

RAPPORT D'ETUDE  
DRA-17-169967-10333A

27/03/2018

**Étude spécifique d'ingénierie incendie pour le site  
FORD d'Estrées-Saint-Denis**



# Étude spécifique d'ingénierie incendie pour le site FORD d'Estrées-Saint-Denis

Client : FMC AUTOMOBILES SAS

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Lauris JOUBERT, Shihab RAHMAN

## PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Étant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Lauris JOUBERT / Shihab RAHMAN	Benjamin TRUCHOT	Stéphane DUPLANTIER
Qualité	Ingénieurs du pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures  Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'unité Dispersion Incendie Expérimentation et Modélisation  Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures  Direction des Risques Accidentels
Visa			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
1.1 Contexte.....	5
1.2 Eléments contractuels.....	6
<b>2 DESCRIPTION .....</b>	<b>7</b>
2.1 Description générale .....	7
2.2 Description du stockage .....	9
2.3 Description de la structure des bâtiments .....	11
2.3.1 Bâtiment A .....	11
2.3.2 Bâtiment B.....	15
<b>3 DUREE D'ÉVACUATION DES PERSONNES .....</b>	<b>19</b>
3.1 Evaluation des distances à parcourir.....	20
3.2 Calcul de la durée d'évacuation .....	22
<b>4 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION .....</b>	<b>25</b>
4.1 Géométrie des zones modélisées .....	25
4.2 Hypothèses relatives au combustible.....	26
4.3 Critères de tenabilité .....	29
4.3.1 Critères de tenabilité pour le personnel .....	29
4.3.2 Critères de tenabilité pour les services d'intervention.....	32
4.4 Plans de coupe .....	32
<b>5 MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE L'INCENDIE .....</b>	<b>33</b>
5.1 Choix des scénarios .....	33
5.1.1 Bâtiment A : scénario C1-A .....	34
5.1.2 Puissance développée.....	34
5.1.3 Conditions de tenabilité pour le personnel.....	35
5.1.4 Conditions de tenabilité pour les services d'intervention .....	38
5.2 Bâtiment cantine : scénario C2-A.....	39
5.2.1 Puissance développée.....	40
5.2.2 Résultats.....	41
5.3 Mezzanine : scénario C3-A .....	41
5.4 Bâtiment B : scénario C1-B.....	44
5.4.1 Puissance développée.....	44
5.4.2 Conditions de tenabilité pour le personnel.....	44
5.4.3 Conditions de tenabilité pour les services d'intervention .....	47
5.5 Synthèse .....	48
<b>6 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DE LA STRUCTURE À L'INCENDIE...49</b>	
6.1 Méthodologie.....	49
6.2 Cas particulier de la salle de stockage aérosols et liquides inflammables ..49	

6.3	Choix des scénarios modélisés.....	50
6.3.1	Bâtiment A .....	50
6.3.2	Bâtiment B .....	51
6.4	Hypothèses de calculs .....	51
6.4.1	Domaine de calcul dans le Bâtiment A .....	51
6.4.2	Charges appliquées au Bâtiment A .....	52
6.4.3	Domaine de calcul dans le Bâtiment B .....	54
6.4.4	Charges appliquées au Bâtiment B .....	54
6.4.5	Couplage thermo-mecanique .....	56
6.4.6	Conditions limites.....	56
6.5	Résultats .....	56
6.5.1	Bâtiment A .....	56
6.5.2	Bâtiment B .....	64
6.5.3	Synthèse des résultats de comportement à l'incendie des structures .....	70
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>77</b>

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE

Le CNLPR (Centre National Logistique de Pièces de Rechange) Ford d'Estrées Saint Denis possède deux bâtiments de stockage attenants, l'un de 21 800 m<sup>2</sup> construit en 1972, le bâtiment A, et l'autre de 14 100 m<sup>2</sup> construit en 1988, le bâtiment B (cf. Figure 1). Du fait de l'évolution des produits stockés, l'exploitant sollicite une autorisation sous le régime de l'enregistrement de la rubrique 1510 pour ces deux bâtiments et sera donc soumis aux prescriptions applicables de l'arrêté du 11/04/2017.



Figure 1 : Plan intérieur des deux bâtiments. Bâtiment A en bas et bâtiment B en haut.

La taille des cellules de stockage étant supérieure à 6 000 m<sup>2</sup>, la réglementation impose la réalisation pour chacun des deux bâtiments d'une étude spécifique d'ingénierie incendie visant à démontrer :

1. l'absence de ruine en chaîne ;
2. la non ruine vers l'extérieur de la structure en cas de sinistre ;
3. la compatibilité entre, d'un côté, la cinétique de l'incendie et la ruine de la structure, et de l'autre, l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours.

C'est l'objet de cette étude.

## **1.2 ÉLÉMENTS CONTRACTUELS**

Cette prestation fait suite à :

- une proposition technique et financière référencée DRA-17-169967-06387A en date du 13/07/2017 ;
- une commande référencée EVR PO17 T55425 en date du 28/09/2017.



## 2 DESCRIPTION

### 2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE

Le site d'Estrées Saint-Denis (cf. Figure 2) est un centre de logistique de pièces détachées pour l'automobile.

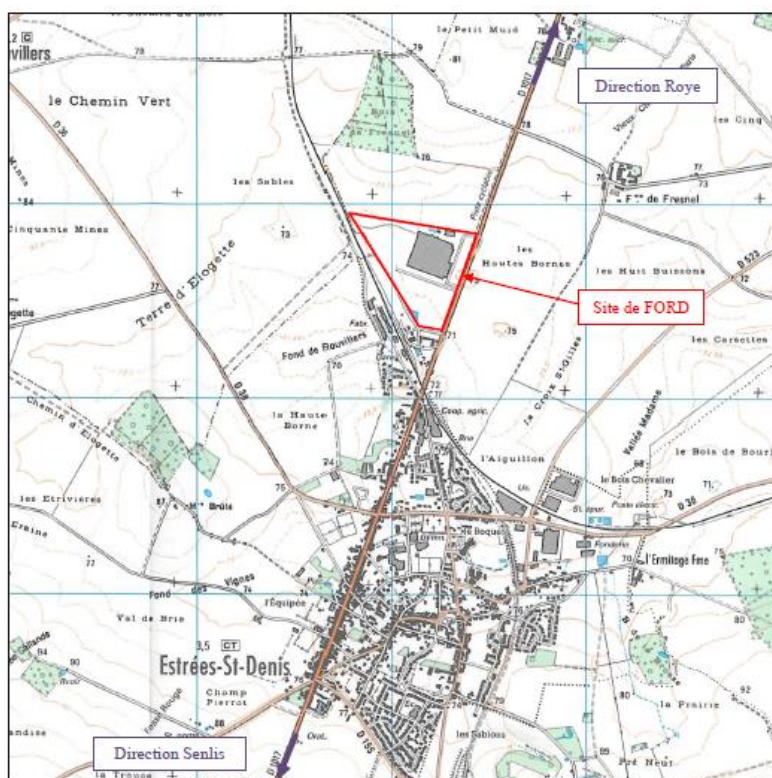


Figure 2 : Situation géographique du site

Le site possède deux bâtiments de stockage attenants, l'un de 21 800 m<sup>2</sup> (185 m x 120 m) construit en 1972, le bâtiment A, et l'autre de 14 100 m<sup>2</sup> (185 m x 75 m) construit en 1988, le bâtiment B. La hauteur de la toiture est approximativement de 8,5 m pour ces deux bâtiments. Les quais de chargement et déchargement sont situés à l'intérieur de ces bâtiments. Ces derniers contiennent également des salles spécifiques (salle de charge, stockage batterie, zones de stockage de liquides inflammables) et des locaux administratifs dont une mezzanine. Un mur coupe-feu 3 heures, autostable et dépassant de 1 m au-dessus de la toiture et de 1,80 m au-delà des façades permet de séparer les deux bâtiments. Ce mur est réalisé en béton cellulaire. Les intercommunications entre les deux bâtiments sont équipées de portes coupe-feu 2 heures (EI 120). Le déclenchement de la fermeture automatique se fait par détection de température ou détection de fumée. Enfin un bâtiment comprenant la cantine et des bureaux est accolé au bâtiment A. La Figure 3 présente ces bâtiments et ses principales zones.

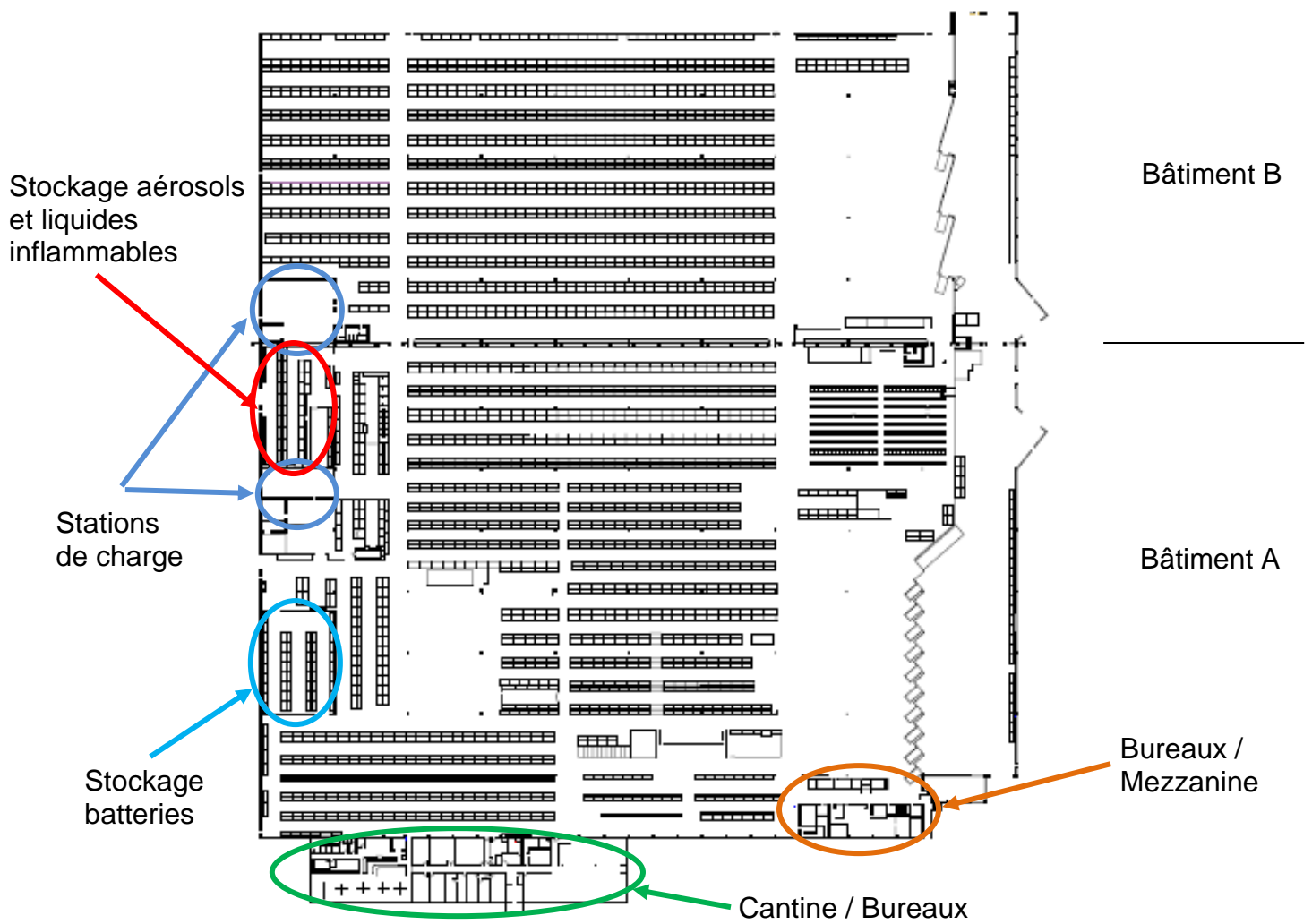


Figure 3 : Plan intérieur des bâtiments.

Le détail de la répartition des effectifs est présenté sur la Figure 4.

