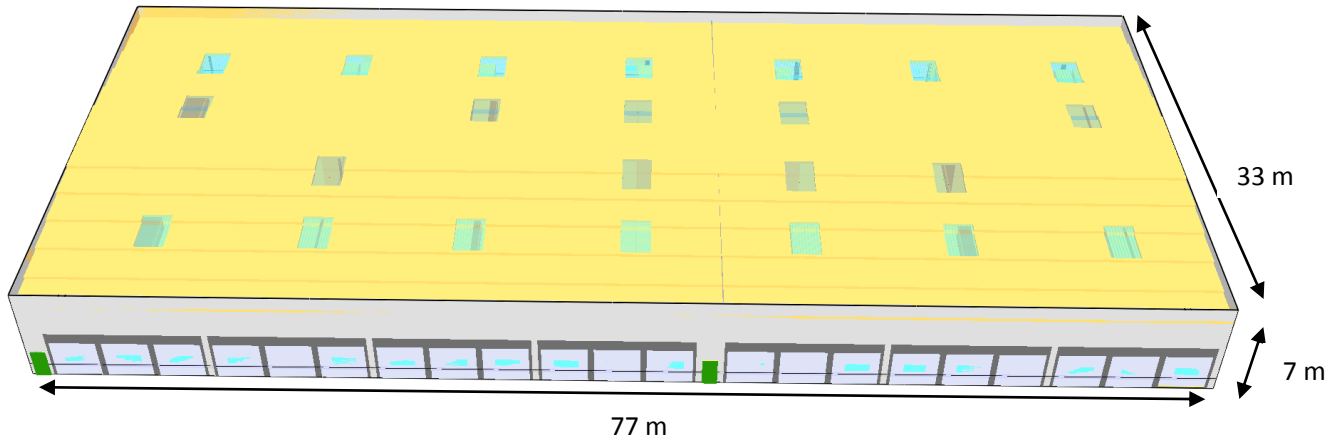
L'effet des conditions liées au feu est pris en compte en ajustant la vitesse de déplacement en fonction de la densité des fumées ou en modifiant le choix des sorties selon leur visibilité : ce choix est en effet réalisé par un classement de préférences basées sur des critères de visibilité, de familiarité des sorties (défini au préalable par l'utilisateur), et sur les conditions liées au feu.

5.3.2 Domaine et hypothèses de modélisation

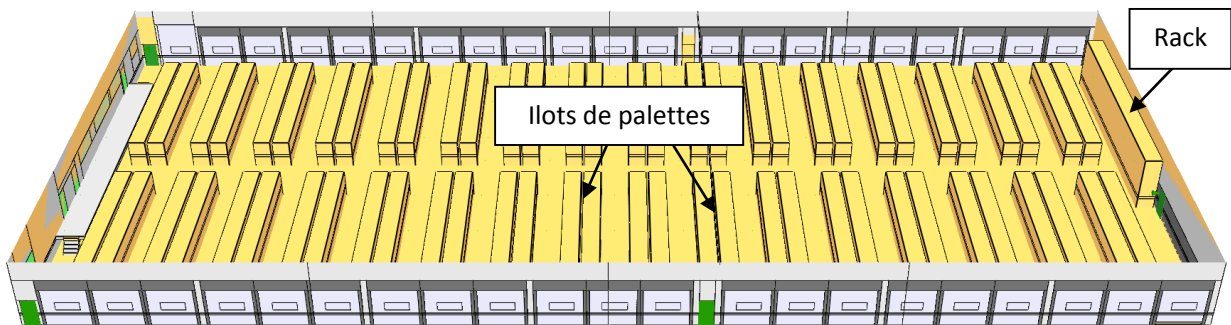
Le domaine de modélisation couvre la totalité de la cellule de stockage (Figure 21). Les différents éléments modélisés sont les suivants :

- La couverture, composée d'un bac acier avec une laine de roche d'épaisseur 40 mm, de polystyrène extrudé d'épaisseur 80 mm et d'une membrane pvc d'épaisseur 1,2 mm ;
- Les parois en bardage double peau, avec isolant laine de verre d'épaisseur 60 mm ;
- Les murs coupe-feu ;
- Les lanterneaux d'éclairage naturel, en polycarbonate d'épaisseur 16 mm ;
- Les lanterneaux de désenfumage, avec fusibles thermiques tarés à 93°C ;

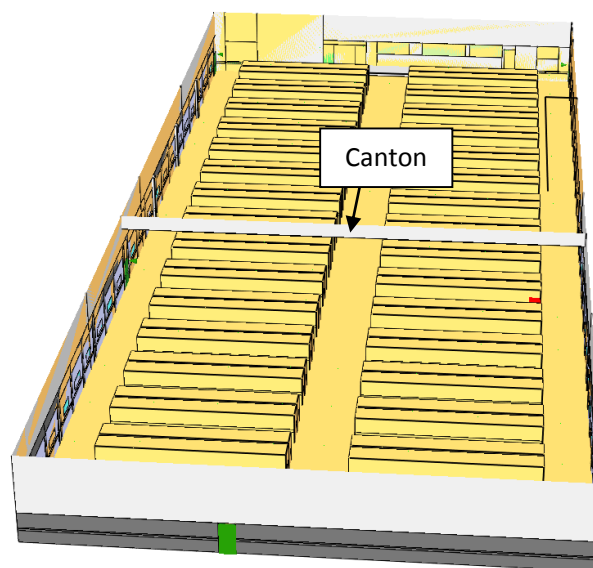
- L'écran de cantonnement (retombées de 1 m de hauteur) ;
- Les matériaux combustibles présents dans les îlots et le rack ;
- La hauteur de stockage est fixée à 2 m dans les îlots et à 4 m pour le rack ;
- Les portes de sortie (les sorties éventuelles par les quais de chargement n'ont pas été prises en compte).



(a)



(b)



(c)

Figure 21 : Domaine de modélisation

Les hypothèses de modélisation utilisées pour le calcul sont les suivantes :

- Les mailles discrétisant le volume modélisé sont toutes cubiques d'arête 20 cm ;
- Pour les bardages, les propriétés thermiques de l'acier (conductivité et chaleur spécifique) sont variables en fonction de la température, d'après les valeurs de l'Eurocode 3 partie 1-2 [31] ;
- Les lanterneaux d'éclairage dans toute la cellule sont modélisés par du polycarbonate et disparaissent lorsque leur température de surface atteint 250°C (cette valeur représente la température de fusion du polycarbonate), alors que pour les lanterneaux de désenfumage, ceux-ci disparaissent lorsque la température d'un fusible modélisé atteint 93°C ;
- Les matériaux combustibles stockés sur palettes en îlots sont modélisés par des parallélépipèdes, dont les propriétés reprennent les caractéristiques moyennes des palettes types 1510 définies dans la méthode Flumilog [34], à savoir :
 - Une puissance palette de 1525 kW possédant une énergie de 4117,5 MJ ;
 - Un total de matières combustibles entreposées équivalent bois de 154,5 tonnes ;
 - La palette type 1510 possède 25 kg de bois de palette. La masse des produits plastiques n'excède pas la moitié de la masse des produits contenus sur la palette (le bois de la palette étant exclu) et le reste est composé de produits cellulosiques ou incombustibles.
 - Un dégagement de chaleur surfacique de 220 kW/m², représentatif d'un stockage contenant à la fois des matériaux cellulosiques, plastiques, et incombustibles [34] ;
 - Une température d'inflammation de 250°C, correspondant à la température d'inflammation du bois par défaut [35], qui est le premier élément combustible en feu au niveau du stockage.
- Au début de la simulation (quel que soit le scénario), le dégagement de chaleur est imposé sur une surface de rack de 2 m², en prenant comme hypothèse la présence de produits inflammable [24] ; ensuite, la propagation du feu se fait de maille en maille dès que le critère de température est atteint.

En ce qui concerne la modélisation de l'évacuation, les personnes sont positionnées dans les zones de circulation de l'entrepôt de manière aléatoire par le logiciel EVAC (Figure 22), et leur encombrement est représenté par un cercle de diamètre 0,54 m.

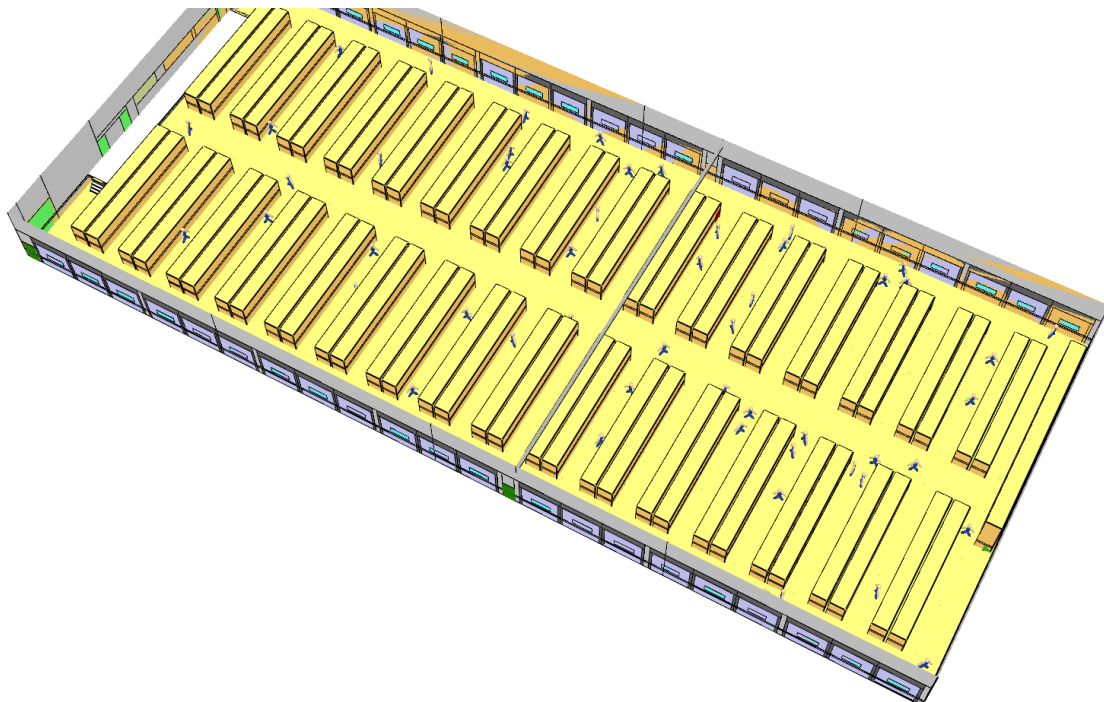


Figure 22 : Exemple de positionnement aléatoire des personnes dans l'entrepôt

5.3.3 Résultats des simulations

Toutes les simulations du développement du feu sont conduites pendant 25 minutes seulement, ce temps étant suffisant pour estimer les conditions de tenabilité dans le bâtiment et déterminer le temps de stabilité au feu de la structure porteuse (cf. § 5.4.2.2). L'ensemble des résultats est donné de manière détaillée en annexe. Le Tableau 6 rassemble les principales informations, à savoir :

- Le temps d'évacuation, soit le temps écoulé depuis le départ du feu pour que tous les occupants aient évacué. Ce temps est obtenu de deux manières :
 - Par un calcul simplifié basé sur la somme du temps de détection, de pré-mouvement et d'évacuation, ce dernier étant calculé à partir de la distance maximale pour évacuer (cf. § 3.2.3 et 5.2.2) et de la vitesse de déplacement (1 m/s),
 - Par le logiciel EVAC.
- Le temps mis pour atteindre le critère de température de 60°C à 1,8 m de hauteur ;
- Le temps mis pour atteindre le critère de distance de visibilité de 10 m à 1,8 m de hauteur ;
- Le temps mis pour atteindre le critère de flux thermique à 2,5 kW/m², à 1,8 m de hauteur au niveau des issues.

Scénario	Temps d'évacuation (min)		Temps pour température < à 60°C (min)	Temps pour distance de visibilité < à 10 m (min)	Temps pour flux thermique < à 2,5 kW/m ² (min) ¹
	Méthode simplifiée	EVAC			
1	4,68	5,2	21	> 25	> 25
2	4,63	5	24	25	> 25
3	4,77	5,8	23	20	> 25

Tableau 6 : Synthèse des résultats

Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Risques pour les personnes : Quel que soit le scénario, les temps d'évacuation sont largement inférieurs aux temps pour lesquels les conditions de tenabilité sont compromises, indiquant que dans tous les cas, la cinétique de l'incendie est compatible avec l'évacuation des personnes. Lorsque l'incendie démarre à proximité d'une issue de secours (scénarios 1 et 3), on peut noter logiquement que le temps d'évacuation est légèrement augmenté.
- Influence du départ du feu dans la cellule : On peut remarquer, en comparant les trois scénarios, que la perte des conditions de tenabilité survient à des instants légèrement différents. Lorsque l'origine du foyer de l'incendie se situe en bout d'îlot proche de la façade (scénario 1), c'est le critère de température à 60°C qui n'est plus respecté le premier. Par contre, si l'origine du foyer de l'incendie se situe au sein du rack (scénario 3), c'est le critère de visibilité qui est atteint en premier. Globalement, quel que soit l'emplacement du foyer dans les îlots, le risque pour les personnes est le même, il est atteint aux alentours des 20 minutes.

¹ Lorsque le feu démarre à proximité d'une issue de secours, le flux mesuré à cet endroit n'est pas pris en compte dans la détermination du temps de tenabilité

- Développement du feu dans la cellule : Comme le montrent les figures disponibles en annexe, dans tous les scénarios l'incendie reste localisé pendant la durée des simulations (25 minutes), l'incendie généralisé survenant plus tard. Cela est dû au fait que la propagation du feu dans la cellule est relativement lente : en effet, comme la hauteur des îlots est faible, le feu se propage rapidement en haut de l'îlot mais ensuite, la puissance de l'incendie étant faible, la propagation latérale est plus lente.

Concernant la détermination du temps d'évacuation, on peut signaler que la modélisation avec EVAC est plus sécuritaire que la méthode par calcul simplifié de globalement 30 secondes environ, ce qui est dû au fait que le modèle prend en compte d'une part une diminution de la vitesse de déplacement en fonction des fumées, et d'autre part l'interaction physique entre les personnes.

5.4 ANALYSE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE

L'analyse du comportement au feu de la structure métallique de bâtiment « messagerie » est réalisée selon la procédure de calcul structural de la partie feu de l'Eurocode 1 [25] et les méthodes de calcul de la partie feu de l'Eurocode 3 [20]. Il s'agit d'évaluer le temps de stabilité au feu et la cinétique de ruine (absence d'effondrement vers l'extérieur) de la structure porteuse du bâtiment sous condition de feu réel.

Pour chaque scénario d'incendie sélectionné (cf. 5.2), les analyses sont réalisées en deux phases successives :

- Dans un premier temps, un calcul de transfert thermique est réalisé pour estimer la distribution et l'évolution en fonction du temps des températures atteintes par les éléments de structure exposés au feu ;
- Ensuite, à partir des champs de température précédemment calculés, le comportement au feu de la structure est analysé à l'aide du logiciel aux éléments finis ANSYS. La méthode de simulation numérique qui est utilisée associe les calculs statique et dynamique et permet d'obtenir un état très avancé des déformations de la structure.

Dans le cas présent, il a été considéré comme suffisant de limiter les analyses structurales aux portiques métalliques constituant la structure principale du bâtiment.

En effet, sur la base des considérations suivantes :

- Durant la première phase de l'incendie, une couche chaude se forme sous la toiture. Les éléments de la structure de toiture sont par conséquent plus échauffés que les poteaux et présentent une résistance résiduelle plus faible ;
- Le feu restant localisé jusqu'à la ruine des premiers éléments situés au voisinage du foyer initial de l'incendie, les palées de stabilité verticales restent généralement en nombre suffisant pour assurer la stabilité latérale de la structure en situation d'incendie ;
- Du fait de leur échauffement plus rapide, les pannes sont habituellement beaucoup moins résistantes que les éléments principaux qui les supportent (portique et pans de fer). Ainsi, elles présentent rapidement une déformée de type chaînette qui génère des efforts de traction au niveau des leurs appuis sur les traverses des portiques et les ramasse-pannes des pans de fer.

Le risque de ruine vers l'extérieur de la structure du bâtiment dans le sens latéral (c'est à dire perpendiculairement aux portiques de la structure) peut être écarté.

5.4.1 Échauffement des portiques métalliques

5.4.1.1 Hypothèses du calcul thermique

Pour chaque scénario d'incendie retenu, l'évolution et la distribution en fonction du temps des températures des différents éléments constituant le portique métallique (poteaux et traverses) le plus exposé au feu sont déterminées en fonction de la température des gaz obtenus à partir des calculs réalisés avec le modèle FDS dans le précédent chapitre.

L'échauffement de chaque élément métallique est obtenu en se basant sur une procédure de couplage développée au CTICM entre les codes FDS et ANSYS. L'échauffement ainsi obtenu dépend non seulement de la position relative de l'élément analysé par rapport au foyer initial de l'incendie, en tenant compte des effets d'ombre, mais également de la massivité des profilés métalliques.

Les hypothèses suivantes sont adoptées dans les calculs de transfert thermique :

- Les échanges de chaleur entre les éléments de structure et leur environnement se font essentiellement par convection et rayonnement au niveau des surfaces exposées au feu. Afin de pouvoir calculer le flux de chaleur transmis à la surface des éléments de structure, il est nécessaire d'introduire dans l'analyse les valeurs pour le facteur de convection, l'émissivité de l'environnement (feu ou milieu ambiant) et l'émissivité des surfaces. Les valeurs adoptées sont celles de l'Eurocode 1 partie 1-2, à savoir :
 - $\varepsilon_f = 1,0$ Émissivité du feu
 - $\varepsilon_m = 0,7$ Émissivité de surface (acier, matériau protection)
 - $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2/\text{K}$ Coefficient de convection
- De par le système constructif du bâtiment, les températures des traverses des portiques métalliques sont déterminées en supposant une exposition au feu sur quatre faces. Pour les poteaux (qui sont situés en façade du bâtiment), la température est également calculée, de manière sécuritaire, en considérant une exposition au feu sur quatre faces.
- Les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique) de l'acier sont celles données dans l'Eurocode 3 partie 1-2.