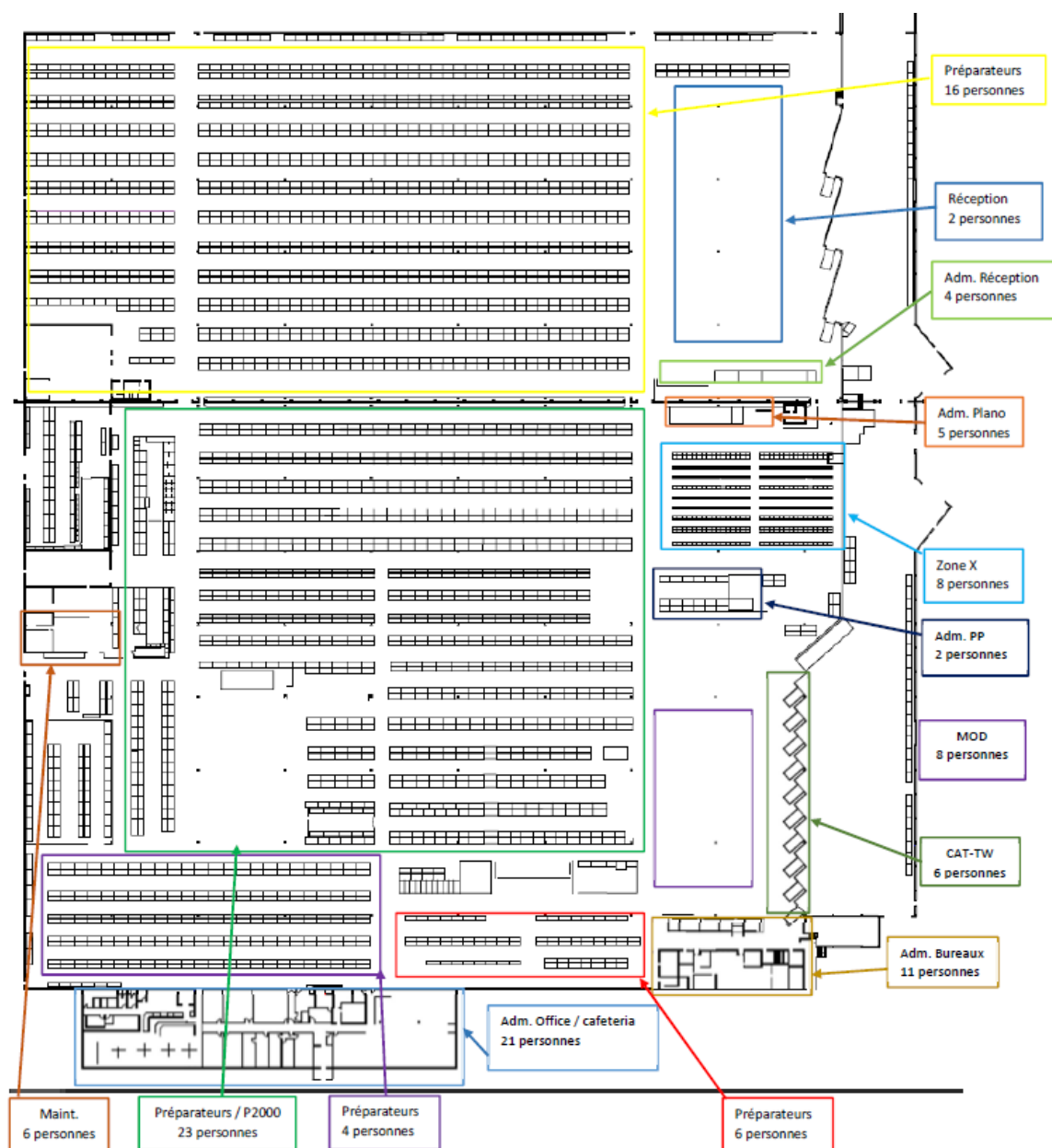


Figure 4 : Détail de la répartition des effectifs.

## 2.2 DESCRIPTION DU STOCKAGE

L'entreposage est effectué sur palettes ou dans des conteneurs spécialisés, sur rayonnages métalliques, sur 4 voire 5 niveaux. Le dernier niveau de stockage est à 6 mètres du sol.

La Figure 5 présente la répartition du stockage par zones dans les bâtiments A et B. Pour chaque zone sont répertoriées la quantité totale stockée ainsi que la quantité de combustibles.

Notons que la quantité stockée est faible en comparaison de la capacité de stockage. La Figure 6 présente, à titre d'exemple illustrant un instant donné, des photographies du stockage prises lors de la visite du site.

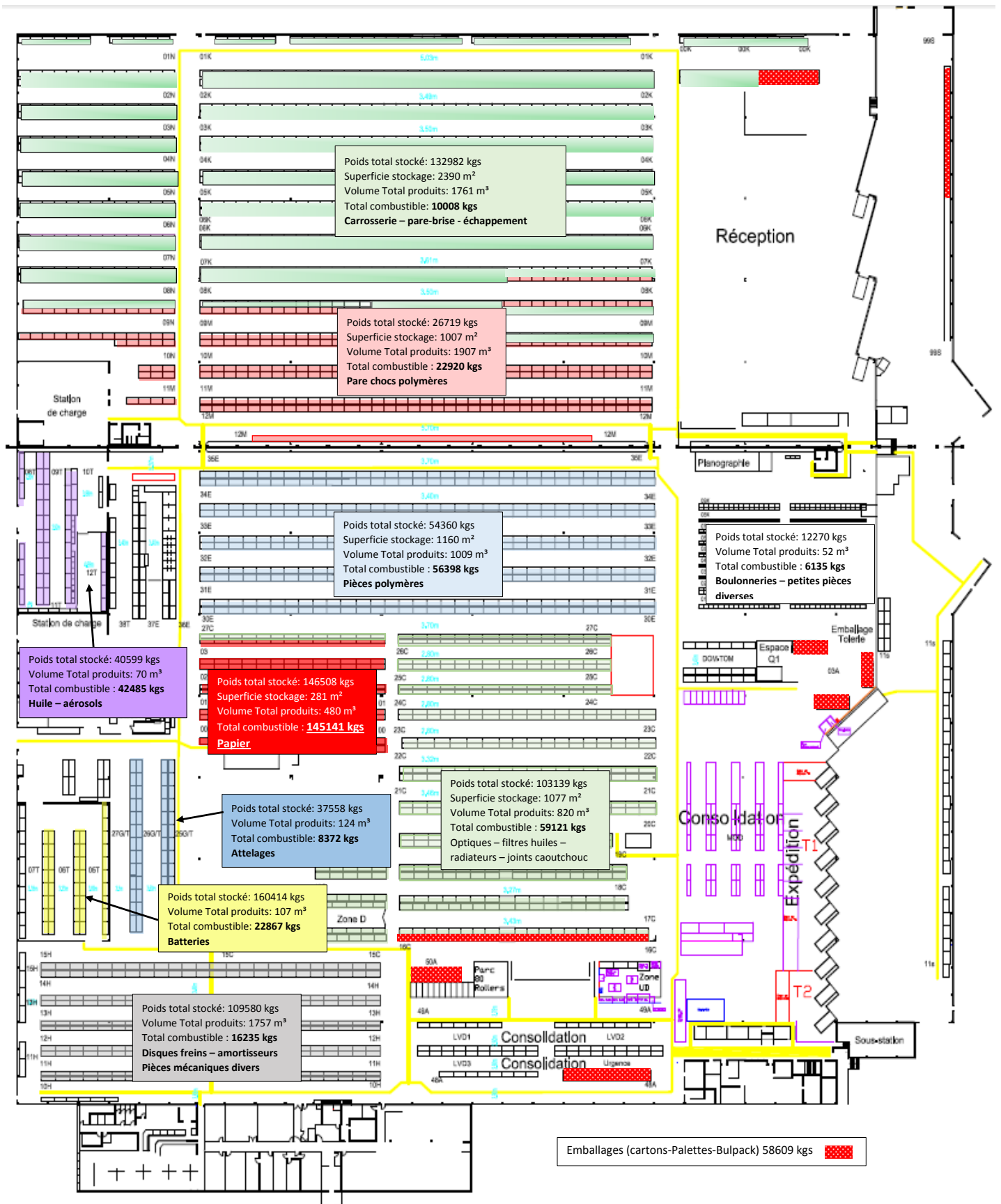


Figure 5 : Détail du stockage par zones.

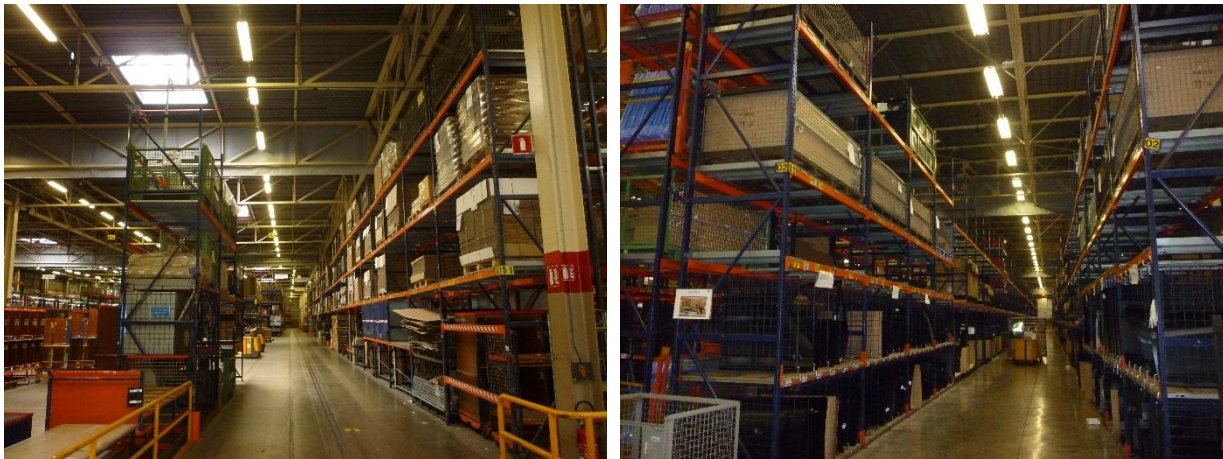


Figure 6 : Exemples de photographies du stockage du bâtiment A (à gauche) et du bâtiment B (à droite).

## 2.3 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DES BÂTIMENTS

La description de la structure de chacun des bâtiments A et B se base sur l'analyse des plans d'origine au format A0 datant des années 70 pour le bâtiment A et 80 pour le bâtiment B fournis par la société Ford et de prise de photos sur site. Certains plans concernant les dimensions d'éléments structurels étant manquants, ces éléments ont été remplacés par des éléments de constitution proche dont les plans étaient à disposition. En outre, la structure a été globalement simplifiée de sorte à ne retenir que les éléments essentiels à l'étude de ruine. Lorsque plusieurs poutres en treillis ou poteaux de dimensions proches sont présents, un seul type de poutre ou poteau est retenu, celui présentant la résistance structurelle la plus faible. Ces hypothèses sont introduites de sorte à toujours rester sécuritaire et ne pas dénaturer le mode de ruine en cas de feu.

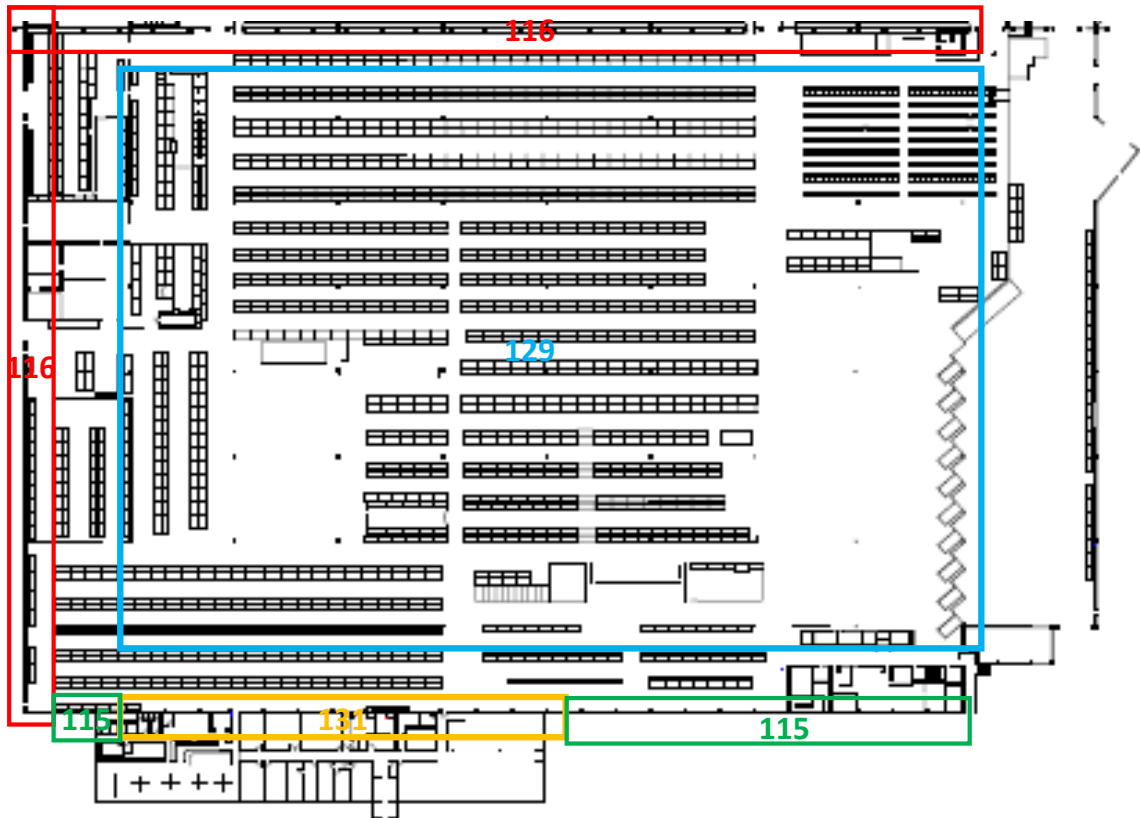
### 2.3.1 BÂTIMENT A

La structure porteuse du bâtiment A est constituée de poteaux et poutres en treillis en acier. Des éléments supplémentaires de type rails et poutres viennent, en périphérie, ceinturer le bâtiment.

#### 2.3.1.1 Position et section des poteaux

La Figure 7 présente la position et le type de poteaux dans le magasin A. Chaque type de poteau est repéré par un numéro et une couleur. Les sections de ces poteaux sont identiques. Les poteaux de rive sont équipés pour porter des rails périphériques respectivement à 2,14 m, 4,28 m et 6,42 m de hauteur. Les poteaux numérotés 131 portent également une poutre à 3,8 m et 8,5 m de haut.





*Figure 7 : Position des poteaux dans le bâtiment A*

Les poteaux sont tous de type HEA300.

### 2.3.1.2 Position et section des poutres et des rails périphériques

La Figure 8 présente la position des poutres et des rails périphériques.