5.4.1.2 Résultats des calculs thermiques

Les figures suivantes présentent les résultats des calculs de transfert thermique obtenus pour les trois scénarios d'incendie retenus. Pour chaque scénario d'incendie, sont présentés :

- d'une part les champs de température dans le portique métallique le plus exposé au feu après différentes durées d'exposition au feu, et
- d'autre part, l'évolution en fonction du temps de la température calculée en différents points le long du portique (poteaux et traverse).

A la lecture des figures relatives au scénario 1 (départ de feu à proximité du poteau P2 du portique de la file 5), on constate que :

- L'échauffement reste localisé pendant toute la durée de simulation de l'incendie. De forts gradients de température sont présents le long du portique. L'échauffement des parties de la traverse situées au-dessus du foyer de l'incendie s'échauffent à plus de 660°C après 25 minutes d'incendie tandis que l'échauffement des parties de la traverse les plus éloignées du foyer de l'incendie, situées à proximité du poteau P1 du portique, reste limité, celui-ci ne dépassant pas 150°C (cf. Figure 23).
- L'échauffement des poteaux est également limité. La température maximale atteinte dans le poteau P2 (situé à proximité du foyer de l'incendie) est inférieure à 300°C (cf. Figure 24). L'échauffement du poteau de rive P1, qui est plus éloigné du feu, est nettement plus faible, la température restant inférieure à 130°C.

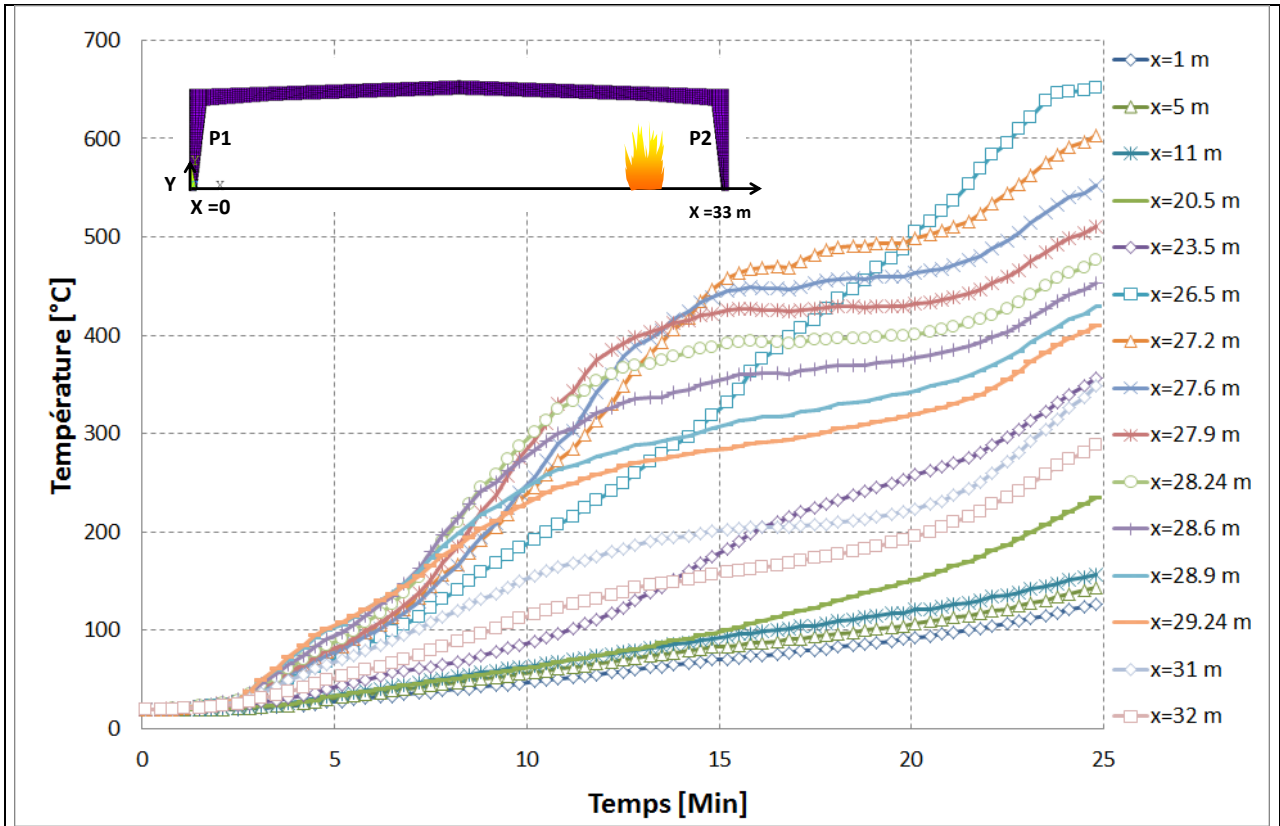


Figure 23 : Température maximale en différents points le long de la traverse pour le scénario 1

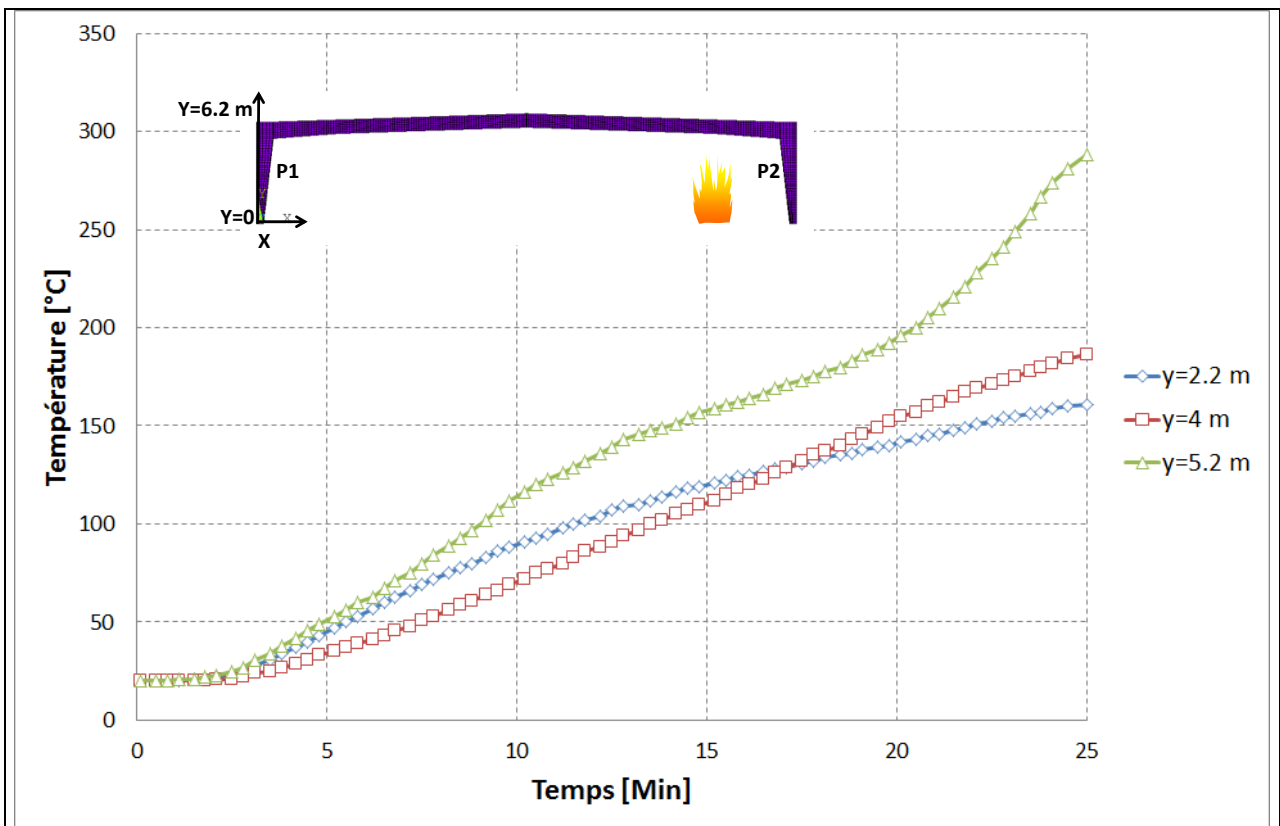


Figure 24 : Température maximale en différents points le long du poteau P2 pour le scénario 1

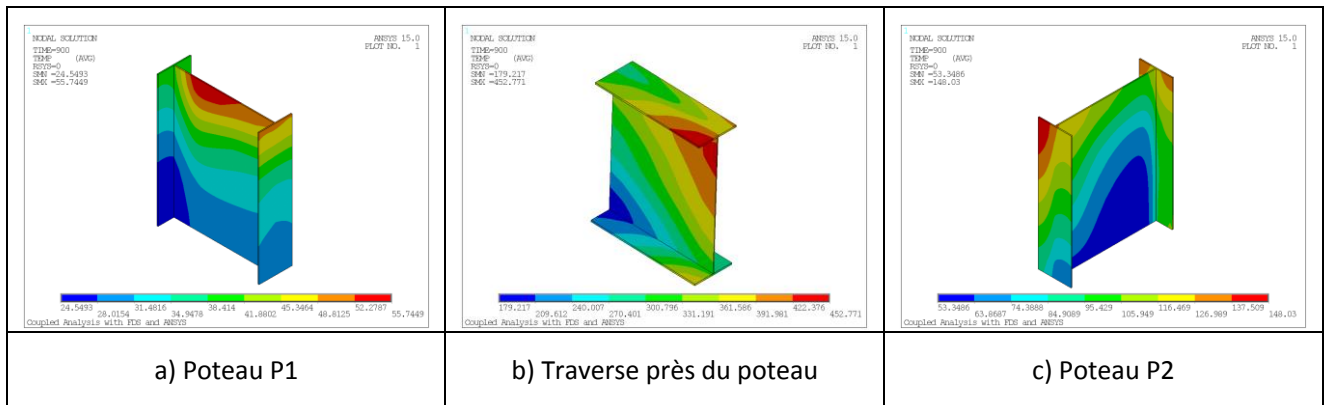


Figure 25 : Champs de température après 15 minutes d'exposition au feu sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 1

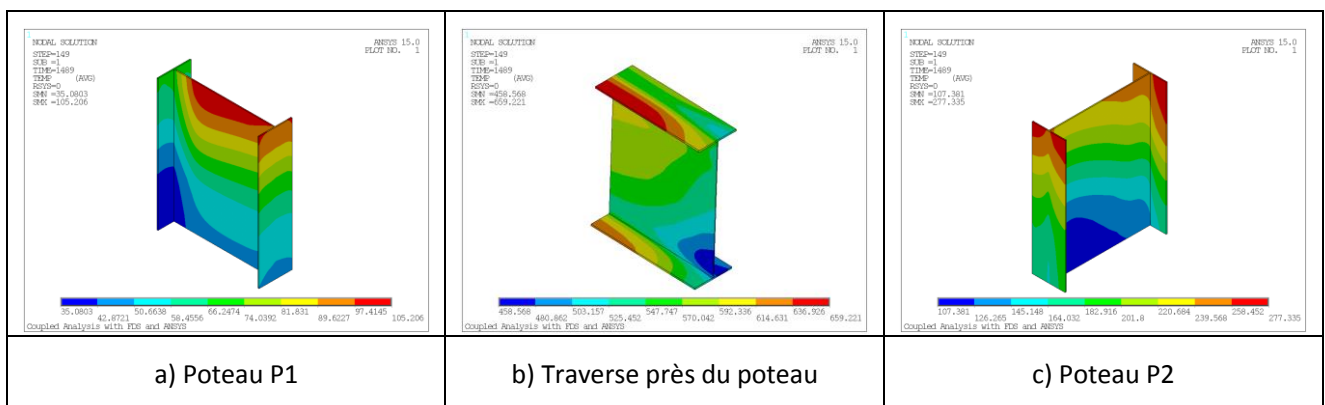


Figure 26 : Champs de température après environ 25 minutes d'exposition au feu sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 1

Pour le scénario 2 relatif à un départ de feu en bout d'îlot à mi-portée d'un portique, on constate que :

- L'échauffement reste localisé pendant toute la durée de simulation de l'incendie ;
- Les parties de la traverse situées au-dessus du foyer de l'incendie s'échauffent le plus rapidement. La température maximale atteinte par ces éléments est de 540°C environ après 25 minutes d'exposition au feu. Les parties de la traverse les plus éloignées du foyer s'échauffent beaucoup plus lentement, la température maximale ne dépassant pas 150°C (cf. Figure 27).
- Le niveau d'échauffement des poteaux, se situant à environ 16 m du foyer d'incendie, est également beaucoup moins élevé avec une température maximale qui ne dépasse pas 120°C après 25 minutes d'incendie (cf. Figure 28).

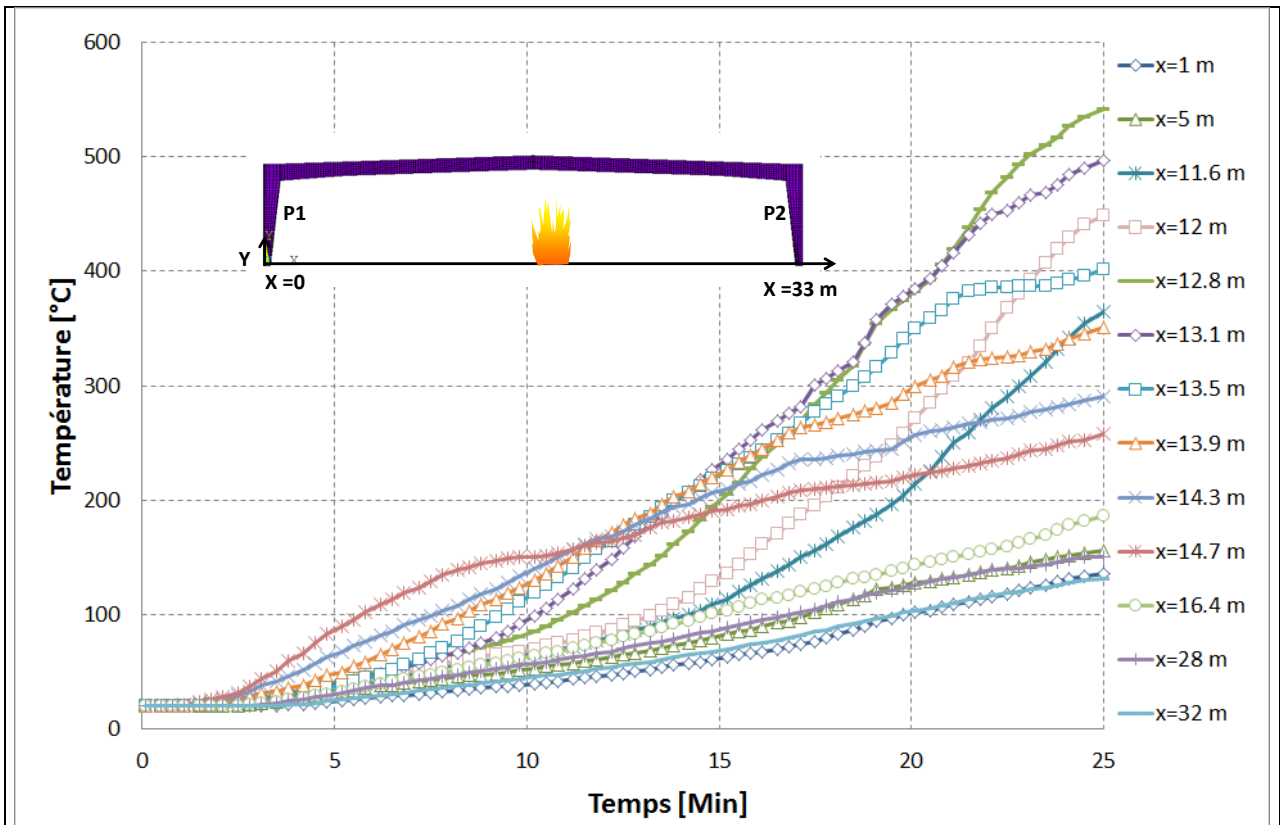


Figure 27 : Température maximale en différents points le long de la traverse pour le scénario 2

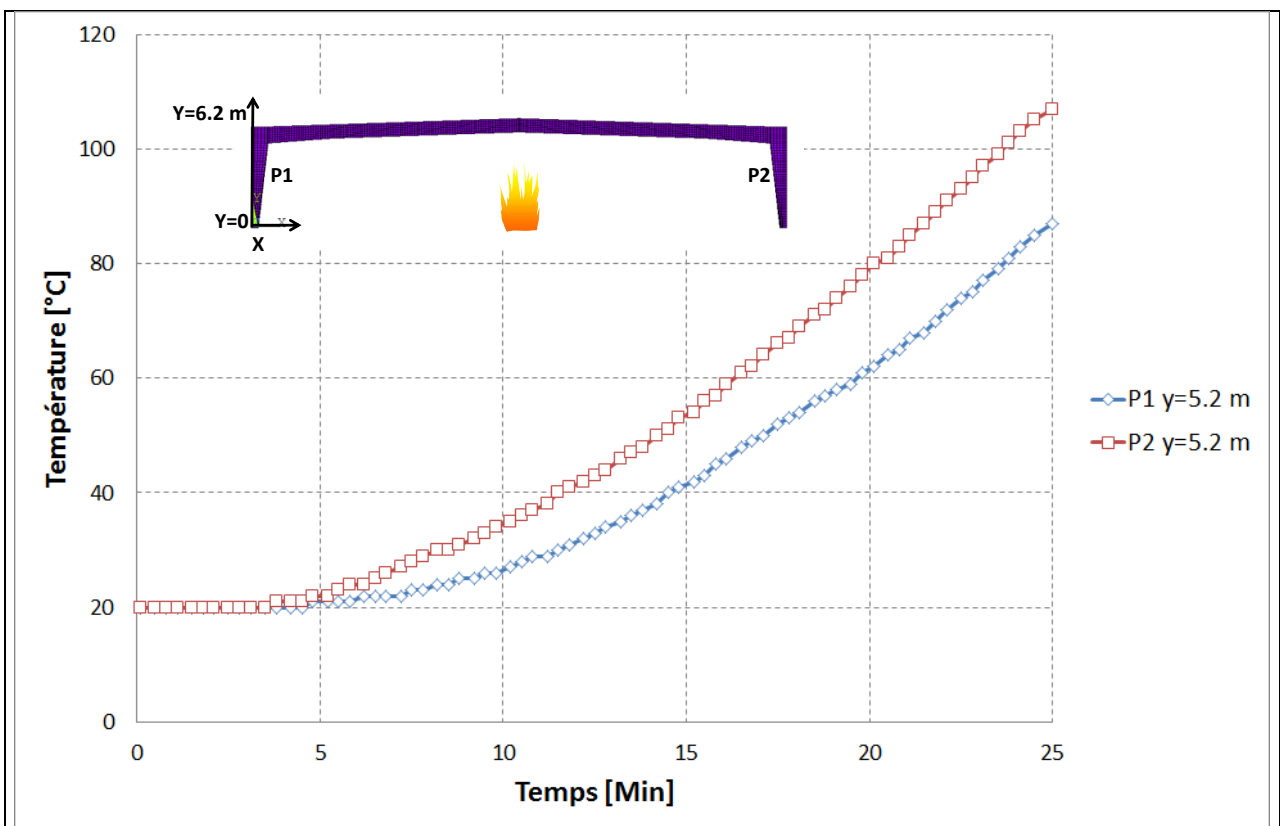


Figure 28 : Température maximale en tête des poteaux P1 et P2 pour le scénario 2

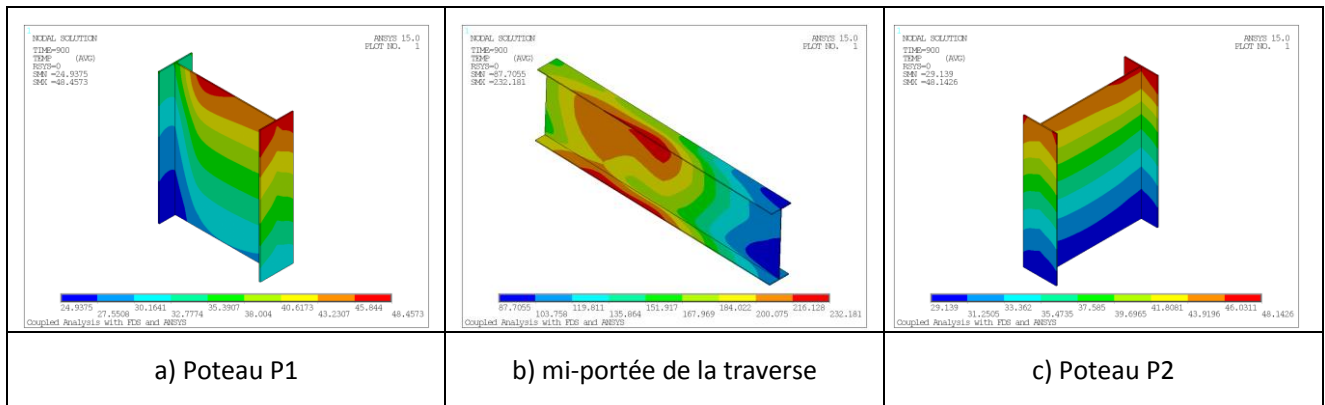


Figure 29 : Champs de température après 15 minutes d'exposition au feu sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 2

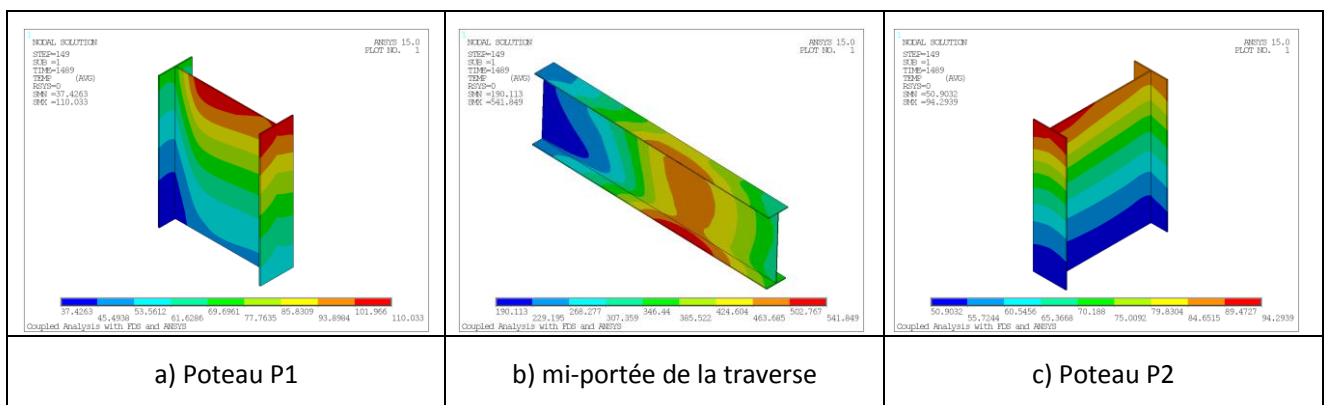


Figure 30 : Champs de température après environ 25 minutes d'exposition au feu réel sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 2

Pour le scénario 3 relatif à un départ de feu dans le rack accolé à la paroi nord, à mi-portée du portique de la file 8, on constate que :

- L'échauffement reste localisé pendant toute la durée de simulation de l'incendie.
- L'échauffement des parties de la traverse situées au-dessus du foyer de l'incendie s'échauffent plus rapidement que pour les deux autres scénarios d'incendie. Ceci s'explique par la présence de la paroi nord à proximité du portique étudié. La température maximale atteinte dans la partie centrale de la traverse est de l'ordre de 1000°C environ après 25 minutes d'exposition au feu. L'échauffement des parties de la traverse les plus éloignées du foyer de l'incendie (située au voisinage des poteaux) est plus limité. Elle reste inférieure à 200°C (cf. Figure 31).
- L'échauffement des poteaux ne dépasse pas 120°C (cf. Figure 32).

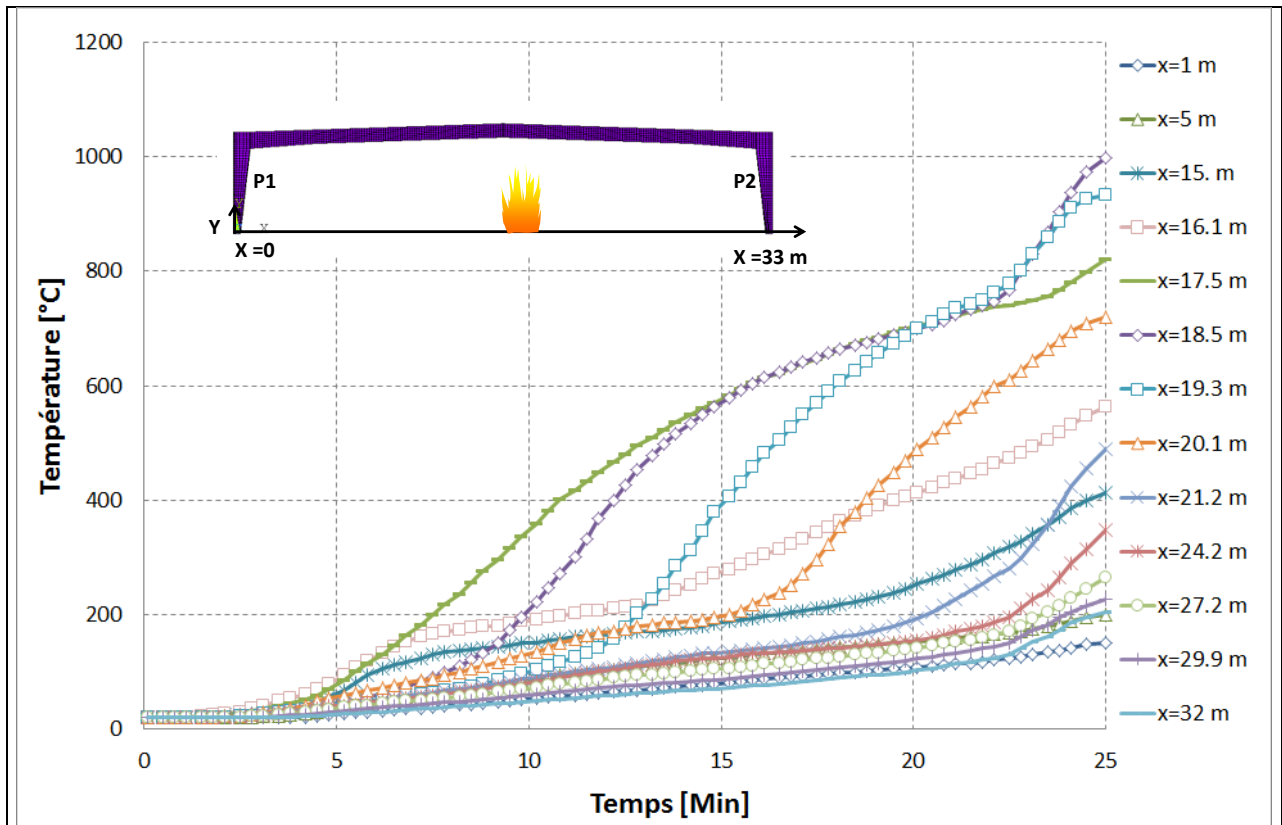


Figure 31 : Température maximale en différents points le long de la traverse pour le scénario 3

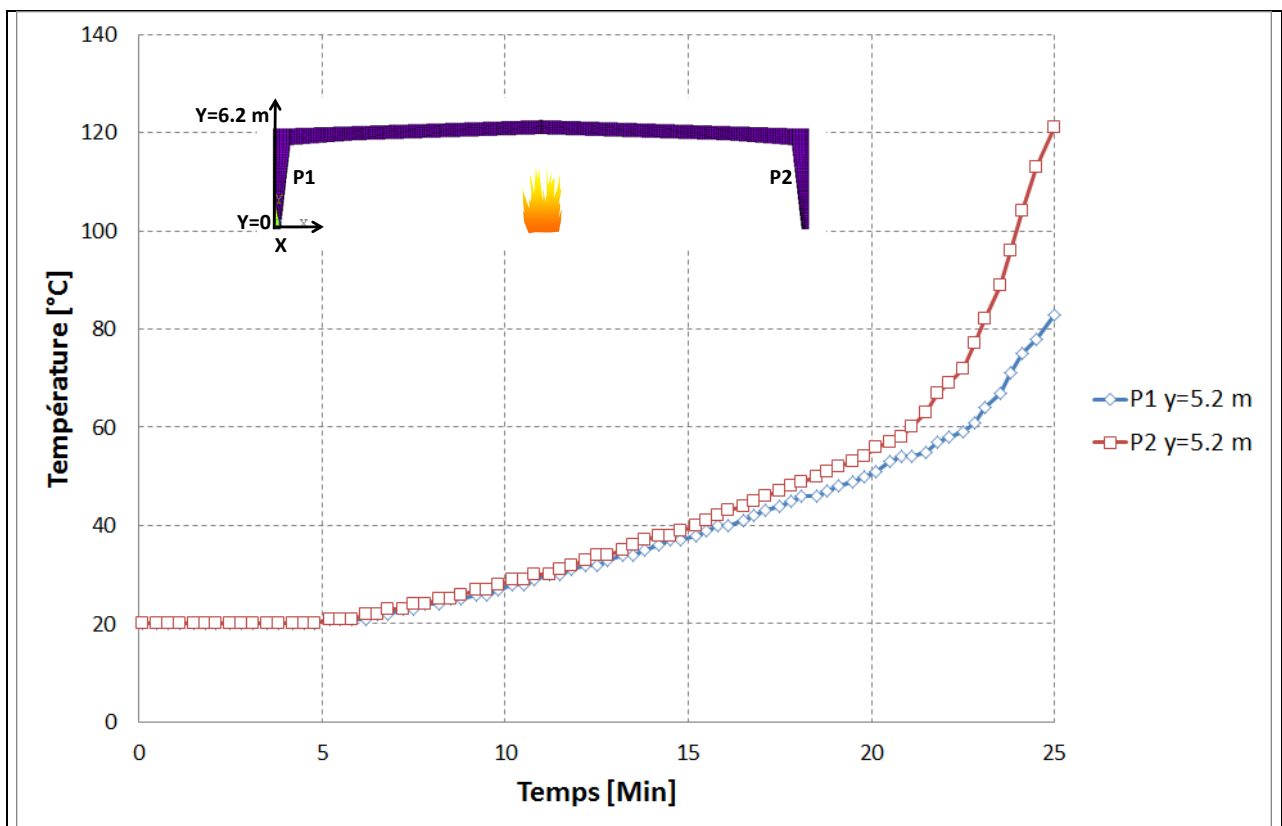


Figure 32 : Température maximale en tête des poteaux de rive P1 et P2 pour le scénario 3

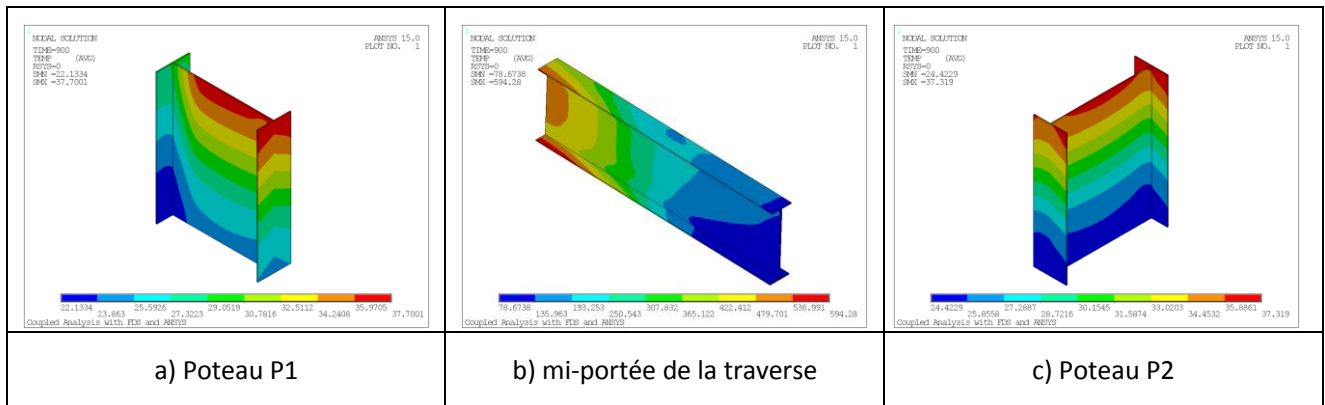


Figure 33 : Champs de température après 15 minutes d'exposition au feu sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 3

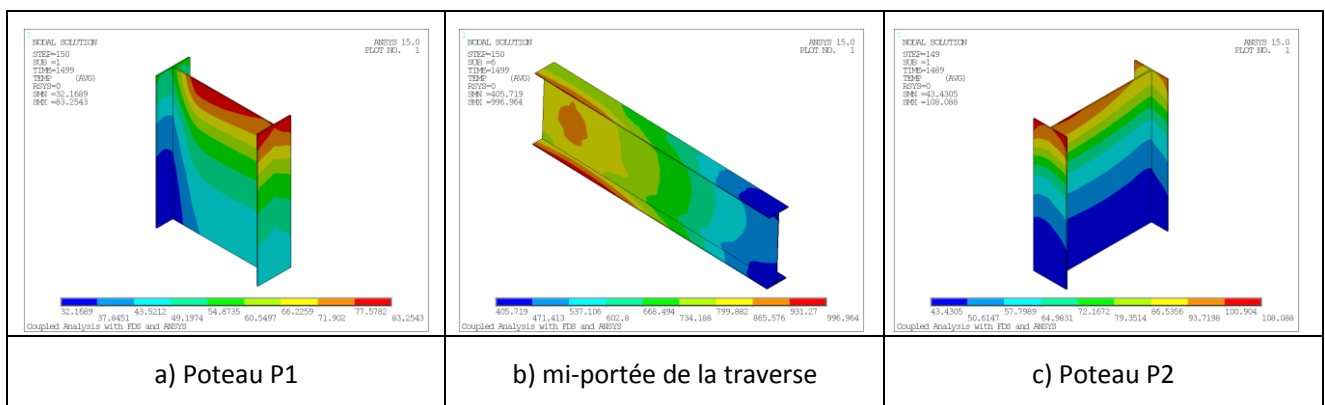


Figure 34 : Champs de température après environ 25 minutes d'exposition au feu réel sur différentes parties du portique le plus exposé au feu pour le scénario 3

5.4.2 Comportement mécanique des portiques métalliques

A partir des températures précédemment calculées, le comportement au feu des portiques de la structure métallique du bâtiment « messagerie » est analysé, pour chaque scénario sélectionné, à l'aide du logiciel aux éléments finis ANSYS.

Compte tenu de l'échauffement limité du portique (la température maximale ne dépasse pas 500°C après 25 minutes d'incendie), le scénario 2 ne représente pas le cas le plus contraignant vis à vis de la résistance au feu de la structure métallique du bâtiment « messagerie ». Par conséquent, seuls les résultats de calcul obtenus pour les scénarios d'incendie 1 et 3, sont présentés ci-après.