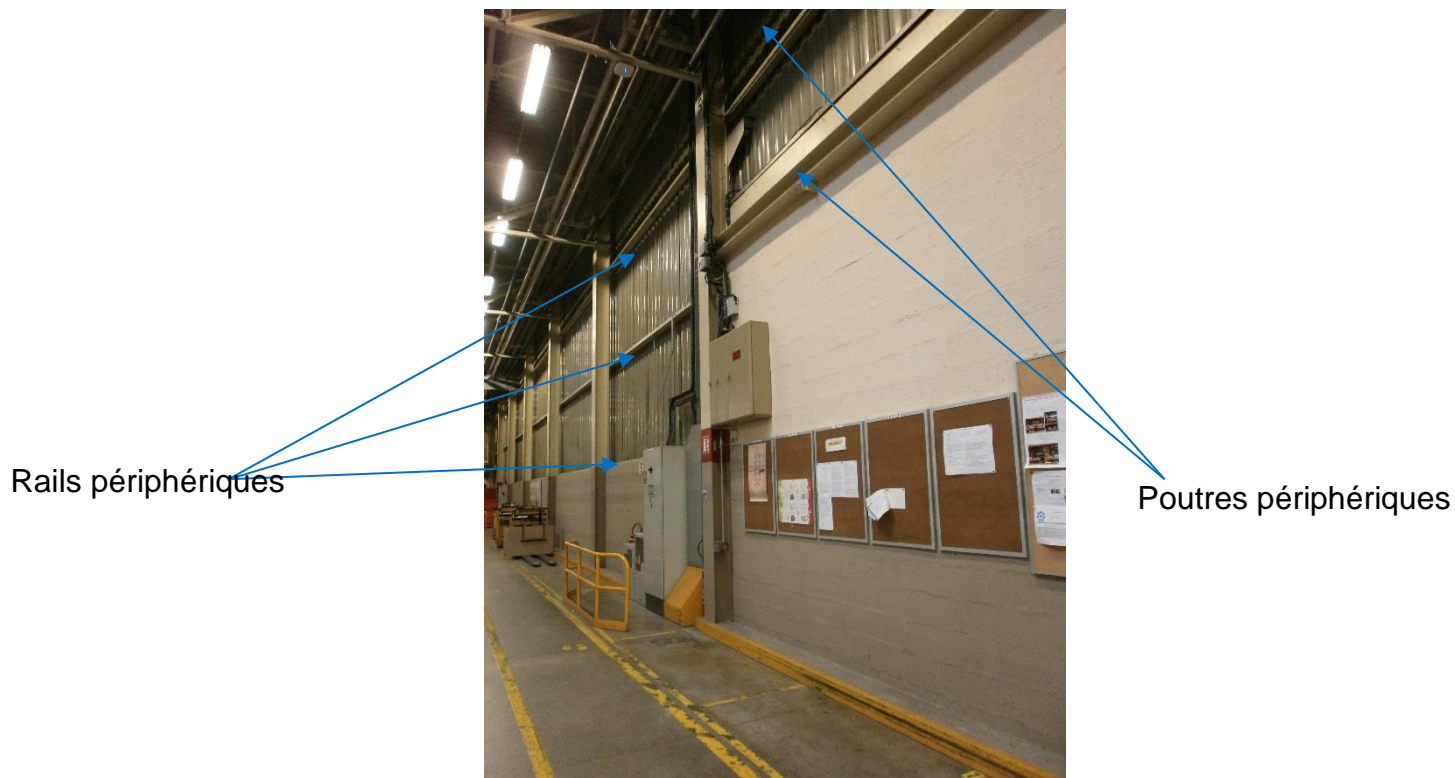


Figure 8 : Position des poutres périphériques et rails dans le bâtiment A

La poutre périphérique située à 3,8 m de haut est de type IPE360 et celle située à 8,5 m de haut est de type HEA180. La section des rails est de type « C » d'épaisseur 5 mm et dont les dimensions extérieures sont présentées sur la Figure 9.

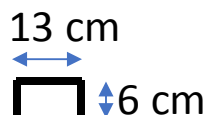


Figure 9 : Dimensions de la section des rails périphériques

### 2.3.1.3 Position et section des poutres en treillis longitudinales et transversales

La Figure 10 schématise la position des poutres en treillis avec les pas d'espace séparant les poutres entre elles. Seules quelques poutres sont représentées pour ne pas encombrer le schéma.

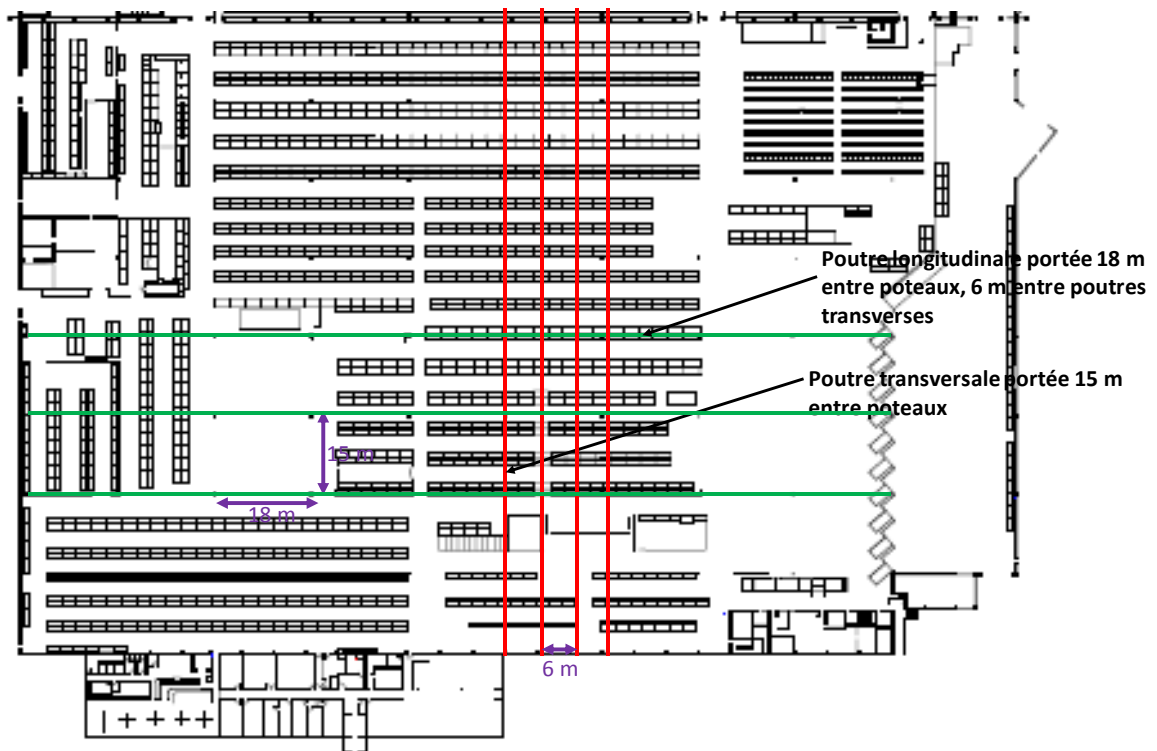


Figure 10 : Position des poutres en treillis dans le bâtiment A

Le détail d'un tronçon de poutre transversale de 15 m de long ainsi que les dimensions de ses éléments constitutifs sont représentés sur la Figure 11.

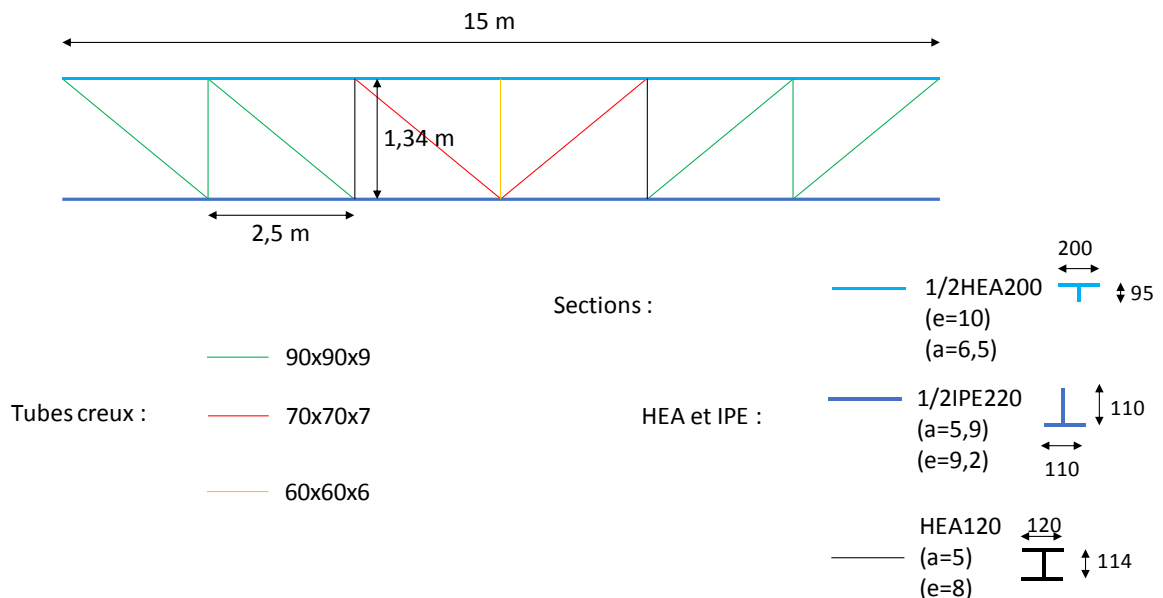


Figure 11 : Éléments constituant un tronçon de poutre transversale de 15 m de long et dimensions de ses éléments dans le bâtiment A



De même, le détail d'un tronçon de poutre longitudinale ainsi que les dimensions de ses éléments constitutifs sont représentés sur la Figure 12.

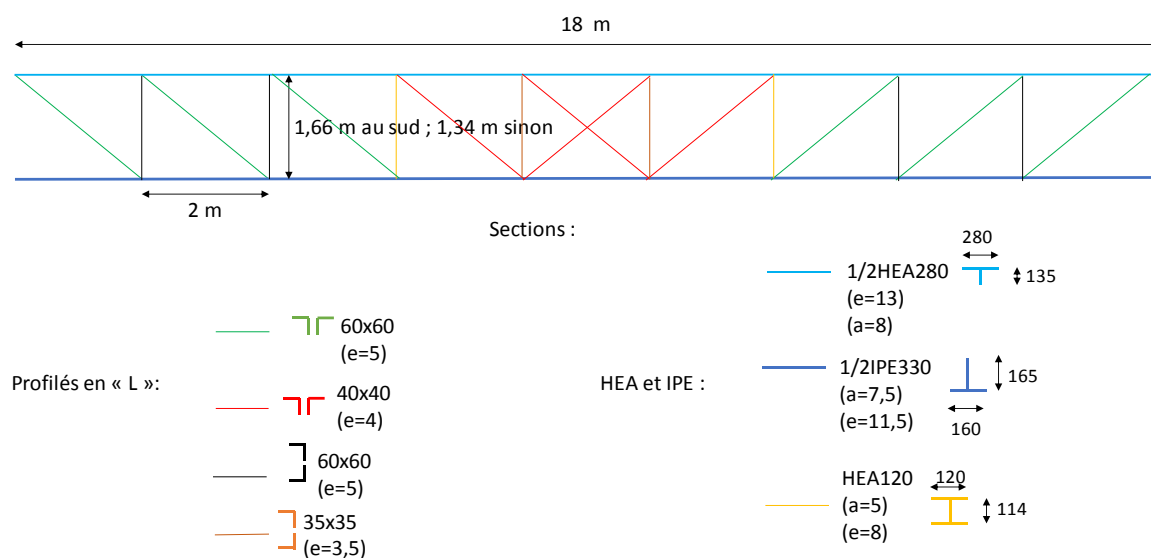


Figure 12 : Éléments constituant un tronçon de poutre longitudinale de 18 m de long et dimensions de ses éléments dans le bâtiment A

### 2.3.2 BATÎMENT B

De construction plus récente que le bâtiment A, le bâtiment B est également porté par une structure constituée de poteaux et poutre en treillis en acier. Des éléments supplémentaires de type rails viennent, en périphérie, ceinturer le bâtiment.

#### 2.3.2.1 Position et section des poteaux

La Figure 13 présente la position des poteaux et le type de poteaux à considérer dans le bâtiment B.

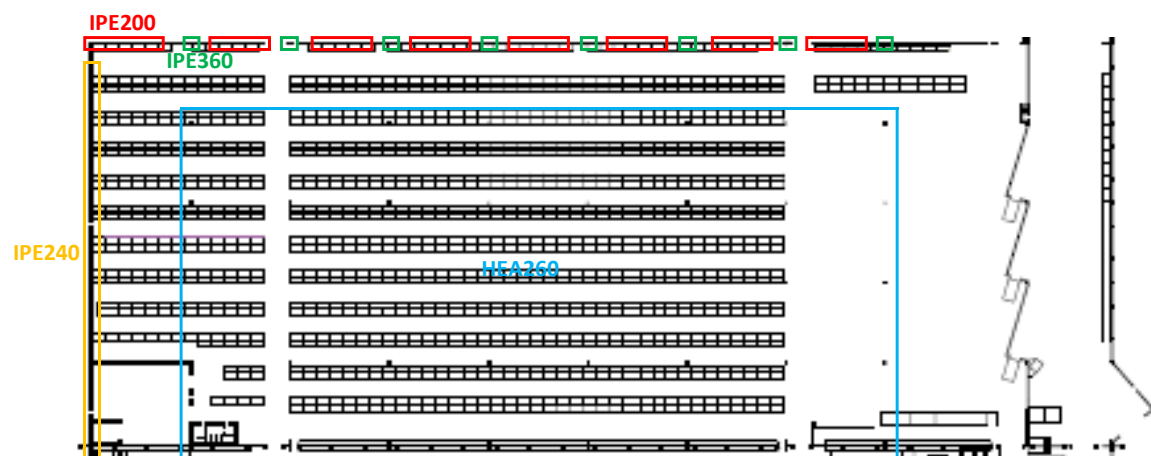


Figure 13 : Position des poteaux et types de poteaux dans le bâtiment B

### 2.3.2.2 Position et section des rails périphériques

Comme pour le bâtiment A, des rails périphériques viennent ceinturer le bâtiment B. Les dimensions des rails sont présentées sur la Figure 9, leur hauteur d'implantation étant identique à celle dans le bâtiment A.

### 2.3.2.3 Position et section des poutres en treillis longitudinales et transversales

La Figure 14 présente la position des poutres en treillis dans le bâtiment B ainsi que leur dénomination.