5.4.2.1 Principe et hypothèses de la modélisation des structures métalliques

Les hypothèses suivantes sont adoptées :

- Compte tenu du caractère particulier des portiques, qui sont constitués de profilés à inertie variable et (ou) de profilés reconstitués soudés sensibles au voilement local (section dite de classe 4), les portiques sont modélisés à l'aide d'éléments finis de type coque à 4 nœuds (SHELL 181) (cf. Figure 35) ;
- Les raidisseurs et les platines métalliques des portiques sont également modélisés en éléments coques ;
- Afin de représenter le maintien hors-plan des portiques apporté par les pannes et les bracons, le déplacement U_x a été bloqué au niveau des différents emplacements de ces éléments ;

- Afin de prendre en compte l'effet du voilement local sur la résistance au feu des éléments, des imperfections géométriques de type sinusoïdal préalablement obtenues à partir d'analyses modales ont été intégrées dans la modélisation numérique. Plus précisément, ces imperfections ont été introduites uniquement le long des parois (âme et (ou) semelles) sensibles au voilement local, en adoptant conformément à l'EN 1993-1-5 [36] une amplitude maximale prise égale à $h/200$ pour l'âme des profilés. Pour simplifier la modélisation, la même amplitude a été appliquée aux semelles, ce qui conduit à une imperfection géométrique plus importante que celle recommandée par l'EN 1993-1-5 (basée sur une valeur égale à $b/100$) ;
- Les assemblages poutre-poteau sont supposés parfaitement rigides et suffisamment résistants pendant toute la durée de l'exposition au feu du fait d'une rigidité plus importante au voisinage immédiat des assemblages due à une montée en température plus lente (massivité plus élevée) que dans les autres parties du portique ;
- Les poteaux sont articulés en pied ;
- Les propriétés mécaniques aux températures élevées de l'acier (facteur de réduction pour la résistance caractéristique, lois contrainte-déformation et coefficient de dilatation thermique) sont issues de l'Eurocode 3 partie 1-2 ;
- Tous les éléments des portiques sont en acier de nuance S235. Les caractéristiques mécaniques considérées à température ambiante sont les suivantes : limite d'élasticité : 235 MPa et module élasticité : 210000 MPa ;
- La charpente métallique est soumise à l'effet combiné des charges permanentes (incluant les surcharges) et des charges climatiques (neige ou vent). En principe, la vérification de la stabilité au feu des éléments de structure d'un entrepôt doit être réalisée avec les deux combinaisons de charges possibles, à savoir l'une avec le vent et l'autre avec la neige. Toutefois, dans la présente étude seule la combinaison de charges relative à la neige est retenue, celle-ci étant la plus pénalisante en termes de résistance au feu ;
- D'après les combinaisons de charges données dans l'Eurocode 0 [29], en situation d'incendie, la combinaison d'actions prise en compte dans les analyses est la suivante : $1,0 \times G + 0,2 \times S$;
- Le chargement est supposé constant pendant toute la durée de l'exposition au feu réel ;
- Selon l'extrait de la note de calcul [9], hormis le poids propre des éléments, le chargement mécanique appliqué aux portiques est décomposé comme suit :

Charge permanente (G)	couverture	25 daN/m ²
	divers	6 daN/m ²
Charges de neige (S)		36 daN/m ²

Tableau 7 : Chargement mécanique appliqué aux portiques

- Les charges mécanique sont appliquées sur les portiques à l'aide de charges nodales au niveau de l'emplacement de chaque panne ;
- A partir des températures préalablement calculées, les gradients thermiques existant le long des éléments constituant les portiques étudiés et sur la section transversale de ces éléments sont introduits dans les analyses par l'intermédiaire de sections de températures avec l'hypothèse d'une variation linéaire des températures entre deux sections successives. Pour chaque section, trois courbes de températures moyennes sont affectées en considérant une distribution uniforme des températures sur les différentes parties des profilés métalliques (semelles et âme).

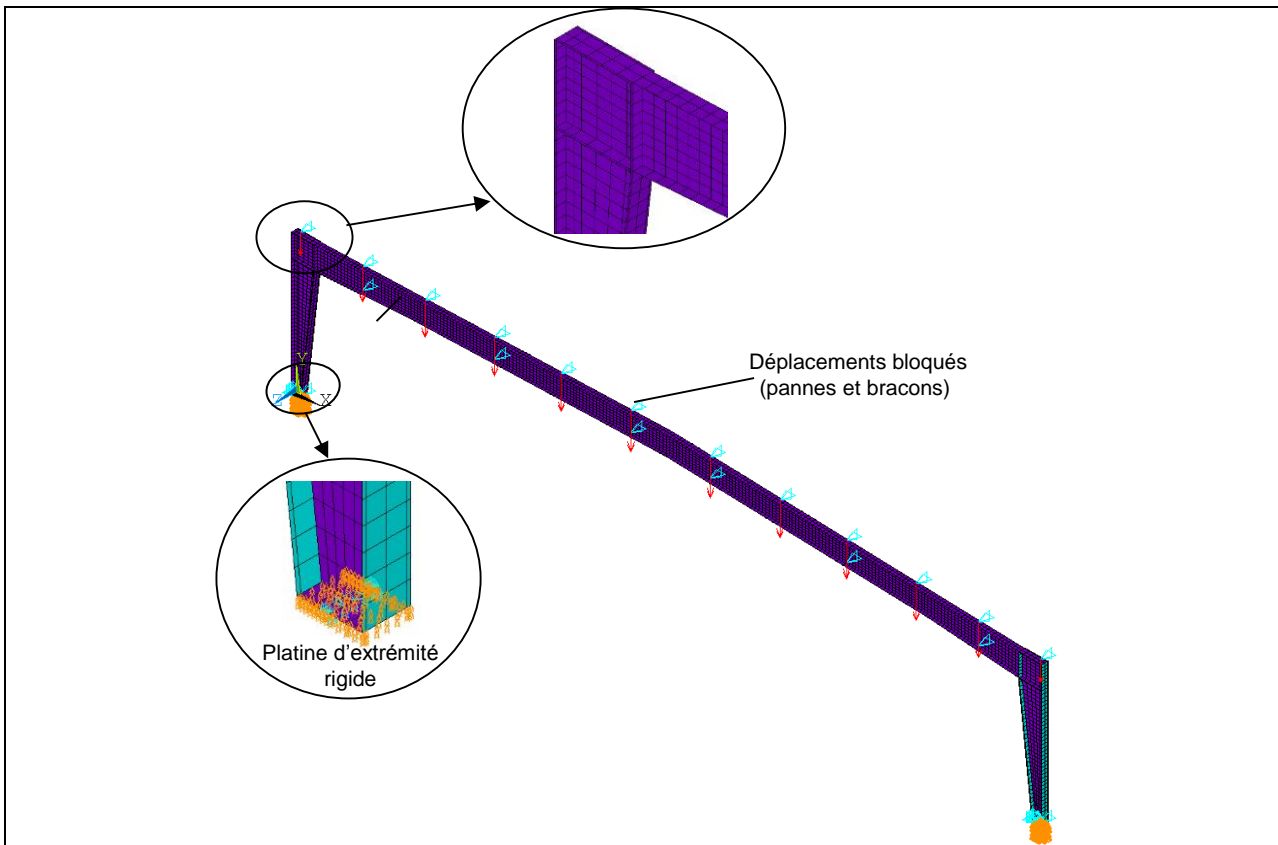


Figure 35 : Modèle 3D des portiques métalliques, conditions aux limites et chargement

5.4.2.2 Résultats des simulations

Les figures suivantes résument les résultats des calculs effectués. Pour les scénarios d'incendie 1 et 3, sont présentés :

- d'une part les évolutions au cours du temps des déplacements en quelques points des portiques, et
- d'autre part l'état de déformation des portiques au moment de la ruine.

Après examen de ces figures, on note que :

- Globalement, sous l'effet de la dilatation des traverses, les déplacements horizontaux calculés en tête des poteaux augmentent progressivement vers l'extérieur des cellules au cours des premières minutes de l'incendie. Ensuite, le mouvement s'inverse et les poteaux se dirigent rapidement vers l'intérieur bâtiment avec la ruine des traverses, sous l'effet combiné des températures et des charges appliquées.
- La ruine des portiques se produit donc toujours vers l'intérieur des cellules, écartant ainsi le risque d'effondrement de la structure vers l'extérieur ;
- La ruine des portiques se produit toujours après 15 minutes d'exposition au feu réel. Pour le scénario 1, la ruine du portique se produit après 24 minutes d'incendie. Pour le scénario 3, la ruine survient après 22,5 minutes d'exposition au feu réel.

Les différentes durées de stabilité au feu réel obtenues, ainsi que les déplacements horizontaux maximum des portiques vers l'extérieur sont récapitulées dans le Tableau 8.

Scenario	Temps de ruine (min)
1	24
3	22,5

Tableau 8 : Principaux résultats des simulations

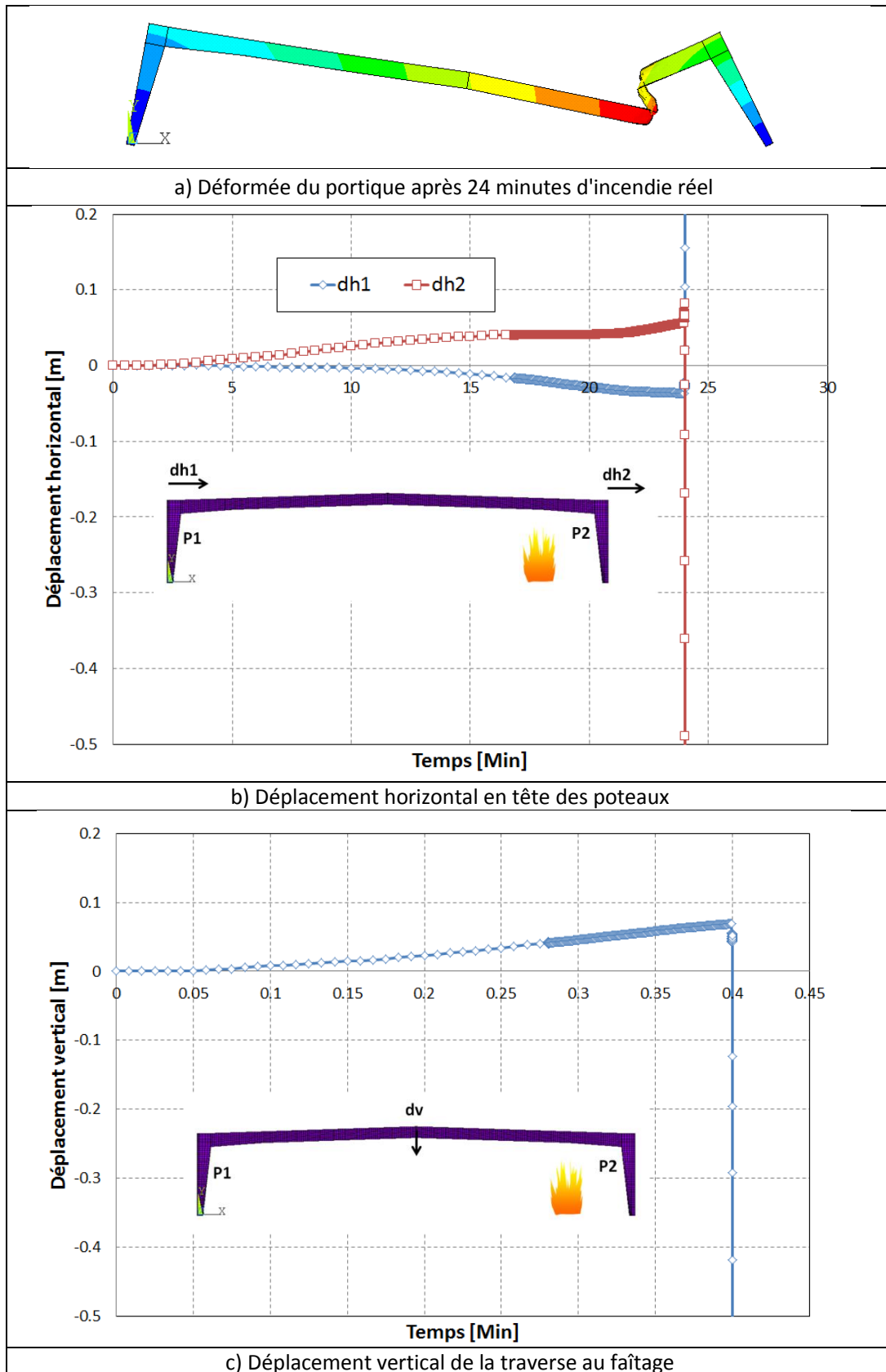


Figure 36 : Résultats des simulations numériques pour le scénario 1

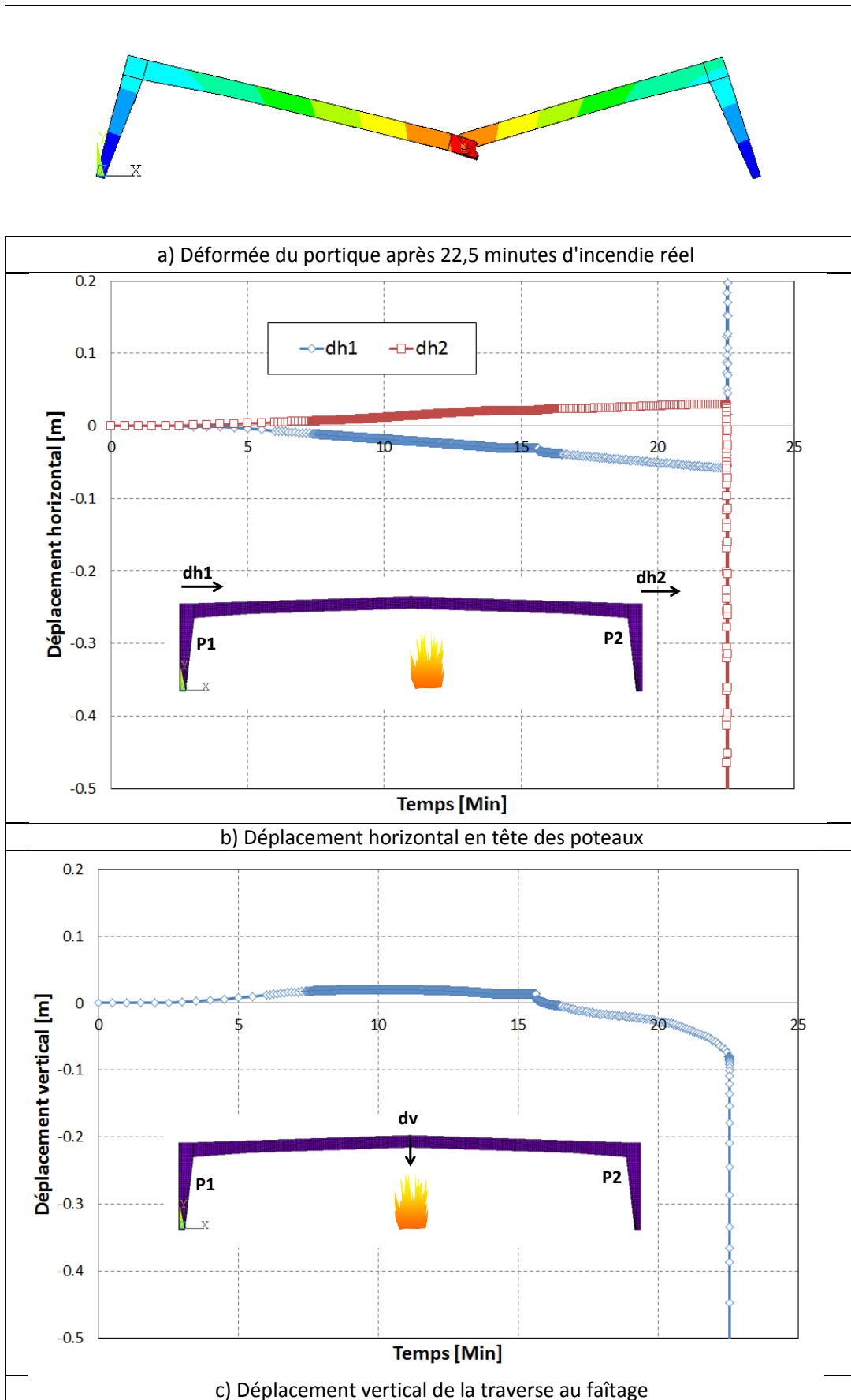


Figure 37 : Résultats des simulations numériques pour le scénario 3

5.4.2.3 Vérification des conditions d'évacuation

En fonction des résultats obtenus ci-dessus au niveau de l'évaluation du temps de ruine localisée des portiques les plus exposés au feu, il est vérifié ci-après si la cinétique de ruine de la structure est compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours.

La durée nécessaire à l'évacuation du personnel dans chaque cellule (obtenue avec EVAC) est donc comparée à celle de stabilité de la cellule dans le Tableau 9. Comme on peut le constater, la ruine localisée de la structure métallique du bâtiment messagerie apparaît bien après l'évacuation des personnes.

Scénario	Temps d'évacuation (min)	Durée de stabilité (min)
1	5,2	24
2	5	Au moins 25 min
3	5,8	22,5

Tableau 9 : Comparaison des différentes durées de stabilité obtenues avec celles d'évacuation

6 CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objet d'analyser le comportement au feu deux bâtiments de stockage appartenant à la société TRANSLOCAUTO, implantée sur la commune de Dreux, dans le département de l'Eure et Loire.

Pour le bâtiment « stockage », la démarche utilisée a suivi l'approche descriptive consistant à vérifier la stabilité au feu de la structure métallique du bâtiment sous conditions d'incendie normalisé. Dans le cadre des hypothèses retenues, l'analyse des résultats obtenus a montré que la stabilité au feu de degré R15 est satisfaite.