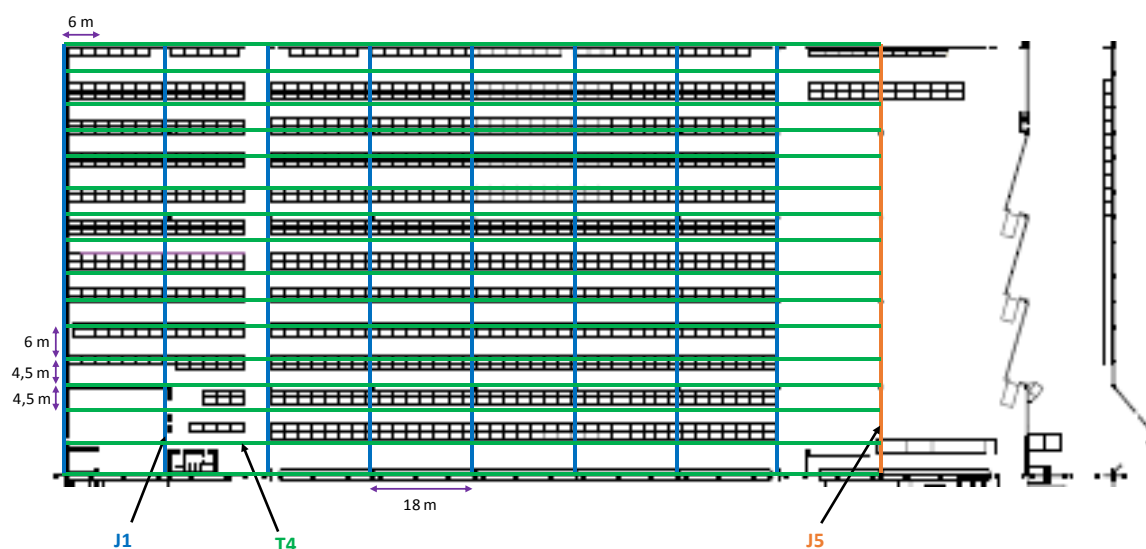


Figure 14 : Position des poutres en treillis dans le bâtiment B

Le détail d'un tronçon de poutre transversale de type J1 ainsi que les dimensions de ses éléments constitutifs sont représentées sur la Figure 15.

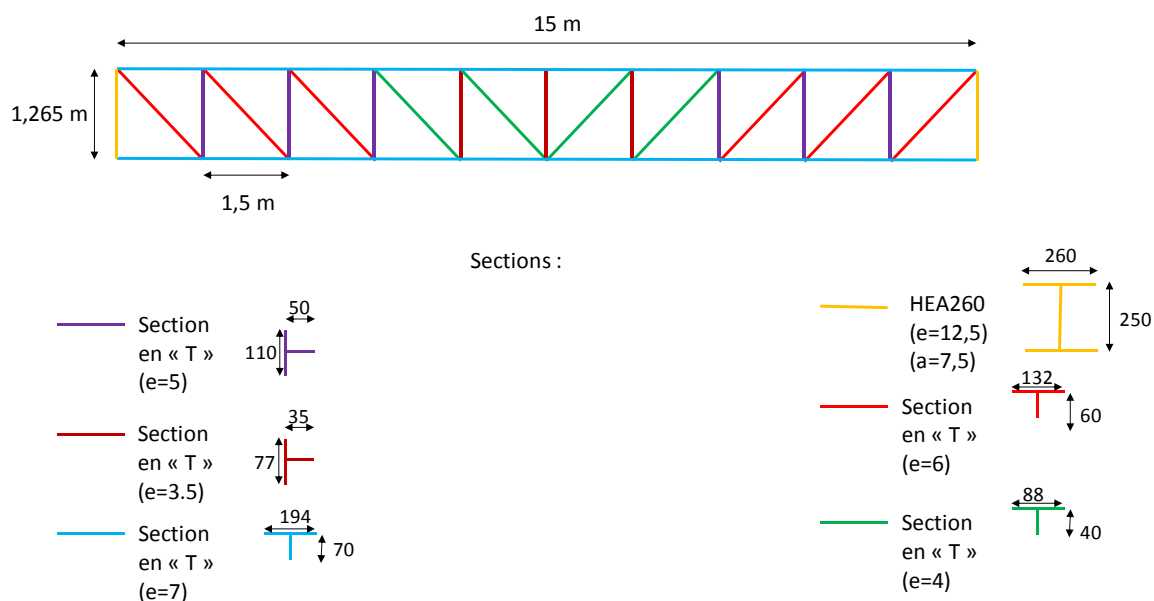


Figure 15 : Éléments constituant un tronçon de longueur 15 m de la poutre transversale J1 et dimensions de ses éléments dans le bâtiment B

De même, le détail d'un tronçon de poutre transversale de type J5 ainsi que les dimensions de ses éléments constitutifs sont représentées sur la Figure 16.

Détail d'un tronçon de poutre transversale de 15 m de long de type J5

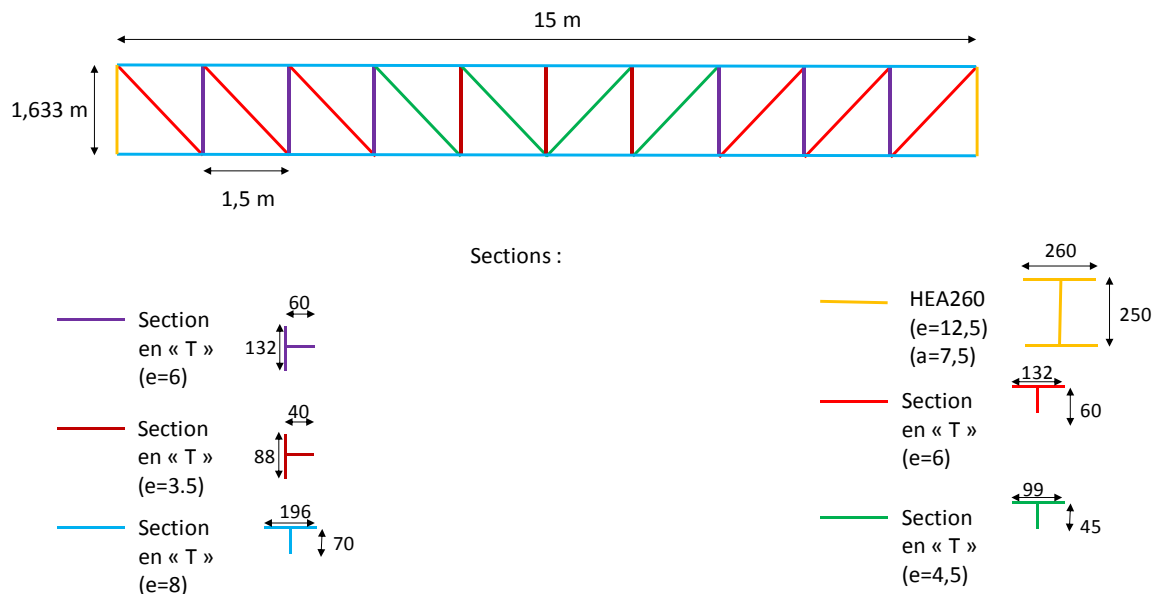


Figure 16 : Éléments constituant un tronçon de longueur 15 m de la poutre transversale J5 et dimensions de ses éléments dans le bâtiment B

Enfin, le détail d'un tronçon de poutre longitudinale de type T4 ainsi que les dimensions de ses éléments constitutifs est représenté sur la Figure 17.

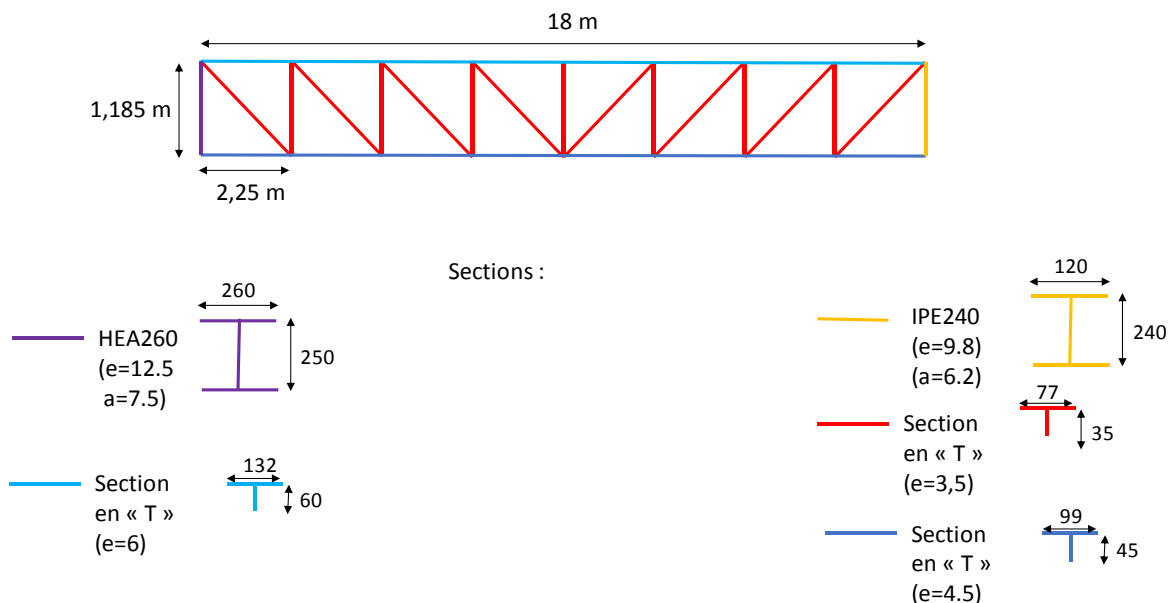


Figure 17 : Éléments constituant un tronçon de longueur 18 m de la poutre longitudinale T4 et dimensions de ses éléments dans le bâtiment B

### 2.3.2.4 Renforts ponctuels

D'autre part, à travers le temps, certains renforts ont été ponctuellement ajoutés au niveau des poutres du bâtiment B. Ces renforts et leur position sont montrés sur la Figure 18.

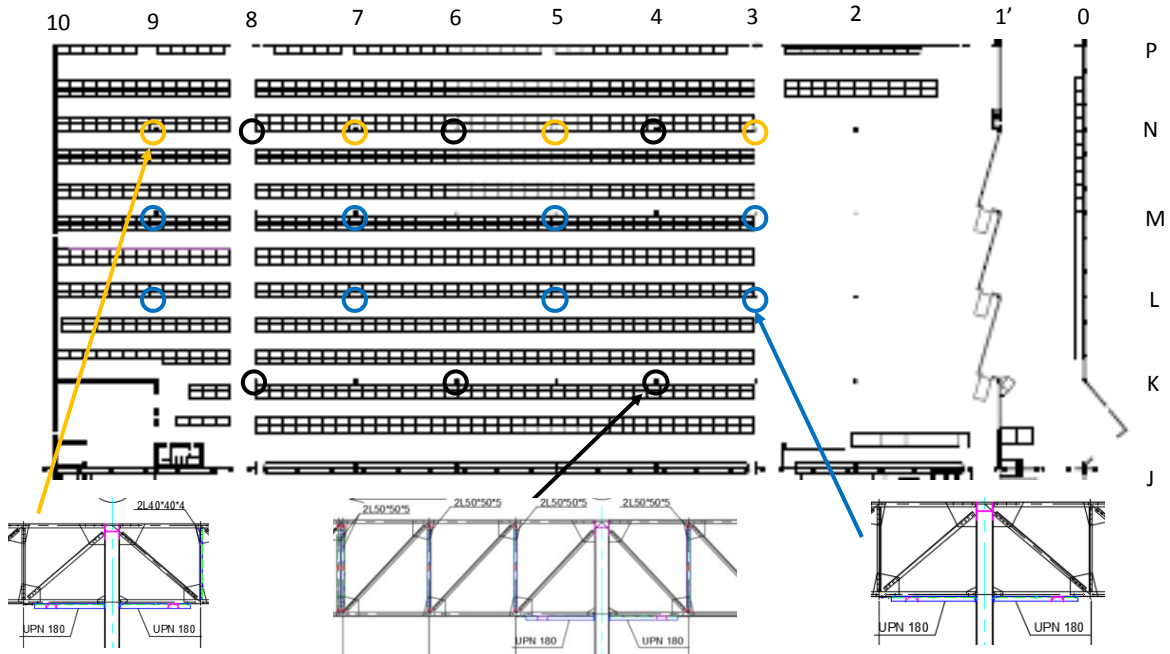
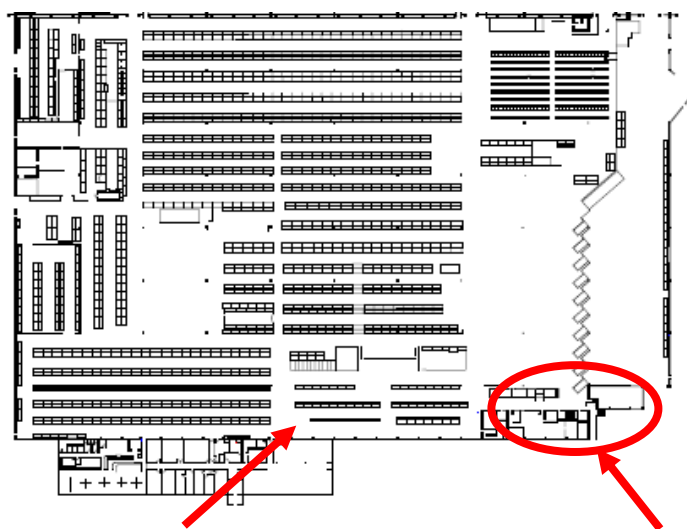


Figure 18 : Position et type de renforts ponctuels dans le bâtiment B

### 3 DUREE D'ÉVACUATION DES PERSONNES

Dans ce chapitre les durées d'évacuation nécessaires sont calculées pour les bâtiments A et B. Notons que pour le bâtiment A, la problématique de la mezzanine sera spécifiquement étudiée. Un départ de feu sur une remorque en cours de chargement sur le quai le plus proche de la mezzanine sera étudié. La compatibilité entre la cinétique de cet incendie et l'évacuation des personnes présentes sur la mezzanine sera étudiée. La zone cantine et bureaux fera l'objet d'une attention particulière concernant l'évacuation des personnes, puisque le mur séparatif avec le bâtiment A n'est pas REI 120 sur toute sa hauteur. La compatibilité entre la cinétique de l'incendie et l'évacuation des personnes présentes dans cette zone sera donc étudiée. L'emplacement de ces 2 zones est présenté sur la Figure 19.



*Figure 19 : Plan du bâtiment A avec zone cantine et bureaux (à gauche) et mezzanine (à droite).*

### 3.1 ÉVALUATION DES DISTANCES À PARCOURIR

La position des voies d'évacuation des bâtiments A et B, de la mezzanine et du bâtiment cantine et bureaux est présentée sur la Figure 20.

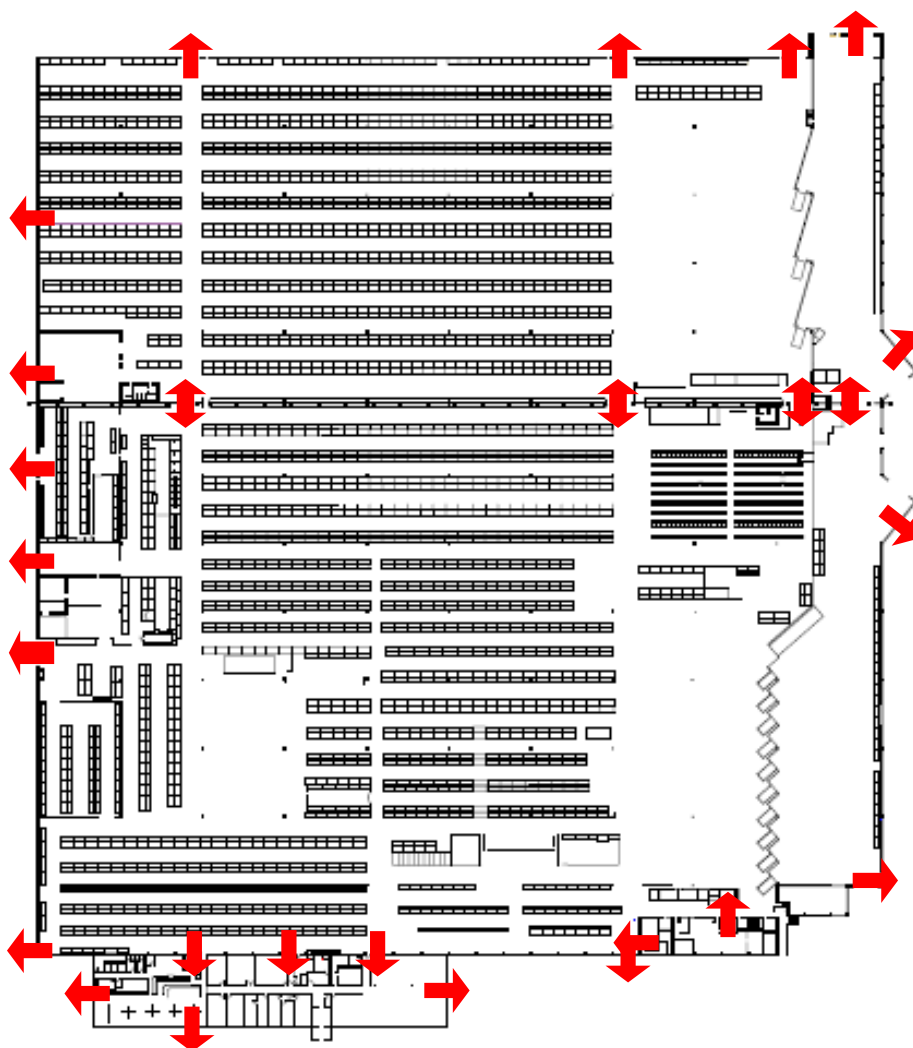


Figure 20 : Position des voies d'évacuation.

L'évaluation des distances à parcourir doit être étudiée avec départ de feu en cellule. En effet, la présence du feu peut condamner certaines sorties de secours accessibles en temps normal. Dans ce cas, il est supposé que le chemin emprunté soit le deuxième plus court, tel que représenté sur la Figure 21.

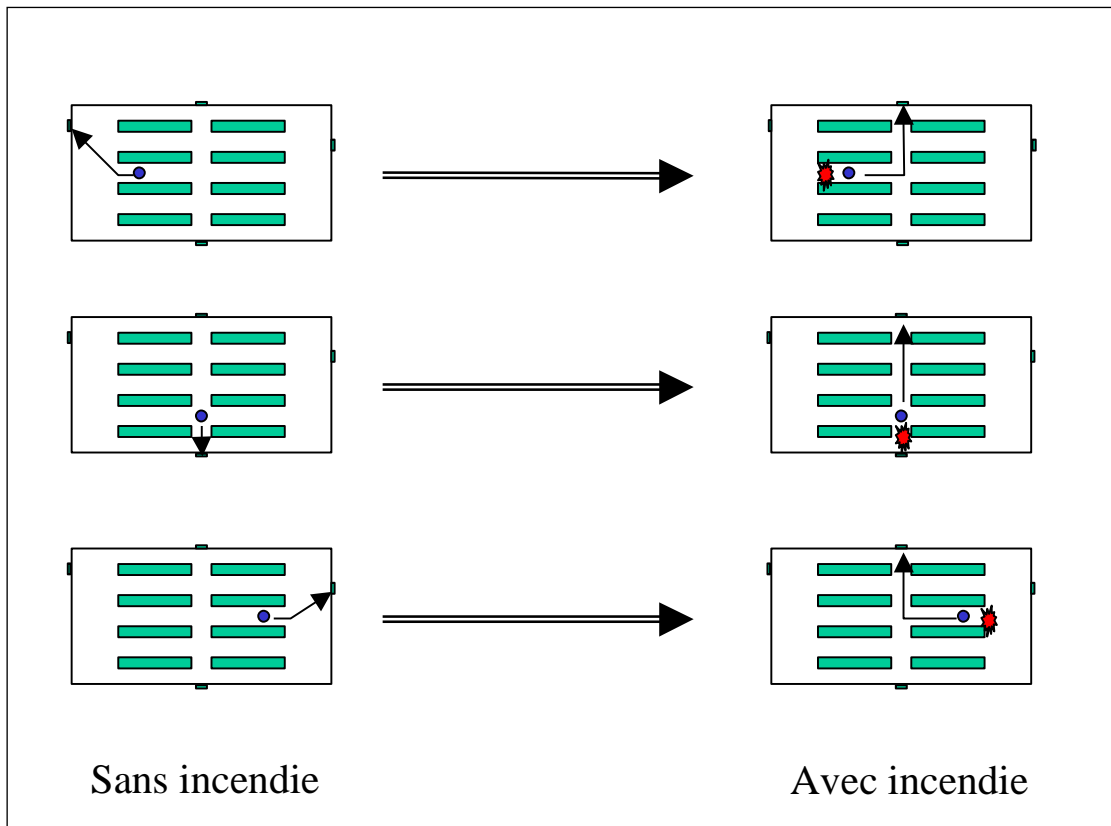


Figure 21 : Principe de calcul de la distance à parcourir pour évacuer un bâtiment en cas de départ de feu.

Les cas les plus pénalisants pour ce qui concerne la localisation du départ de feu et des distances à parcourir sont présentés sur la Figure 20 pour les bâtiments A et B.

Pour le bâtiment cantine et bureaux, la distance maximale à parcourir est calculée en considérant uniquement les 3 issues de secours menant à l'extérieur.

Pour la mezzanine la distance maximale à parcourir est estimée en considérant la distance maximale de parcours d'une personne située à l'étage et qui trouverait la 1<sup>ère</sup> issue bloquée par l'incendie.

Les distances maximales d'évacuation ainsi évaluées sont présentées dans le Tableau 1.

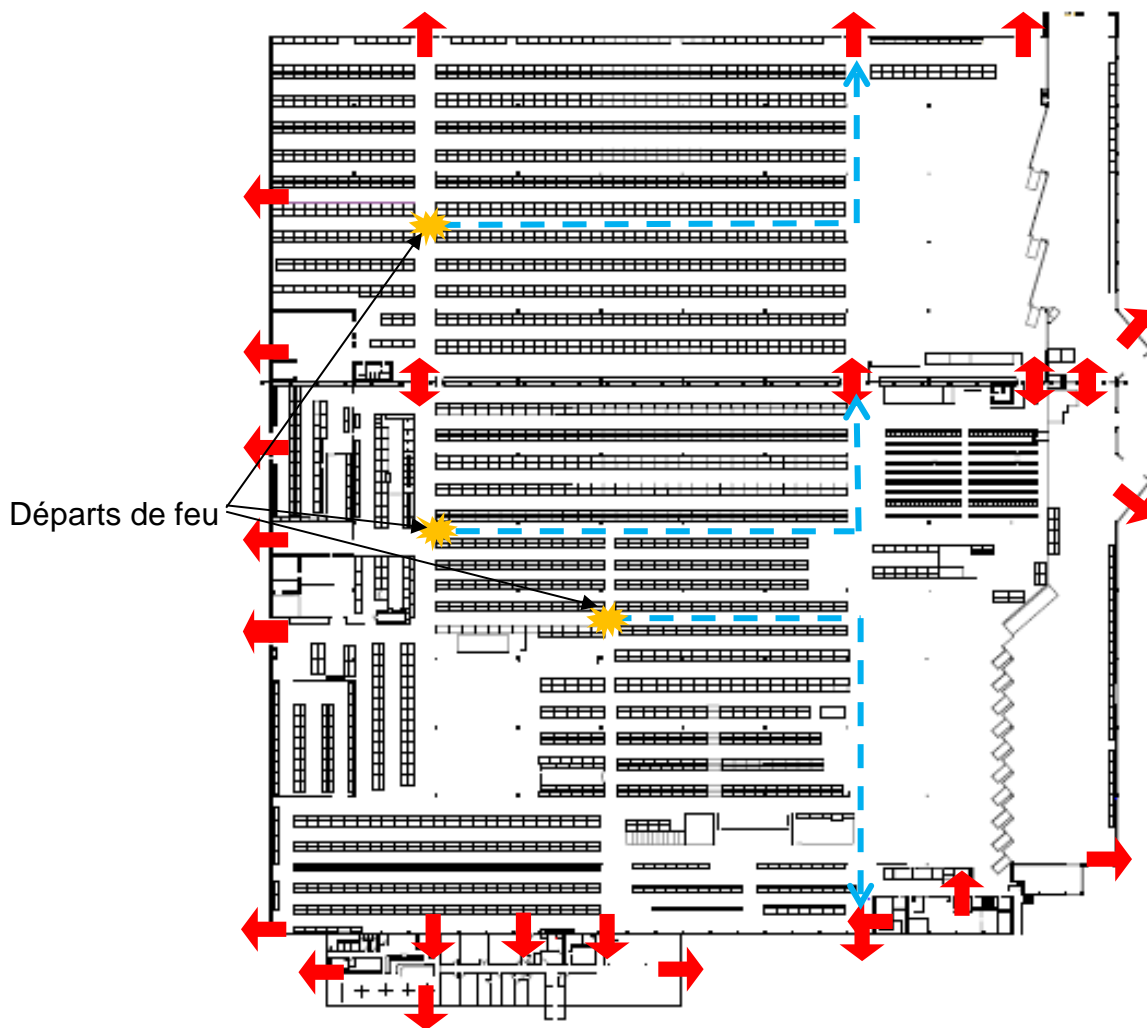


Figure 22 : Scénarios d'évacuation impliquant la plus grande distance à parcourir, matérialisée en bleu pointillé.

Zone	Bâtiment A	Bâtiment cantine	Mezzanine	Bâtiment B
Distance maximale d'évacuation [m]	130	40	40	120

Tableau 1 : Distances maximales d'évacuation

### 3.2 CALCUL DE LA DURÉE D'ÉVACUATION

Le temps total nécessaire à l'évacuation se décompose en 4 temps distincts :

- 1) le temps de détection de l'incendie qui dépend de la sensibilité du système de détection, ici les têtes de sprinklage ;
- 2) le temps de réaction des personnes (estimé à 1 min) d'après [3] ;
- 3) le temps de déplacement des personnes (à calculer en fonction des vitesses de déplacement et des distances à parcourir), évaluées à 1 m/s sans présence de fumées et à 0,5 m/s en présence de fumées [4] ;



4) le temps de franchissement des portes d'évacuation (estimé à 0,8 personne/s/porte). On suppose de manière défavorable que les personnes d'une même zone passent par la même issue d'évacuation. Le temps de franchissement de l'issue de secours est calculé en fonction du nombre de personnes présentes dans la zone étudiée (cf. Tableau 2).

Zone	Nombre de personnes présentes
Bâtiment A (dont mezzanine)	79
Bâtiment cantine	21
Mezzanine	11
Bâtiment B	22

Tableau 2 : Effectif par zone.

Le temps disponible pour l'évacuation est schématisé sur la Figure 23.