Pour le bâtiment « messagerie », la démarche utilisée a consisté à suivre la méthodologie de l'Ingénierie de la Sécurité Incendie afin de vérifier que le bâtiment offre un niveau de sécurité adéquat, tel qu'en cas d'incendie réel se déclarant au sein du bâtiment, la cinétique d'incendie et la cinétique de ruine de la structure porteuse du bâtiment sont en adéquation avec les objectifs de sécurité des personnes (occupants et services de secours). Ainsi, dans un première partie, l'étude s'est attachée à définir les scénarios d'incendie réels les plus critiques vis-à-vis du comportement au feu de la structure porteuse et de l'évacuation des personnes au sein du bâtiment « messagerie ». Des simulations du développement et de la propagation du feu, couplées à la modélisation de l'évacuation des occupants, ont ensuite été réalisées pour chaque scénario sélectionné afin de déterminer les conditions de tenabilité pour les personnes pendant leur évacuation. Dans tous les cas, les calculs ont permis de montrer que la cinétique de l'incendie est compatible avec l'évacuation des personnes. Dans une seconde partie, dédiée à l'étude du comportement sous feu réel de la structure porteuse du bâtiment « messagerie », les résultats obtenus ont permis de montrer la compatibilité entre le temps d'évacuation des personnes et le temps de ruine localisée de la structure et que les différentes exigences en termes de comportement structurel sont respectées.

ANNEXE : RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES SIMULATIONS

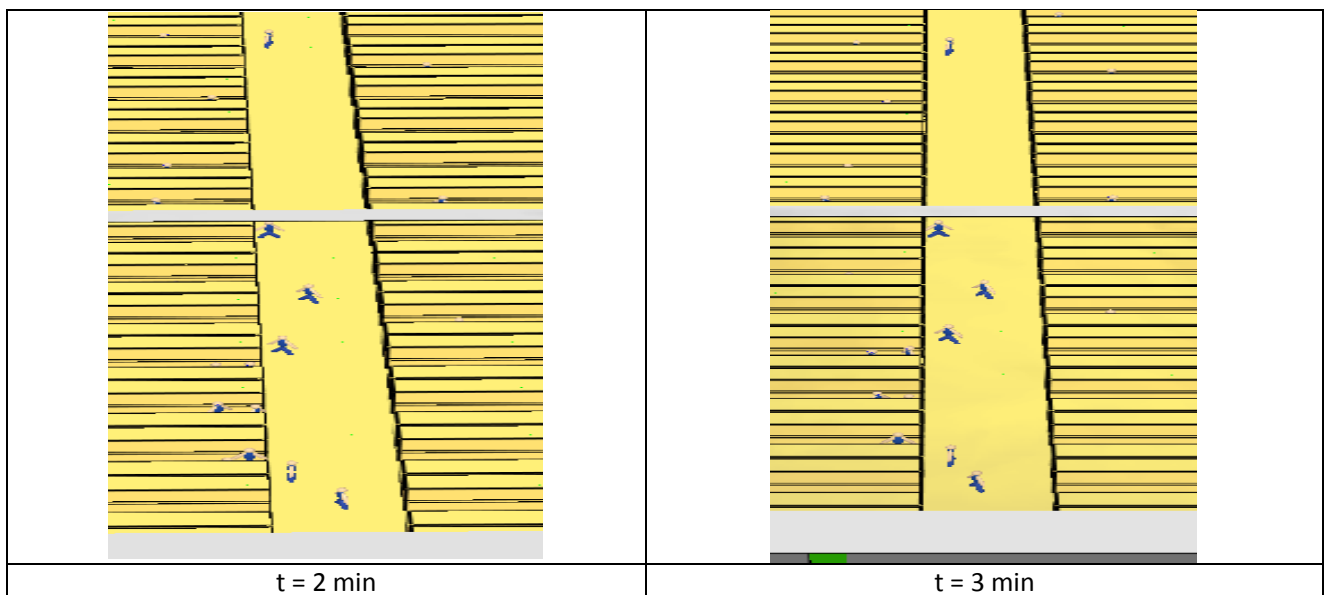
A.1 RÉSULTATS DU SCÉNARIO 1

A.1.1 Développement du feu et évacuation des personnes

Les figures suivantes issues des simulations (Figure 38) et la courbe de dégagement de chaleur (Figure 39) permettent de caractériser l'évolution de l'incendie et l'évacuation des personnes.

Le feu met environ 3 minutes pour se propager tout en haut de l'îlot. La puissance dégagée atteint alors 1,2 MW. On distingue nettement l'effet du cantonnement autour des 4 minutes dans la cellule avec une concentration des fumées plus importante à proximité de l'îlot en feu. Au bout de 10 minutes, le feu commence à se propager sur l'îlot ; la puissance de l'incendie augmente proportionnellement au cours du temps. A cet instant, la totalité de la cellule est envahie par les fumées. Aux alentours des 12 minutes, l'incendie se propage latéralement sur l'îlot voisin. A 20 minutes, l'incendie croît latéralement sur le stockage où se situe le foyer ; la puissance de l'incendie est de 10 MW. C'est à cet instant qu'un troisième îlot de stockage prend feu : la croissance de l'incendie commence à s'accélérer et, de fait, sa puissance dégagée augmente fortement. 5 minutes plus tard, la puissance du feu est de 18 MW.

Concernant l'évacuation des personnes, l'alerte étant donnée 3 minutes après le démarrage de l'incendie et les occupants ayant un temps de pré-mouvement d'une minute, elle débute logiquement au bout de 4 minutes. Une fois déclenchée, l'évacuation dure 1 minute.



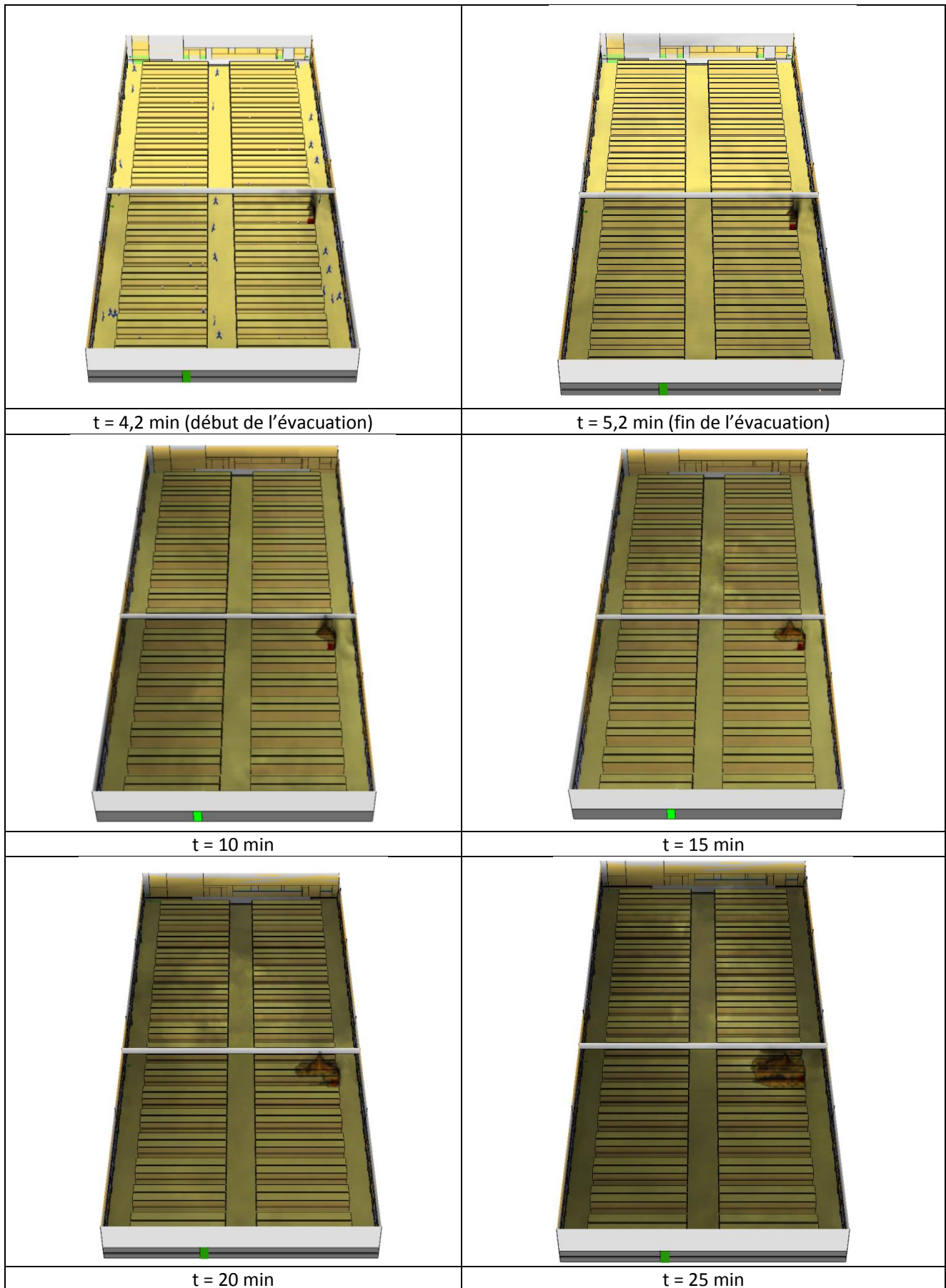


Figure 38 : Visualisation du dégagement de chaleur, des fumées et de l'évacuation

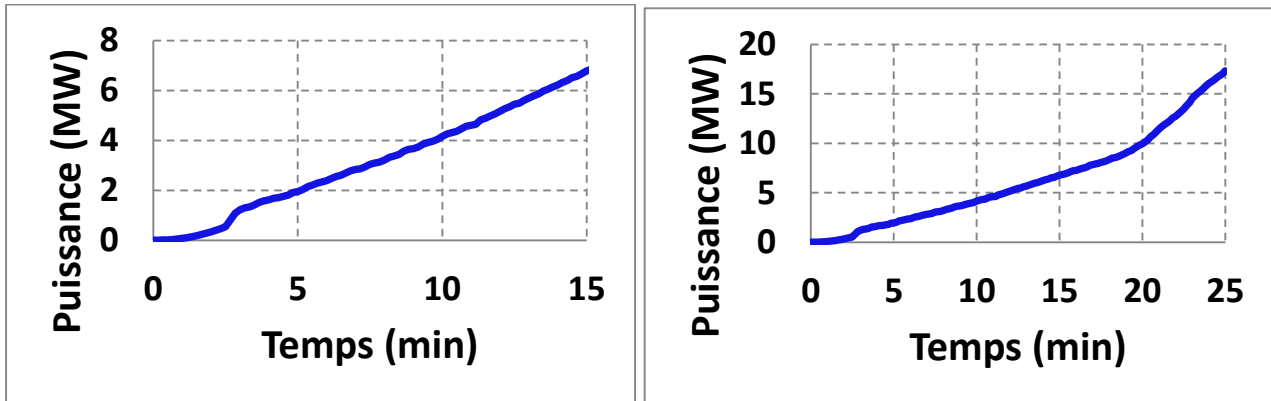


Figure 39 : Courbes de dégagement de chaleur

A.1.2 Conditions de tenabilité

Les niveaux de températures (Figure 40) et de visibilité (Figure 41) sont examinés à une hauteur de 1,8 m et comparés aux seuils de vulnérabilité. Ceci permet de savoir au bout de combien de temps les conditions de tenabilité sont compromises.

Au-delà de 21 minutes, la convection fait descendre la couche chaude en dessous du seuil de 60 °C dans certaines zones de la cellule en feu. A partir de 22 min (Figure 40), les régions de la cellule où le franchissement du seuil se produit se développent principalement dans le canton voisin. De manière à être sécuritaire, on peut donc retenir qu’au bout de 22 minutes, les températures atteintes compromettent l’évacuation des personnes.

On peut voir sur la Figure 41 que le seuil de 10 m n’est toujours pas atteint au bout de 25 minutes, instant où les simulations sont arrêtées. On retient donc que les conditions d’évacuation seront potentiellement compromises par l’opacité des fumées au-delà des 25 minutes après le départ de feu.

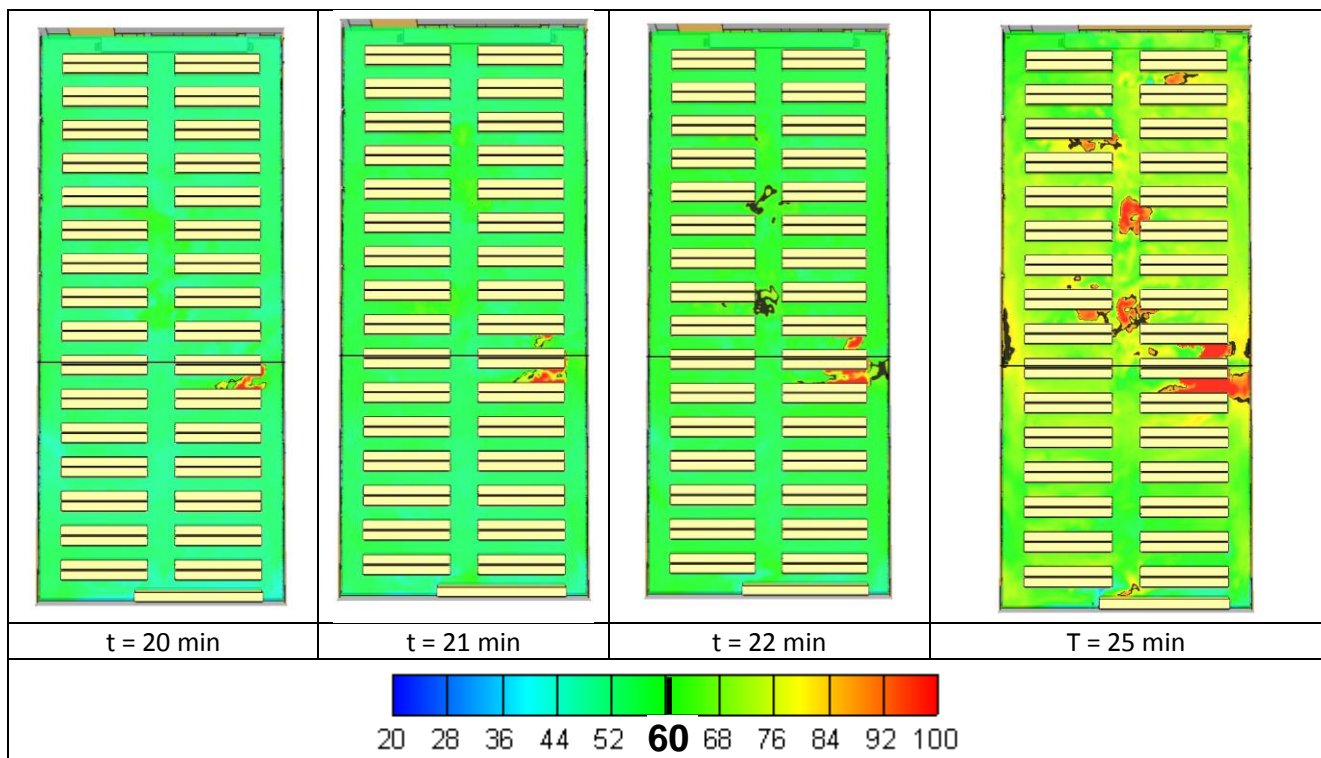


Figure 40 : Contours de température (°C), à 1,8 m du sol

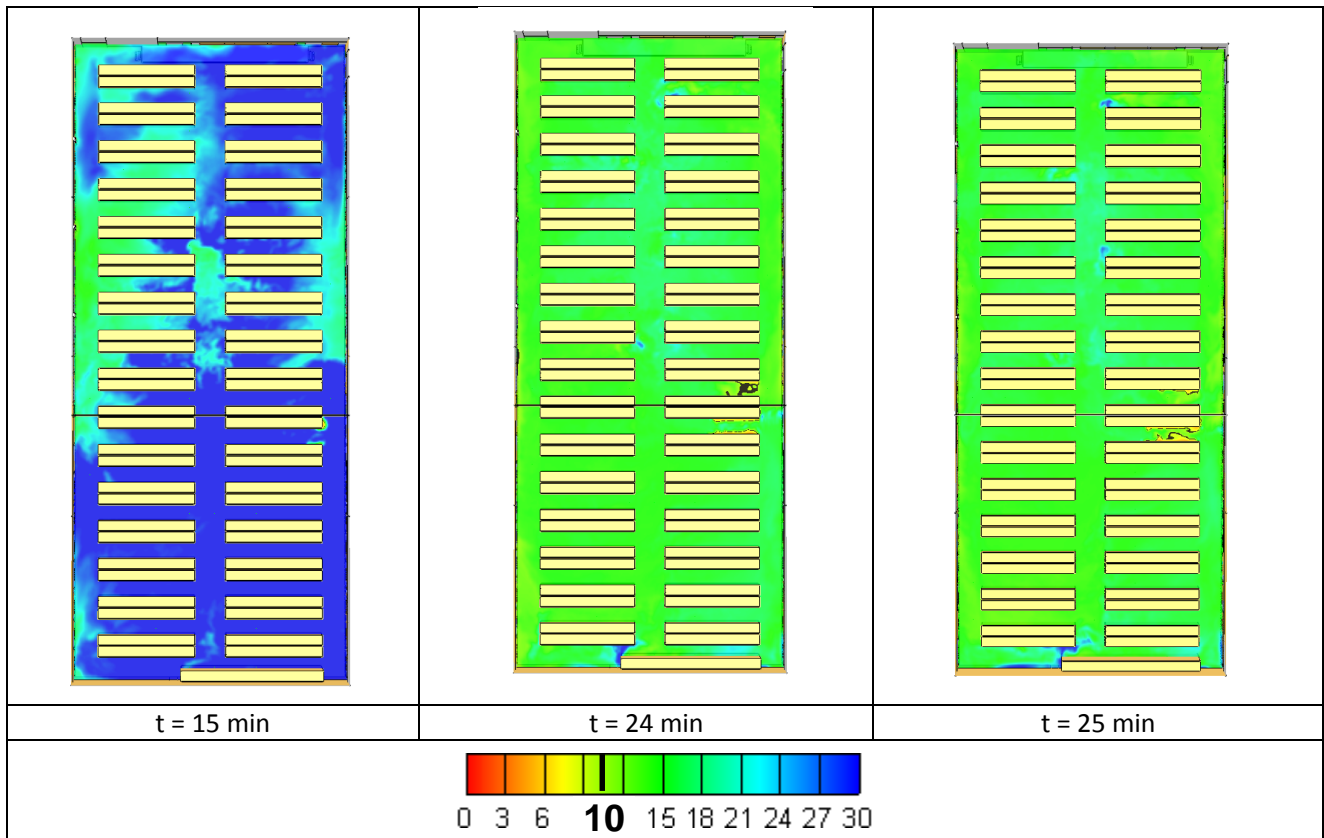


Figure 41 : Contours de visibilité (m), à 1,8 m du sol

La Figure 42 indique l'évolution du flux radiatif au niveau des différentes sorties, à 1,8 m de hauteur. On constate que le seuil de 2,5 kW/m² n'est toujours pas franchi au niveau des sorties au bout de 25 minutes.

Finalement, on peut retenir que seul le critère de tenabilité de 60 °C est atteint après 21 minutes.

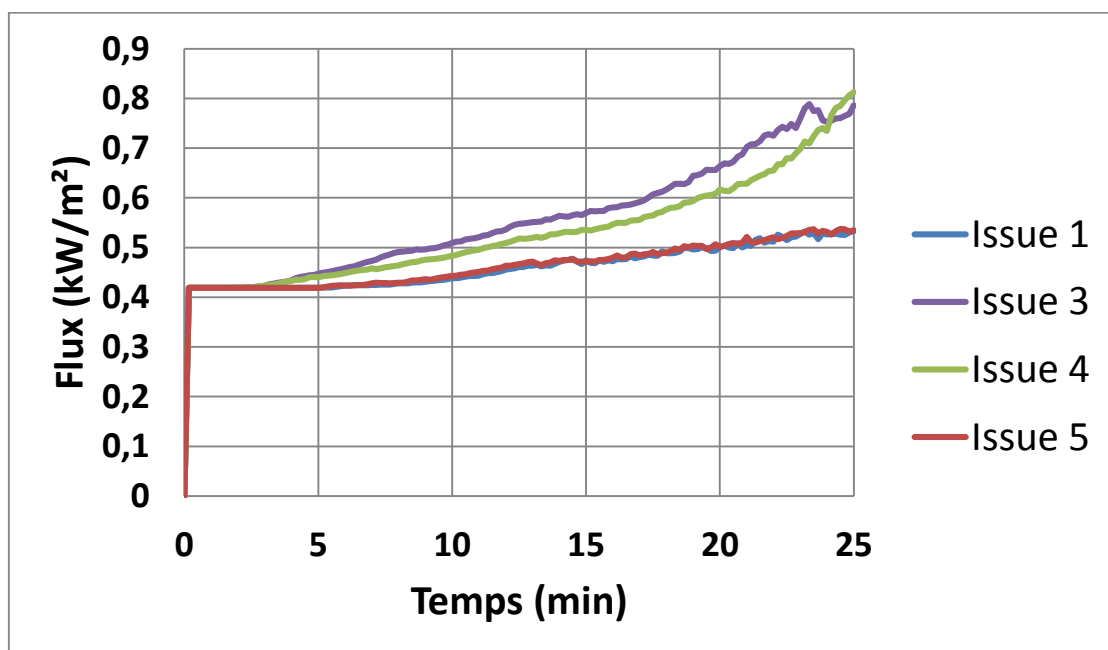


Figure 42 : Flux radiatif incident (kW/m²) au niveau des sorties, à 1,8 m du sol

La Figure 43 précise l'évolution de la température des gaz situés sous la toiture. On observe bien l'influence du cantonnement sur la couche chaude des gaz.

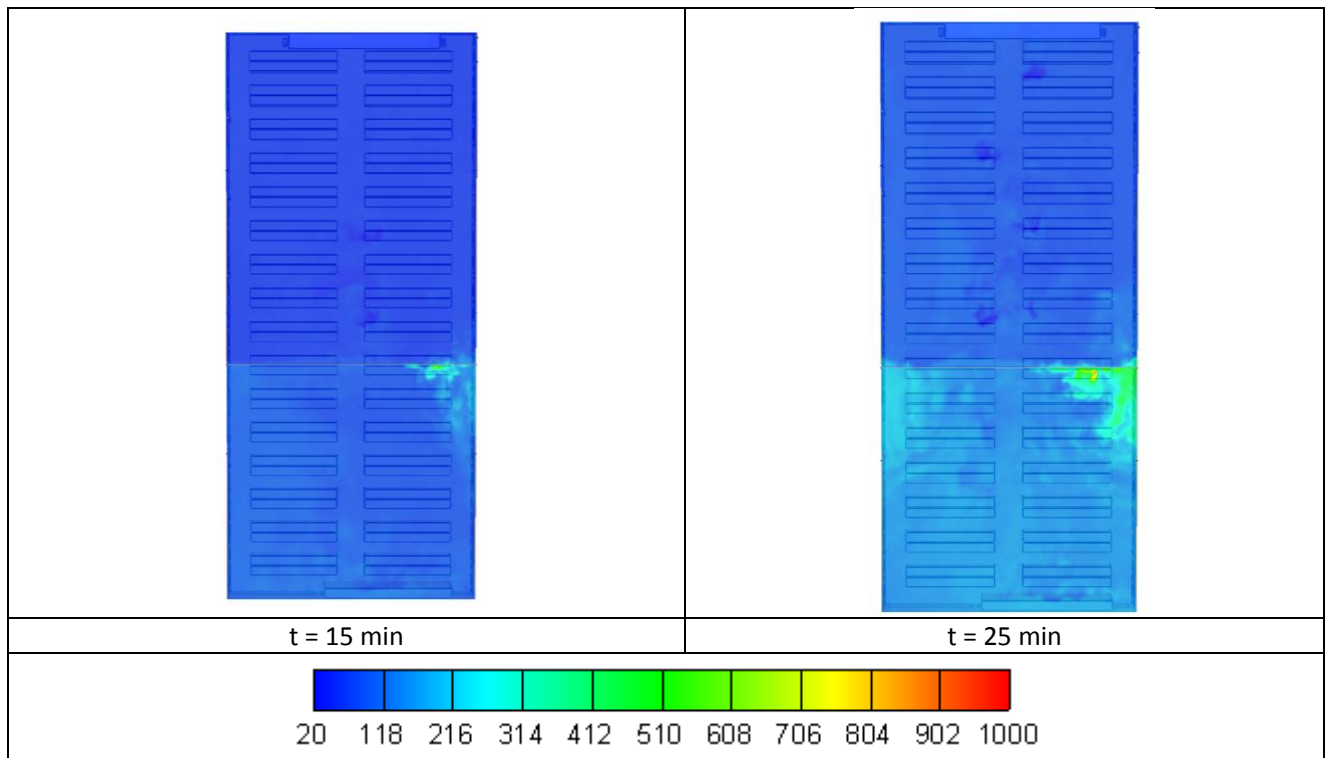


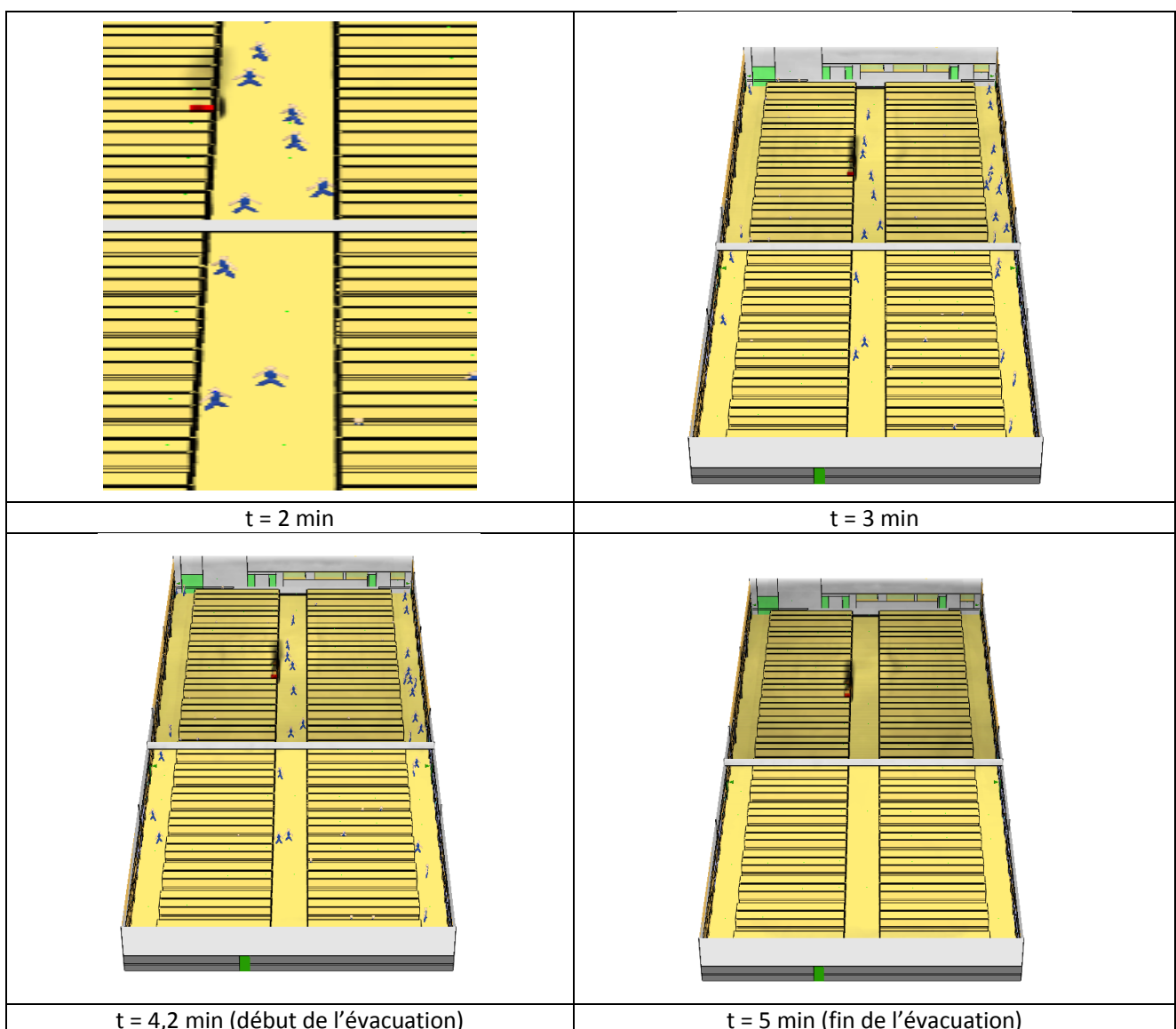
Figure 43 : Contours de température (°C), à 5 m.

A.2 RÉSULTATS DU SCÉNARIO 2

A.2.1 Développement du feu et évacuation des personnes

Pour ce scénario, on constate une évolution temporelle de l'incendie similaire au scénario 1. La propagation de l'incendie sur les îlots voisins se produit sensiblement aux mêmes instants que pour le scénario 1, soit aux alentours de 12 minutes, et de 20 minutes pour l'îlot situé en face par rapport à l'allée centrale. L'évolution de la puissance dégagée par l'incendie est elle aussi similaire à celle du scénario 1. Au bout de 25 minutes, la puissance est d'environ 16 MW.

Concernant l'évacuation des personnes, l'alerte étant donnée 3 minutes après le démarrage de l'incendie et les occupants ayant un temps de pré-mouvement d'une minute, elle débute logiquement au bout de 4 minutes. Une fois déclenchée, l'évacuation dure moins de 1 minute. Ce constat s'explique par le fait qu'il y a une sortie de secours de plus par rapport au scénario précédent, permettant une meilleure évacuation du personnel.



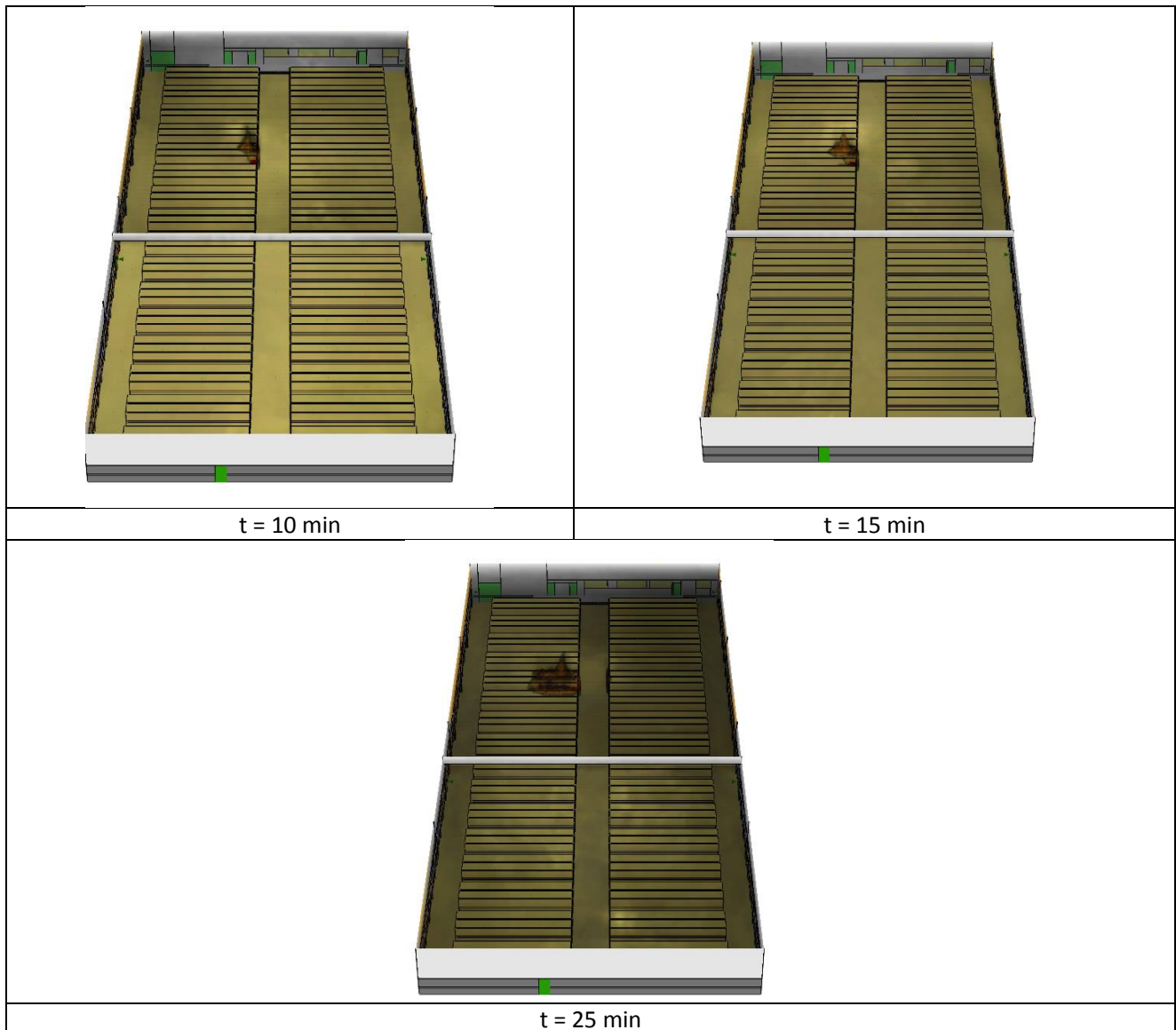


Figure 44 : Visualisation du dégagement de chaleur, des fumées et de l'évacuation

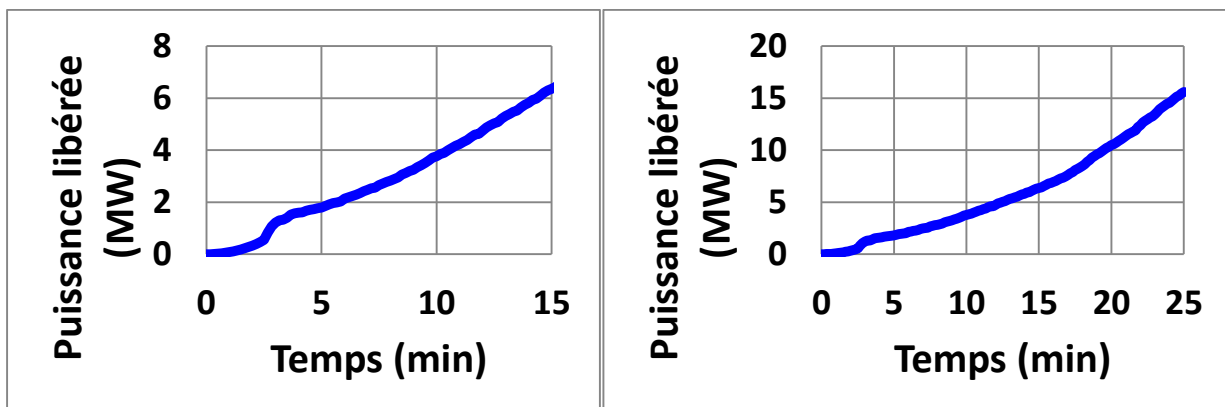


Figure 45 : Courbes de dégagement de chaleur

A.2.2 Conditions de tenabilité

Les figures ci-dessous permettent d'établir que les conditions d'évacuation sont potentiellement compromises environ 24 minutes après le départ de feu (critères liés à la température et à la visibilité).