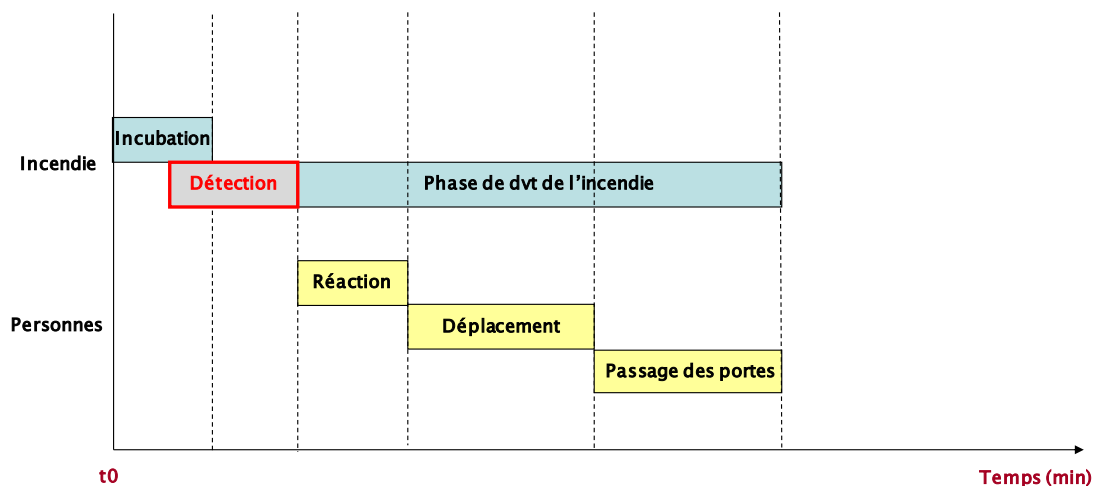


Figure 23 : Temps disponible pour l'évacuation

Les détails ainsi que les résultats des calculs du temps d'évacuations sont présentés dans le Tableau 3.

		Bâtiment A	Bâtiment cantine	Mezzanine	Bâtiment B
	Vitesse de déplacement (m/s)	1			
	Distance maximale à parcourir (m)	130	40	40	120
1	Temps de détection (s)	120			
2	Temps de réaction des personnes (s)	60			
3	Temps de déplacement maximal d'une personne (s)	130	40	40	120
	Durée nécessaire pour atteindre les issues de secours (s)	310	220	220	300
	<b>Durée nécessaire pour atteindre les issues de secours (min)</b>	<b>5,2</b>	<b>3,7</b>	<b>3,7</b>	<b>5</b>
	Nombre de personnes dans la zone	79	21	11	22
4	Temps de franchissement maximal de(s) issue(s) de secours	99	27	14	28
	Durée totale nécessaire pour évacuer la zone (s)	409	247	234	328
	<b>Durée totale nécessaire pour évacuer la zone (min)</b>	<b>6,8</b>	<b>4,1</b>	<b>3,9</b>	<b>5,5</b>

*Tableau 3 : Temps d'évacuation nécessaire pour l'évacuation.*

Les temps ainsi déterminés sont à comparer aux temps disponibles avant apparition d'effets toxiques et thermiques significatifs, perte de visibilité significative et ruine des premiers éléments de la structure. Ces temps sont obtenus au moyen de la simulation dont les hypothèses et les résultats sont présentés respectivement aux chapitres 4, 5 et 6.

## 4 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

Dans ce chapitre, les différentes hypothèses de modélisations des scénarios d'incendie sont présentées. Le logiciel utilisé pour modéliser les différents cas est le logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS) développé par le National Institute for Standard and Technology (NIST). La version utilisée est la version 5.4.2. Il est décrit dans l'annexe 1.

### 4.1 GÉOMÉTRIE DES ZONES MODÉLISÉES

La modélisation doit prendre en compte la configuration du stockage des différents bâtiments étudiés ainsi que la configuration structurelle des cellules (position exacte des poutres et des poteaux).

La totalité des bâtiments A et B a été reproduite numériquement (cf. Figure 24 et Figure 25).

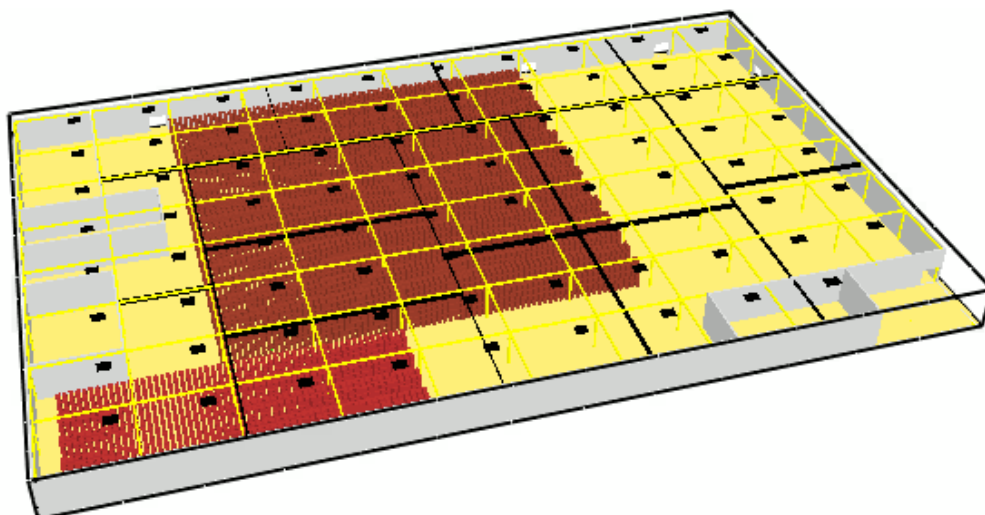


Figure 24 : Vue complète de la géométrie du bâtiment A telle que modélisée en 3D avec le logiciel FDS

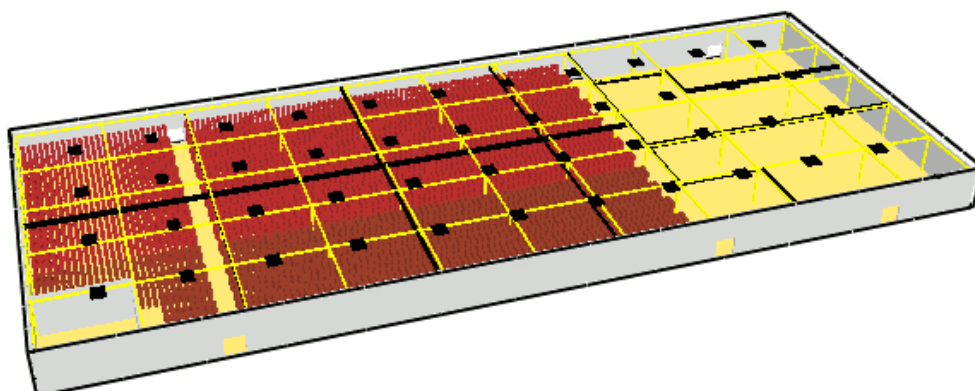


Figure 25 : Vue complète de la géométrie du bâtiment B telle que modélisée en 3D avec le logiciel FDS

Les différentes salles ont été représentées afin de prendre en compte la diminution du volume de la cellule et les modifications du comportement des fumées que cela peut engendrer.

Les deux bâtiments (A et B) sont découpés en cantons de désenfumage de surface inférieure à 1 600 m<sup>2</sup>. Ceux-ci ont été modélisés à partir des plans fournis.

Des exutoires de fumées sont présents dans les deux bâtiments. La surface utile actuelle de désenfumage représente environ 2% de la surface géométrique pour les bâtiments A et B. Les exutoires ont été répartis sur toute la surface de façon régulière et en respectant au maximum la configuration réelle. L'ouverture des exutoires est automatique (thermofusibles 123°C pour le magasin A et 171°C pour le magasin B) et manuelle. Les commandes manuelles seront installées à proximité des issues de secours. Les modélisations réalisées considèrent un fonctionnement automatique des exutoires aux températures indiquées.

Le stockage est composé de palettes représentées par des parallélépipèdes de dimension 1,2 m x 0,8 m x 1,2 m. Il est réparti conformément au plan fourni (cf. Figure 5 par exemple). De façon pénalisante, les rayonnages sont considérés complètement remplis sur 4 étages.

## **4.2 HYPOTHÈSES RELATIVES AU COMBUSTIBLE**

Le stockage présente deux zones pour lesquelles la proportion de combustibles est inférieure à 15% (cf. Figure 26). Pour ces zones une palette spécifique est considérée. Partout ailleurs, le stockage est représenté par des palettes type 1510 au sens de la méthode Flumilog [2].

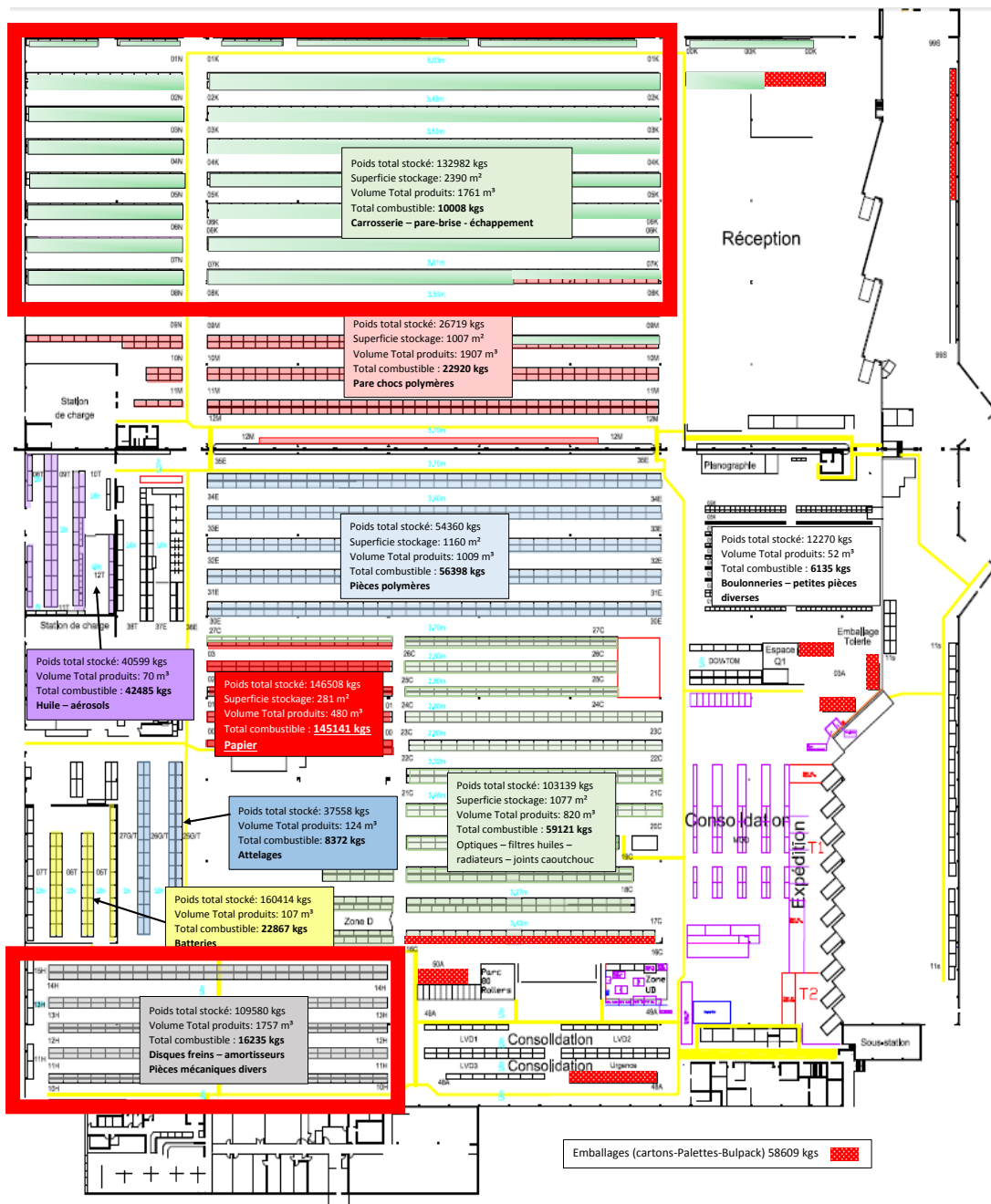


Figure 26 : Détail du stockage. Les zones pour lesquelles la proportion de combustible est inférieure à 15% sont entourées en rouge.

### Palette type 1510

Les essais réalisés à l'INERIS dans le cadre des programmes de recherche ont permis d'évaluer la cinétique de combustion de palettes de produits classés dans la rubrique 1510. Celle-ci se décompose comme suit :

1. une phase de montée en puissance rapide (loi de montée en puissance de la forme  $P=\alpha t^2$  avec  $t$  le temps et  $\alpha$  le coefficient de développement du feu égal à 0,0469 [3]) ;
2. une phase plateau correspondant à un régime de combustion stationnaire développant une puissance maximale ;

### 3. une phase de décroissance et d'extinction.

La combustion totale des palettes standards s'étale sur une durée de 65 minutes quelle que soit la nature des produits. La Figure 27 présente le graphe de la puissance développée par la combustion de ces palettes en fonction du temps. La palette standard au sens de la méthode Flumilog, de dimensions 1,2x0,8x1,5 m<sup>3</sup>, développe une puissance maximale de 1525 kW. La puissance maximale de la palette considérée est rapportée à sa hauteur, 1,2 m, pour obtenir une valeur de 1220 kW.

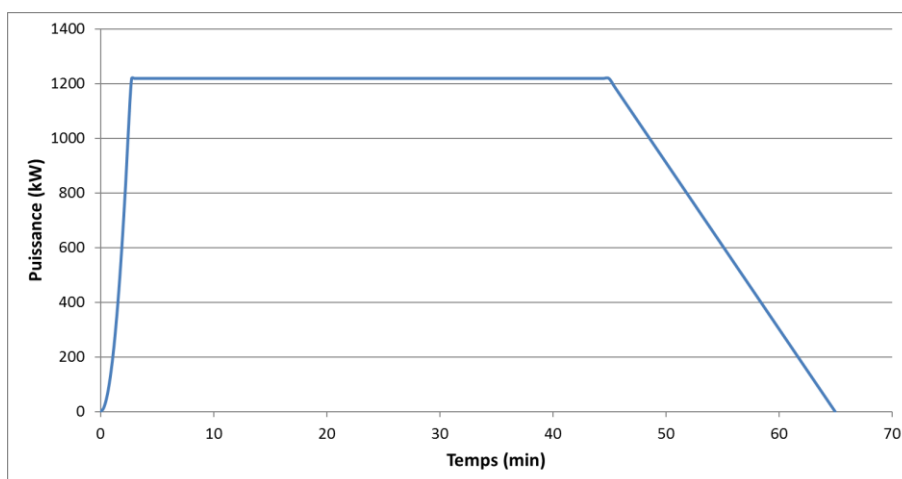


Figure 27 : Cinétique de combustion d'une palette type 1510

#### Palette spécifique

Dans les deux zones pour lesquelles la proportion de combustible est inférieure à 15% (cf. Figure 26) une palette spécifique est définie. Les deux zones sont présentées dans le Tableau 4. Une seule palette est définie pour les deux zones. Elle est construite à partir des données de la zone notée 1-A pour laquelle la proportion de combustibles est la plus élevée.