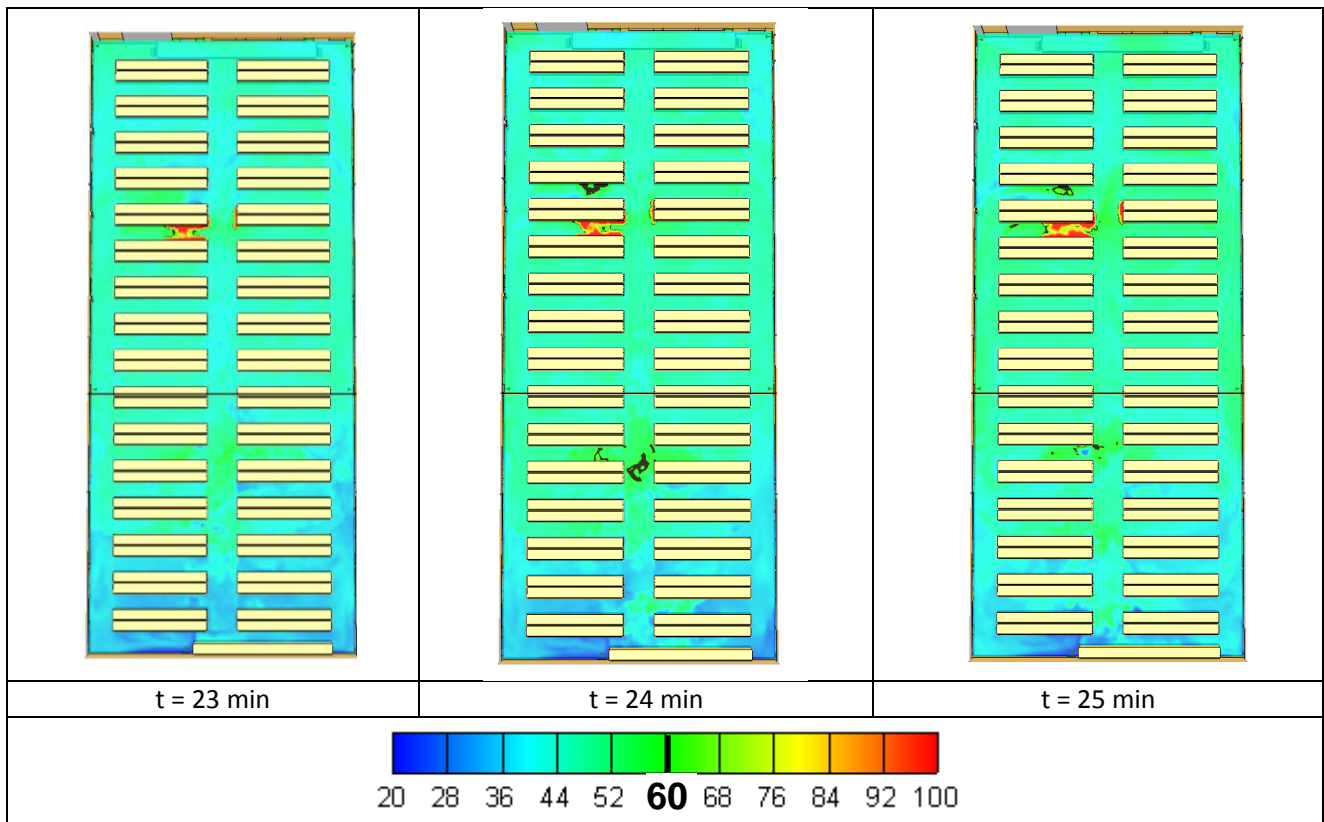


Figure 46 : Contours de température (°C), à 1,8 m du sol

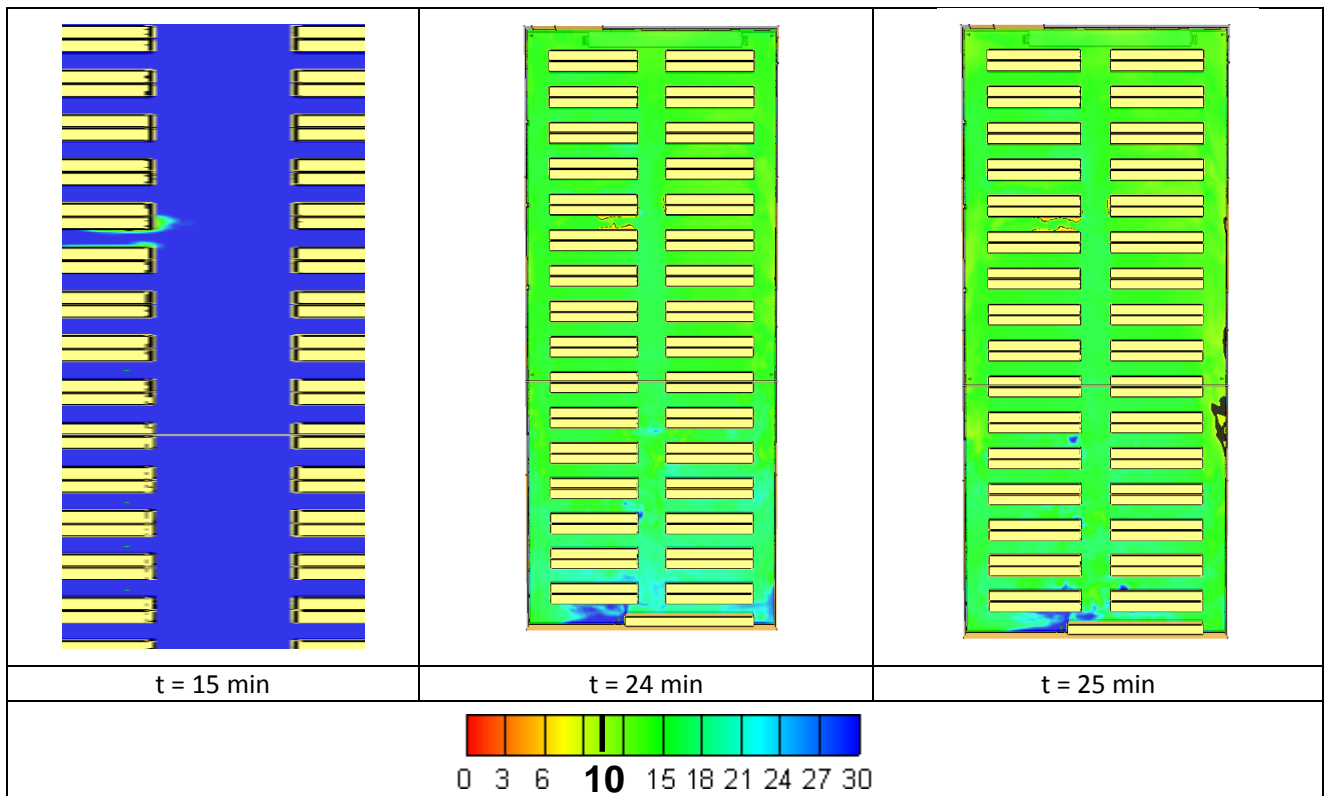


Figure 47 : Contours de visibilité (m), à 1,8 m du sol

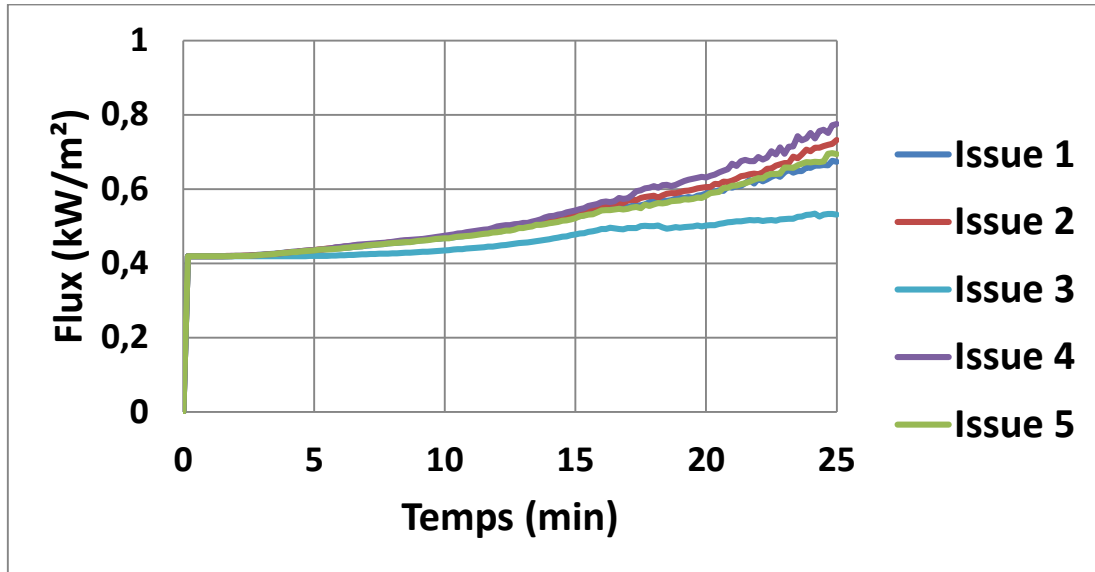


Figure 48 : Flux radiatif incident (kW/m²) au niveau des sorties, à 1,8 m du sol

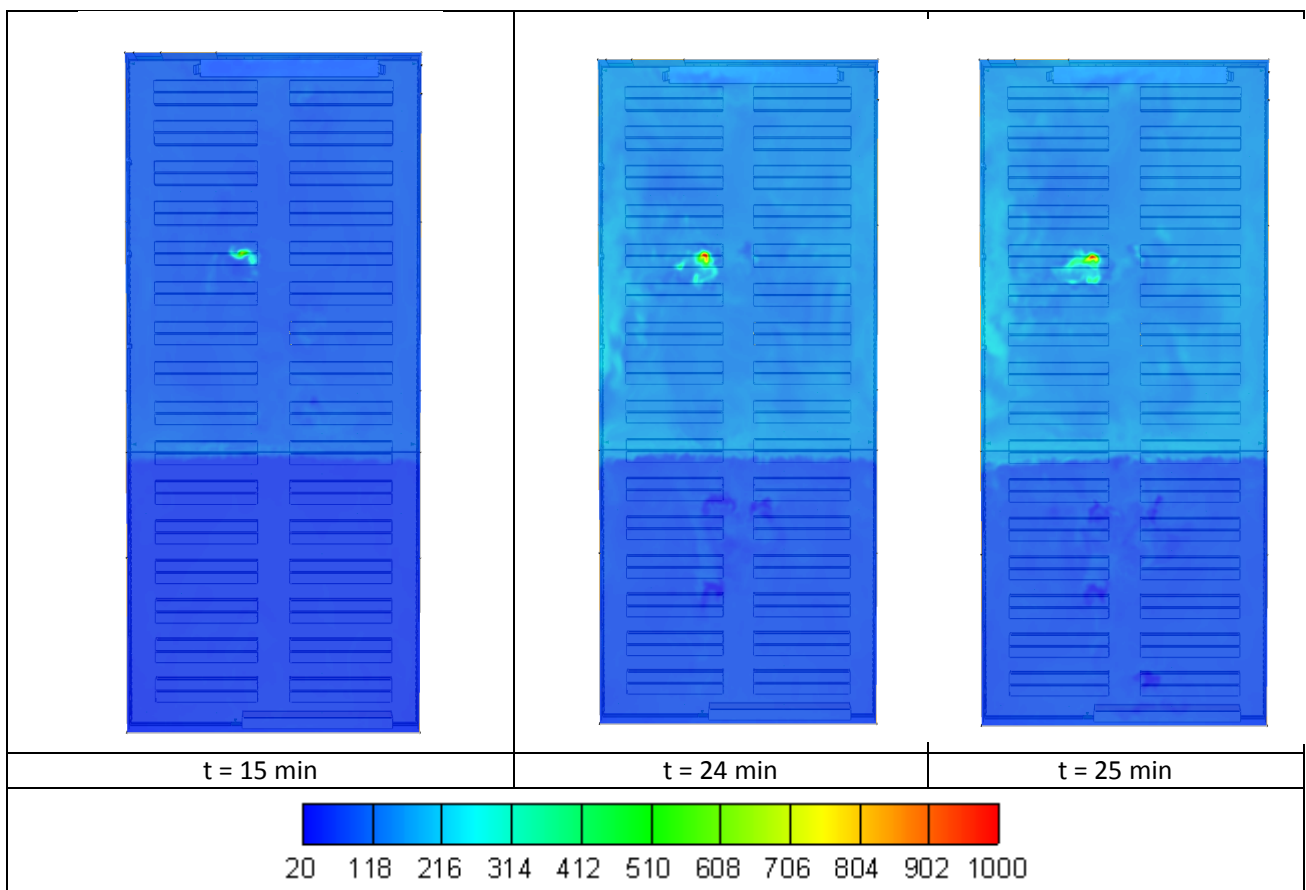


Figure 49 : Contours de température (°C), à 5 m

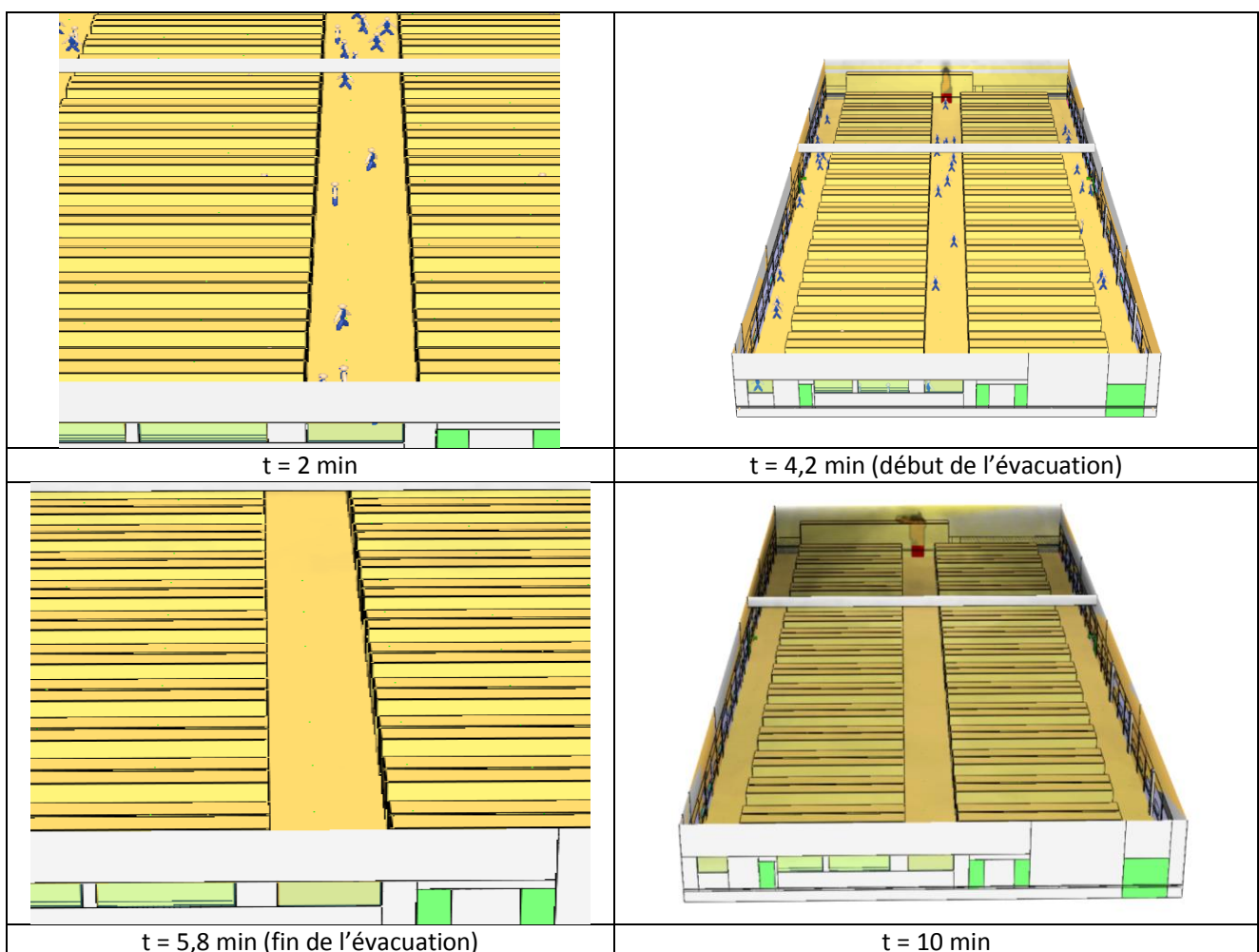
A.3 RÉSULTATS DU SCÉNARIO 3

A.3.1 Développement du feu et évacuation des personnes

Pour ce scénario, l'origine du foyer de l'incendie se situe au niveau du rack accolé au mur est de l'entrepôt.

Le feu met environ 4 minutes pour se propager tout en haut du rack. La puissance dégagée atteint alors 1,8 MW. On distingue nettement l'effet du cantonnement autour de 5 minutes dans la cellule avec une concentration des fumées plus importante à proximité du rack en feu. Au bout de 10 minutes, le feu commence à se propager latéralement au sein du rack ; la puissance de l'incendie augmente proportionnellement au cours du temps. 5 minutes plus tard, la totalité de la cellule est envahie par les fumées. A 20 minutes, l'incendie se propage aux îlots voisins ; la puissance de l'incendie est de 10 MW et augmente fortement pour atteindre 24 MW à 25 minutes.

Concernant l'évacuation des personnes, celle-ci dure légèrement plus longtemps (environ 1 minute et 30 secondes) du fait que la condamnation de l'issue de secours 3 aboutit à des distances de parcours plus longues.



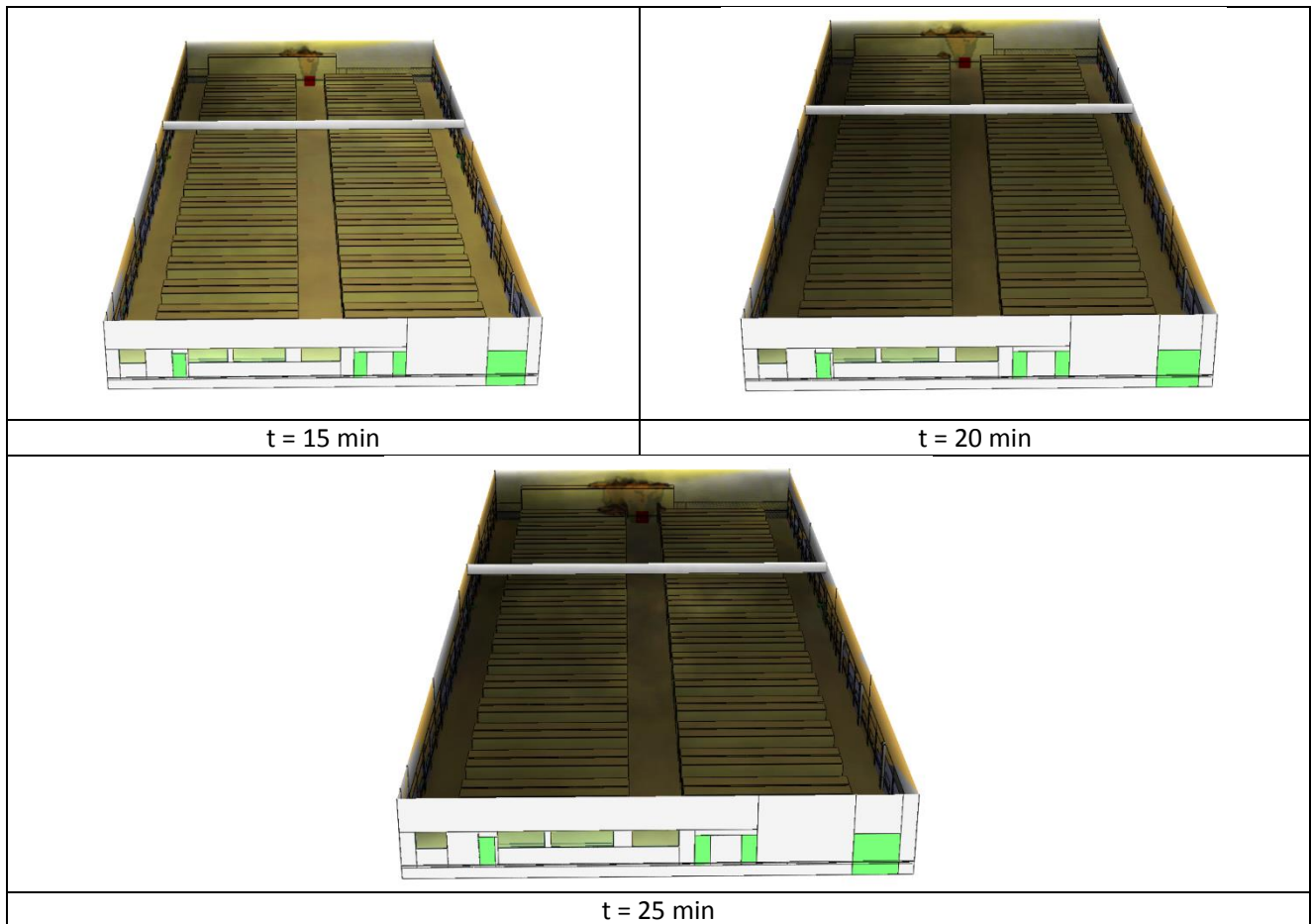


Figure 50 : Visualisation du dégagement de chaleur, des fumées et de l'évacuation

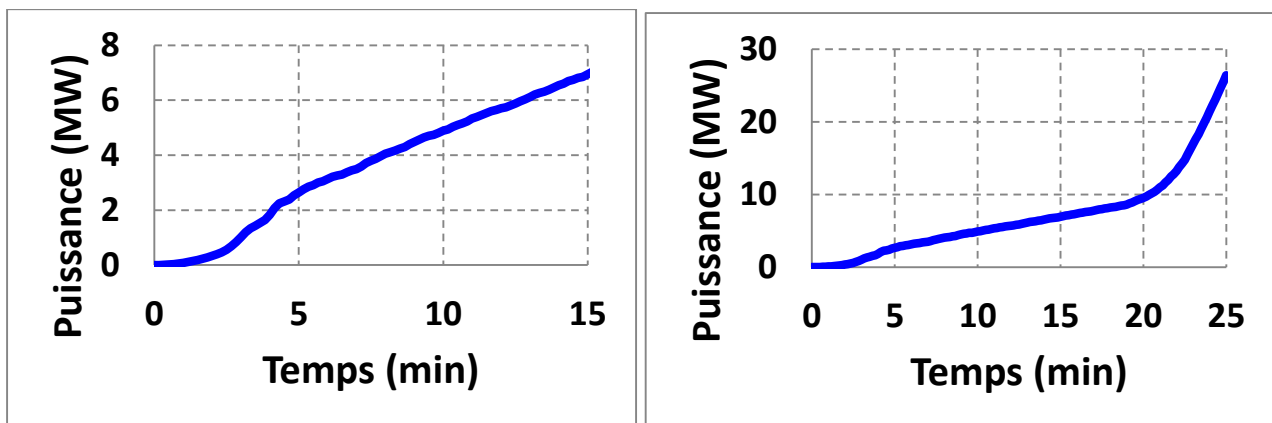


Figure 51 : Courbes de dégagement de chaleur

A.3.2 Conditions de tenabilité

Les figures ci-dessous permettent d'établir que les conditions d'évacuation sont potentiellement compromises environ 20 minutes après le départ de feu (critère de visibilité).

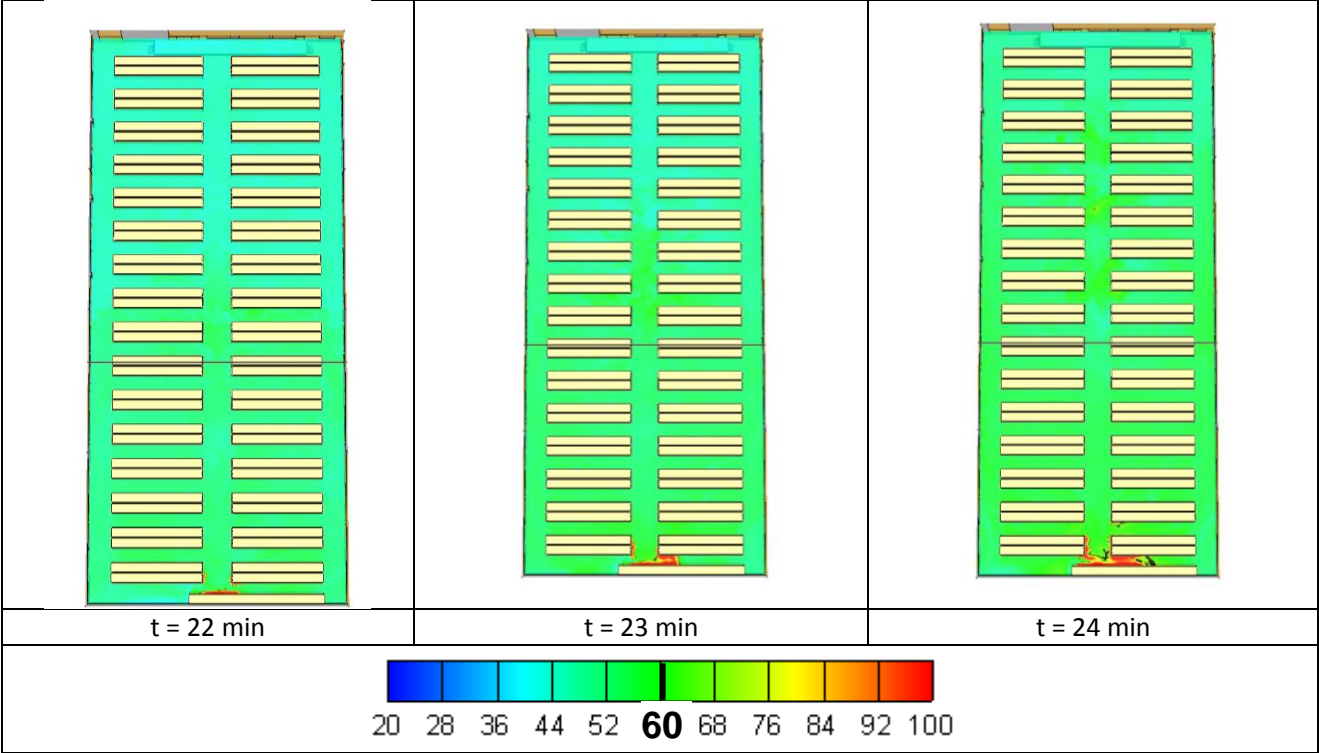


Figure 52 : Contours de température (°C), à 1,8 m du sol

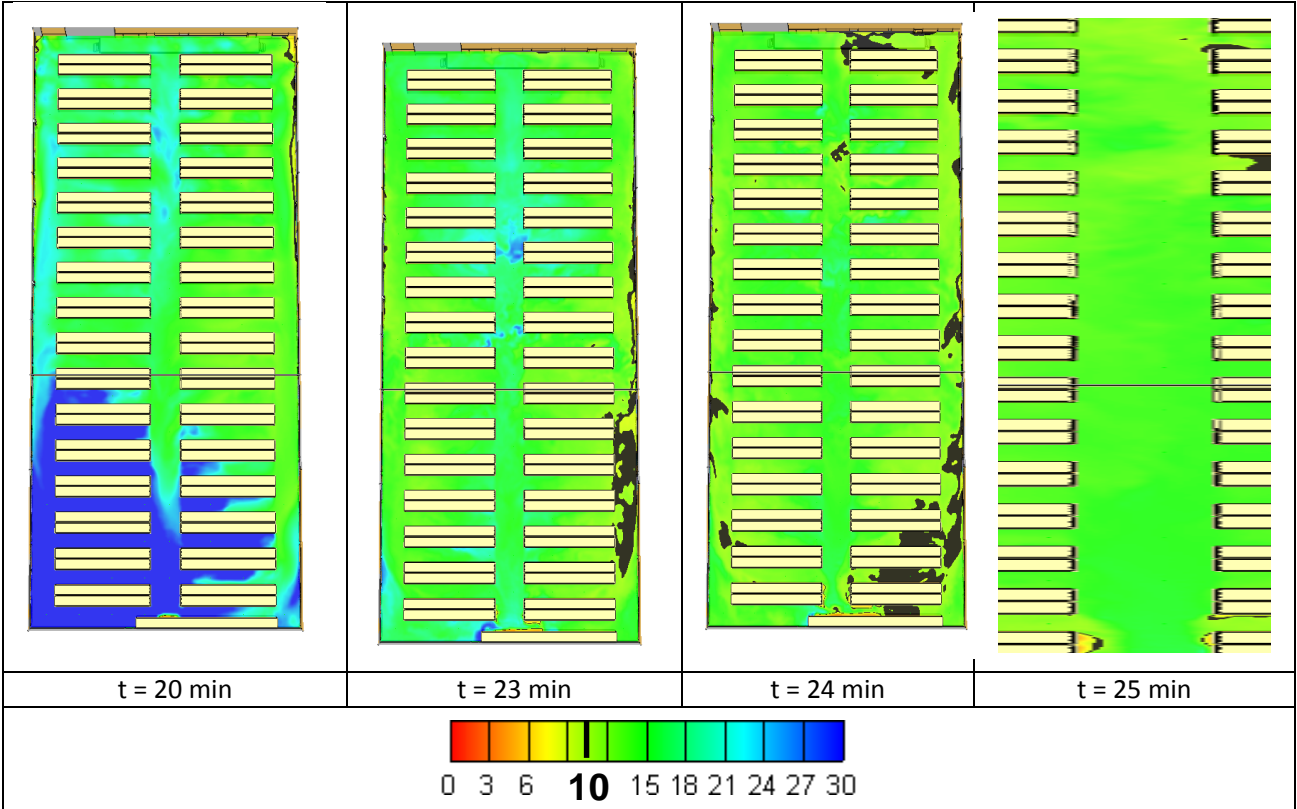


Figure 53 : Contours de visibilité (m), à 1,8 m du sol

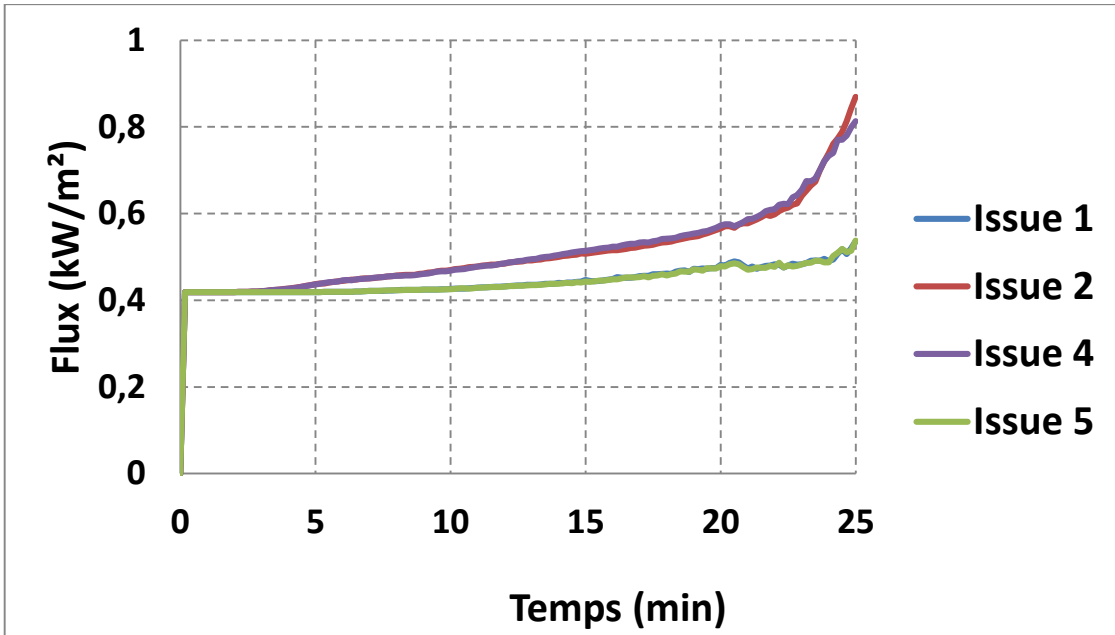


Figure 54 : Flux radiatif incident (kW/m²) au niveau des sorties, à 1,8 m du sol

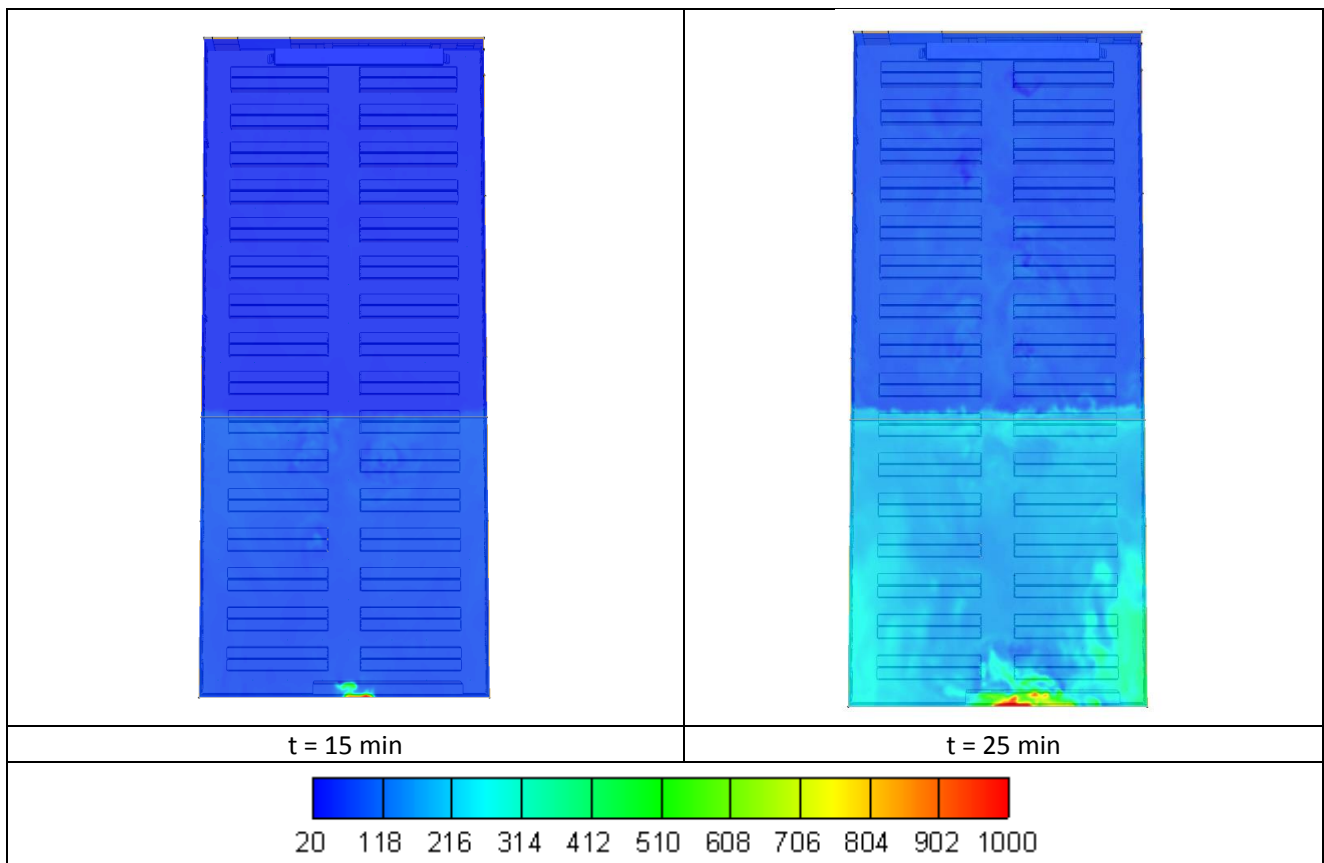


Figure 55 : Contours de température (°C), à 5 m