Zone - Bâtiment	1-A	2-B
Masse totale [kg]	109 580	132 982
Masse combustible [kg]	16 235	10 008
Produits stockés	Disques de frein, amortisseurs, pièces mécaniques diverses en métal	Éléments de carrosserie, pare-brise, pot d'échappement

Tableau 4 : Zones pour lesquelles la proportion de combustibles est inférieure à 15%

Pour calculer la puissance de la palette, la composition suivante est considérée :

- Bois : 20 kg
- Carton : 10 kg
- PE : 10 kg
- Verre : 40 kg

- Métal acier : 40 kg

Cette composition est pénalisante puisque :

- La masse est deux fois plus élevée que celle calculée à partir de la quantité stockée ramenée au nombre d'emplacements.
- La proportion de combustibles est deux fois plus élevée.

À partir de cette composition, la puissance palette et la durée de combustion sont calculées au moyen du logiciel Flumilog. Une puissance de 594 kW pour une durée de combustion de 25 minutes est ainsi obtenue.

C'est ensuite cette palette spécifique qui est utilisée dans le calcul des zones concernées, palettes de couleur rouge sur les Figure 24 et Figure 25). Partout ailleurs une palette type 1510 est utilisée (cf. palettes de couleur marron sur les Figure 24 et Figure 25).

Afin de modéliser le phénomène de propagation de l'incendie, le critère d'inflammation des produits d'une palette à l'autre est une température de 250°C, température d'inflammation du bois.

### 4.3 CRITÈRES DE TENABILITÉ

Trois composants dangereux déterminent la tenabilité des personnes en cours d'évacuation :

- la toxicité des effluents issus du feu ;
- la chaleur dégagée par les fumées ;
- l'obscurcissement par les fumées conditionnant la visibilité.

Afin d'assurer des conditions d'évacuation compatibles avec le développement des fumées, ces trois paramètres doivent se maintenir à des seuils acceptables pendant toute la durée de l'évacuation. Les paragraphes suivants présentent les différents seuils considérés dans l'étude.

#### 4.3.1 CRITÈRES DE TENABILITÉ POUR LE PERSONNEL

Concernant le personnel, les critères de tenabilité sont présentés dans les paragraphes suivants.

##### 4.3.1.1 Conditions de visibilité

Pour ce qui concerne les conditions de visibilité, les fumées sont considérées comme opaques pour une visibilité inférieure à 10 m à hauteur d'homme [4].

L'évaluation de l'opacité des fumées est déterminée à partir de la relation suivante [5] :

$$K = K_m \rho Y_s$$

Avec :

- $K$  = Coefficients d'extinction [ $m^{-1}$ ]
- $K_m$  = Coefficient d'extinction massique qui dépend du combustible [ $m^2/kg$ ]
- $\rho$  = Masse volumique de la suie [ $kg/m^3$ ]
- $Y_s$  = Concentration massique de suie [-]

$$K_m = 8700 \text{ m}^2/\text{kg}.$$

Cette valeur est issue des travaux de G.W. Mulholland et C. Croarkin [6] pour la combustion de bois et de plastique.

La distance de visibilité est alors donnée par :

$$D = C/K,$$

où C est un coefficient qui dépend du contraste de l'objet à voir. C varie entre 3 pour une source sombre et 8 pour une source lumineuse. C est pris égal à 3 de manière prudente.

On rappelle que les distances de visibilité sont données à titre indicatif étant donné l'incertitude qui existe sur les coefficients  $K_m$  et C.

Afin de modéliser les effets de visibilité en prenant en compte l'ensemble des produits susceptibles d'être stockés, la réaction retenue dans FDS est celle du polyuréthane (PU), pour prendre en compte la combustion des matières plastiques fortement fumigène. Le taux de production de suies retenu pour cette réaction, autrement dit la quantité de suie générée par 1 kg de combustible est de 0,07 kg. Cette valeur moyenne a été mesurée pour un feu de polyuréthane avec présence de flammes [5].

#### 4.3.1.2 Conditions thermiques

Pour ce qui concerne les conditions thermiques, la température à hauteur d'homme ne doit pas excéder 60°C, température susceptible d'endommager les tissus pulmonaires d'après la norme ISO 13571 [7].

#### 4.3.1.3 Conditions de toxicité

L'approche utilisée est celle de la norme ISO 13571 [7] qui permet de distinguer l'effet des gaz irritants et celui des gaz asphyxiants sur la capacité des personnes à évacuer.

##### 4.3.1.3.1 Notion de FED

La dose effective fractionnelle (FED) est un modèle permettant d'évaluer les effets asphyxiants des fumées toxiques sur l'organisme humain en fonction du temps d'exposition. En considérant classiquement que, au cours d'un incendie, les principaux gaz asphyxiants sont le monoxyde de carbone CO et l'acide cyanhydrique HCN, la dose effective fractionnelle s'exprime comme suit :

$$X_{FED} = \sum_{t_0}^{t_1} \frac{CO}{35000} \Delta t + \sum_{t_0}^{t_1} \frac{\exp(HCN / 43)}{220} \Delta t \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

CO	=	Concentration moyenne de CO [ppm] sur le temps $\Delta t$
HCN	=	Concentration moyenne de HCN [ppm] sur le temps $\Delta t$
$\Delta t$	=	Pas de temps [min]
$t_1$	=	Durée d'exposition de l'individu [min]

D'autre part, les concentrations de gaz auxquelles sont soumises les individus au cours de leur évacuation sont augmentées du fait de l'hyperventilation. Celle-ci est principalement la conséquence de la présence du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>. Dès



lors, les concentrations apparaissant dans l'Équation 1 sont à multiplier par le facteur  $v_{CO_2}$  tel que :

$$v_{CO_2} = \exp\left(\frac{CO_2}{5}\right) \quad \text{Équation 2}$$

Avec

$CO_2$  = Concentration de  $CO_2$  [%v/v].

#### 4.3.1.3.2 Notion de FEC

La concentration effective fractionnelle permet d'évaluer les effets des gaz irritants en fonction de leurs concentrations dans les fumées [7].

$$X_{FEC} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{Seuil_i} \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

$C_i$  = Concentration du polluant i [ppm]

$Seuil_i$  = Seuil d'effet du polluant i [ppm]

Le tableau suivant fournit les valeurs des seuils pour chaque gaz irritant susceptible d'être présent dans les fumées de combustion. Ces valeurs sont issues de la norme ISO 13 571 [7].

Gaz toxique	Seuil <sub>i</sub> [ppm] [6]
HCl	1 000
HBr	1 000
HF	500
SO <sub>2</sub>	150
NO <sub>2</sub>	250

Tableau 5 : Valeurs seuils pour chacun des gaz irritants considérés

#### 4.3.1.3.3 Critère retenu

Sachant que le critère de seuil de FED et FEC de 1 sert statistiquement à protéger uniquement la moitié de la population exposée, et que la relation entre ces indicateurs et le pourcentage de la population susceptible de subir des effets irritants ou asphyxiants suit une loi log-normale, l'INERIS retient un critère de seuil de 0,3 pour les deux indicateurs, ce qui se traduit statistiquement par 11,4 % de la population susceptible de subir des conditions de tenabilité compromises. Cette valeur permet de manière prudente, de s'assurer de l'absence d'effet sur 90% de la population.

En supposant que les concentrations des gaz toxiques dans les fumées restent proportionnelles entre elles, les concentrations seuils de CO sont déterminées :

- à partir des résultats d'essais de feu sur fûts contenant des matières plastiques réalisés à l'INERIS,
- à partir des équations 1 et 2 et en fixant les indicateurs à 0,3.

Ces seuils obtenus sont présentés dans le Tableau 6.

	Valeur seuil	Concentration seuil de CO [ppm]
FED	0,3	850
FEC	0,3	220

*Tableau 6 : Concentration seuil de CO*

Il sera supposé que les proportions relatives des espèces chimiques restent les mêmes, ce qui est généralement vérifié étant donné que les fumées sont très peu réactives. Il est à noter que l'influence du gaz CO<sub>2</sub> est prise en compte comme présenté au paragraphe 4.3.1.3.1.

Le critère de tenabilité retenu dans les divers scénarios de feu de la présente étude sera donc une concentration volumique en CO égale à 220 ppm, valeur la plus petite du Tableau 6 donc la plus rapidement atteinte au cours de l'évacuation et la plus sécuritaire.

#### **4.3.2 CRITÈRES DE TENABILITÉ POUR LES SERVICES D'INTERVENTION**

Concernant les services d'intervention, les critères de tenabilité sont les suivants :

- la température doit être inférieure à 100 °C en partie basse du bâtiment (hauteur d'homme), qui est la température limite d'utilisation des ARI (Appareil Respiratoire Individuel).
- la température des couches chaudes, situées en partie haute du bâtiment, doit être inférieure à 500 °C car à cette température, un flash-over est susceptible de se produire.

Aucun critère sur la toxicité ni sur la visibilité n'est donné pour les services de secours car le critère de température demeure le facteur prédominant pour une personne équipée d'un ARI. Il faut toutefois souligner qu'une faible visibilité rend l'intervention plus délicate pour les services de secours.

#### **4.4 PLANS DE COUPE**

Les plans de coupe permettent de représenter les champs de température, de concentration de monoxyde de carbone et de visibilité établis à un instant t. Ils sont situés perpendiculairement à l'axe z à 1,6 m au-dessus du sol, hauteur de respiration pour les personnes situées aux niveaux considérés. Afin de visualiser le développement du feu dans les racks, des plans de coupe dans l'axe de la zone d'inflammation sont également utilisés.

## **5 MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE L'INCENDIE**

Ce chapitre présente les scénarios retenus puis les résultats obtenus pour la puissance d'incendie et les conditions de tenabilité pour ces scénarios.

### **5.1 CHOIX DES SCÉNARIOS**

L'objectif de ce chapitre est de montrer que la cinétique du feu est compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours. À ce titre 4 scénarios sont modélisés :

1. Scénario C1-A : le départ de feu se situera au centre du stockage du bâtiment A afin de favoriser un développement du feu très rapide, rendant les conditions thermiques, toxiques et de visibilité pénalisantes pour les personnes situées dans cette zone.
2. Scénario C2-A : le départ de feu se situera à côté du mur séparant le bâtiment A du bâtiment cantine afin d'étudier l'évacuation du personnel présent dans le bâtiment cantine dans la situation la plus pénalisante.
3. Scénario C3-A : départ de feu sur le poids lourd stationnant au plus près de la mezzanine afin d'étudier l'évacuation du personnel présent dans la mezzanine dans la situation la plus pénalisante.
4. Scénario C1-B : le départ de feu se situera au centre du stockage du bâtiment B, dans la zone des palettes type 1510, afin de favoriser un développement du feu très rapide, rendant les conditions thermiques, toxiques et de visibilité pénalisantes pour les personnes situées dans cette zone.

La Figure 28 présente le positionnement des départs de feu pour les différents scénarios.

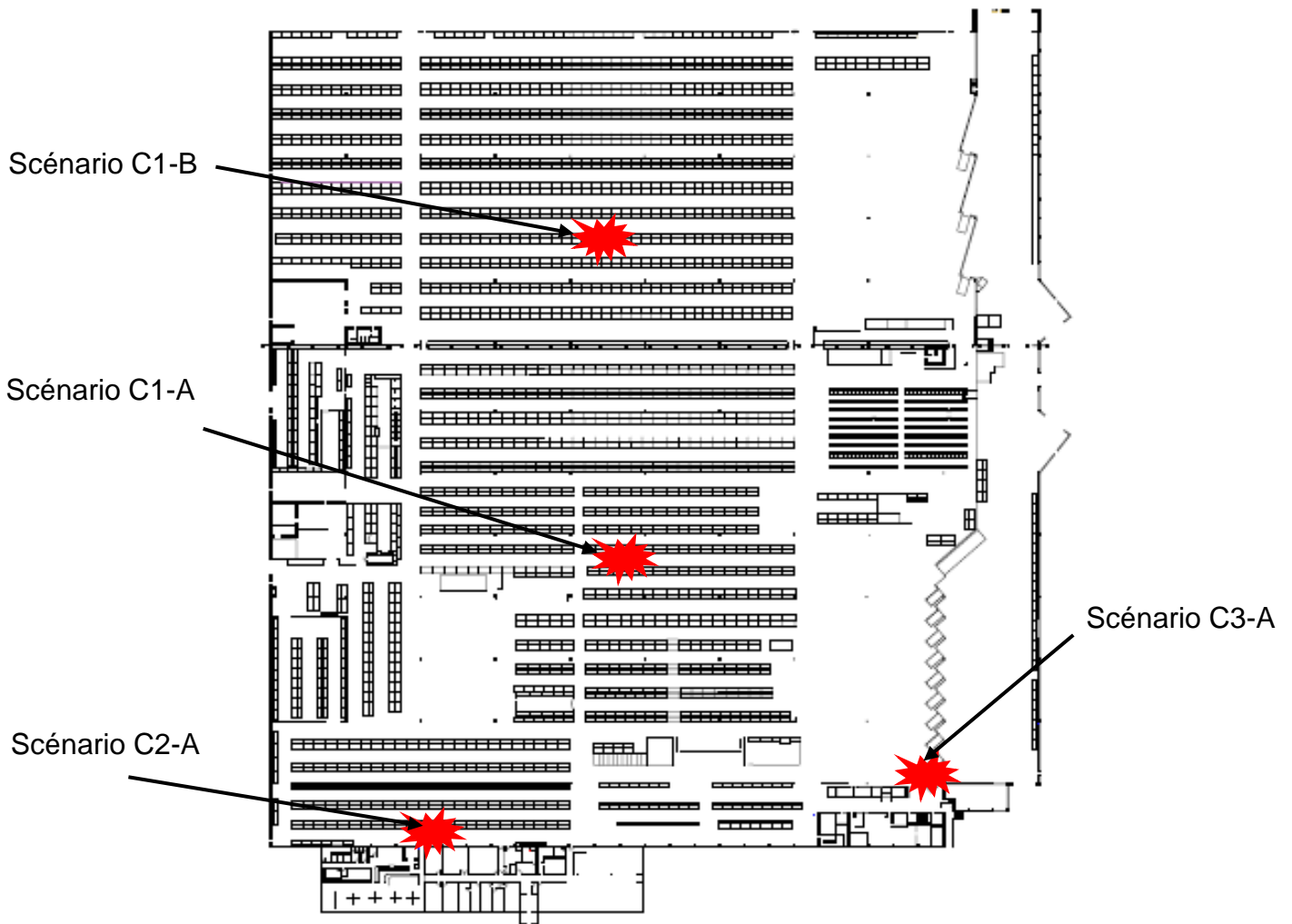


Figure 28 : Position des départs de feu retenus

### 5.1.1 BÂTIMENT A : SCÉNARIO C1-A

#### 5.1.2 PUISSANCE DÉVELOPPÉE

La puissance de l'incendie développée calculée par le logiciel FDS est représentée sur la Figure 29. Elle est comparée à la puissance théorique au sens de Drysdale [1] telle que  $P = \alpha t^2$ , avec

- $\alpha$  = Taux d'accroissement de l'incendie ( $\text{kW/s}^2$ ).  $\alpha$  vaut  $0,0469 \text{ kW/s}^2$  pour un incendie rapide (fast) ;
- $t$  = temps (s).

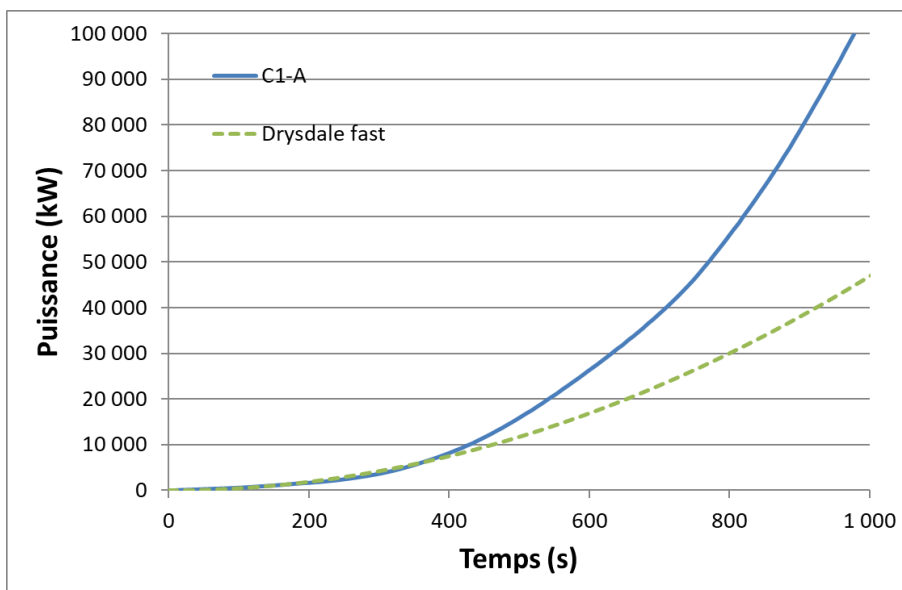


Figure 29 : Scénario C1-A - Évolution de la puissance de l'incendie

La montée en puissance est rapide ce qui est cohérent avec la géométrie des cellules et du stockage.

### 5.1.3 CONDITIONS DE TENABILITÉ POUR LE PERSONNEL

Les résultats obtenus pour les conditions de visibilité, thermiques et toxiques pendant l'évacuation du personnel sont présentés dans les paragraphes suivants.

#### 5.1.3.1 Conditions de visibilité

Pour mémoire, les distances de visibilité sont données à titre indicatif étant donné l'incertitude qui existe sur les coefficients  $K_m$  et  $C$ . La Figure 30 présente l'échelle de visibilité considérée, elle s'étend de 0 m à 10 m, la valeur maximale de visibilité étant supérieure. La Figure 31 montre l'évolution de la visibilité en fonction du temps telle que calculée à l'aide du logiciel FDS.

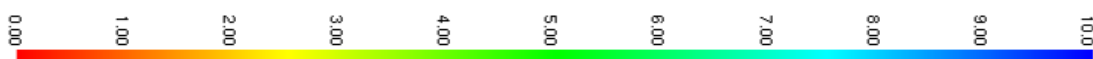
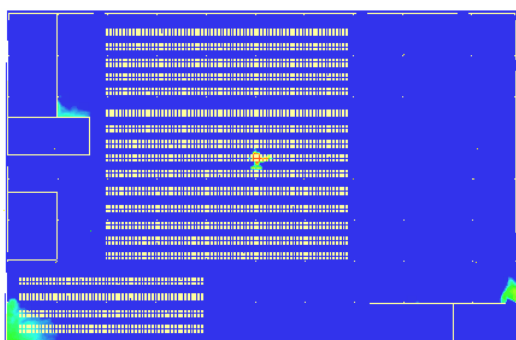
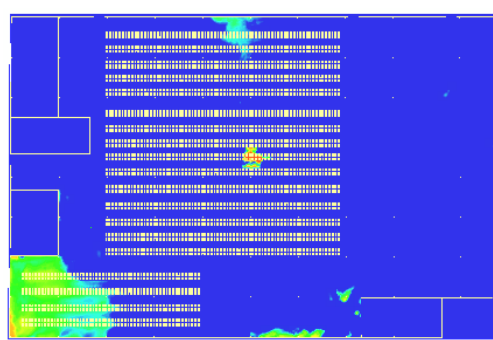


Figure 30 : Échelle de visibilité



T=10 min



T=13 min

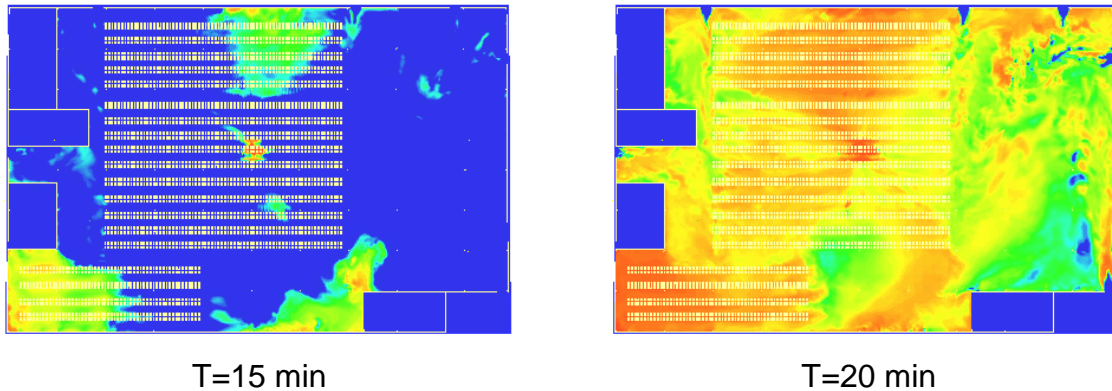


Figure 31 : Scénario C1-A - Évolution de la visibilité à hauteur d'homme au cours du temps.

Le temps disponible avant perte significative de visibilité à retenir ici est estimé à 13 minutes.

### 5.1.3.2 Conditions thermiques

Afin d'éviter les dommages irréversibles au niveau des tissus pulmonaires, il convient d'éviter une montée de la température ambiante au-delà de 60 °C à hauteur de respiration des personnes. La Figure 32 montre l'échelle utilisée pour la température, bornée entre 20 et 60°C. La Figure 33 représente l'évolution de la température ambiante dans la cellule à hauteur d'homme en fonction du temps.

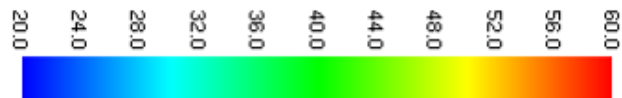
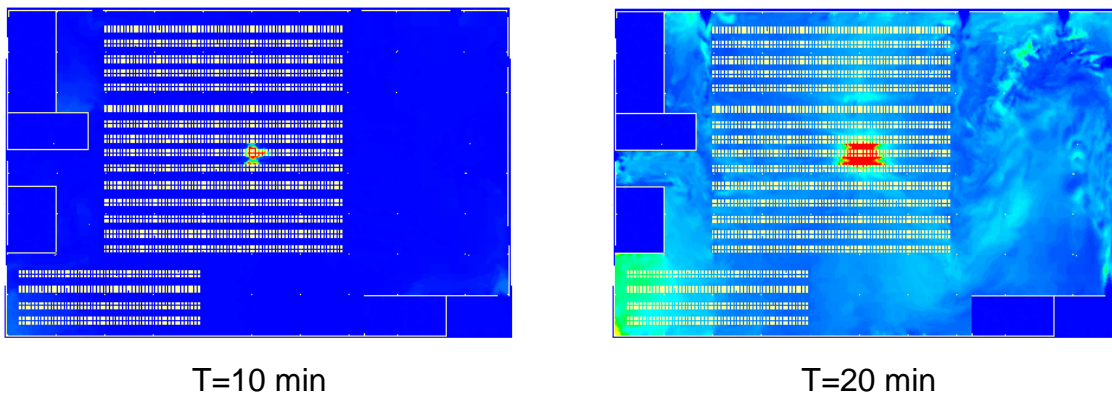
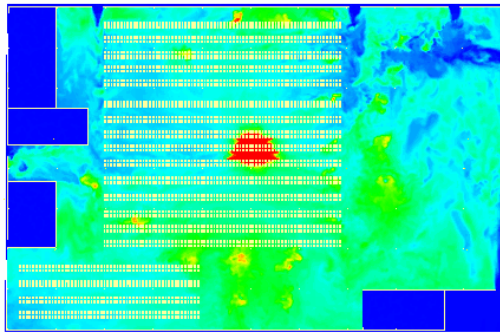


Figure 32 : Échelle de température





T=25 min

Figure 33 : Scénario C1-A - Évolution de la température à hauteur d'homme au cours du temps.

Les conditions thermiques restent acceptables jusqu'à 20 min après le départ de feu.

### 5.1.3.3 Conditions de toxicité

La Figure 34 représente l'échelle de concentration en CO considérée, bornée entre 0 et 220 ppm. La Figure 35 trace l'évolution de la concentration de CO en ppm en fonction du temps telle que calculée par le logiciel FDS.

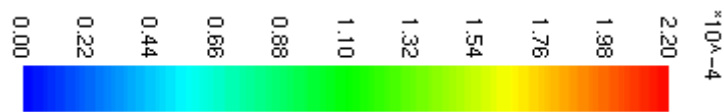
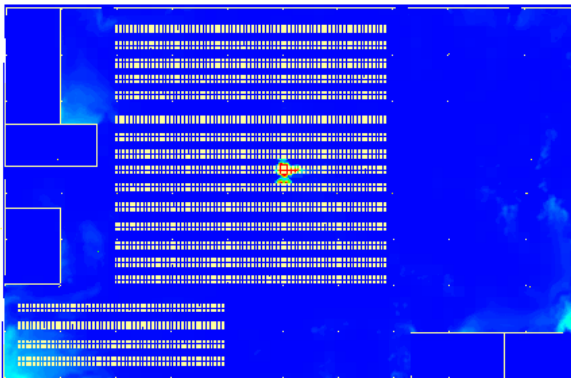
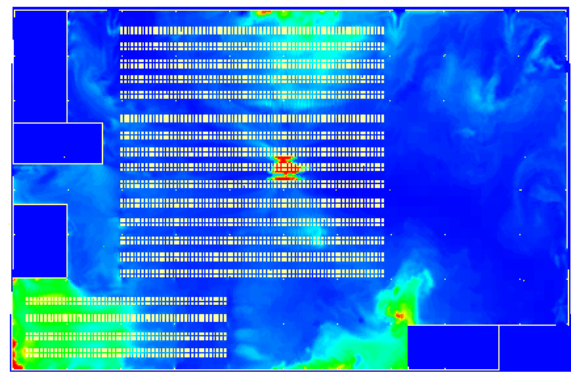


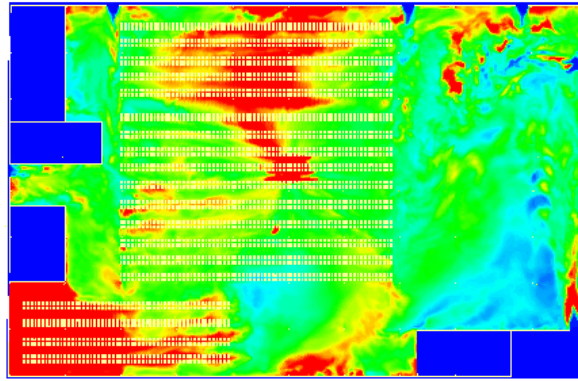
Figure 34 : Échelle des concentrations volumiques en monoxyde de carbone



T=10 min



T=15 min



T=20 min

Figure 35 : Scénario C1-A - Évolution de la concentration de CO à hauteur d'homme au cours du temps.

La toxicité reste compatible avec l'évacuation des personnes jusqu'à 15 min après le départ de feu.

#### 5.1.3.4 Synthèse

Le Tableau 7 synthétise les durées de tenabilité obtenues dans le bâtiment A.

Conditions	Durée de tenabilité (min)
Visibilité	13
Thermiques	20
Toxiques	15

Tableau 7 : Scénario C1-A - Synthèse des résultats

La durée de tenabilité retenue est donc de 13 min. Pour mémoire la durée nécessaire à l'évacuation est de 6,8 min (cf. Tableau 3).

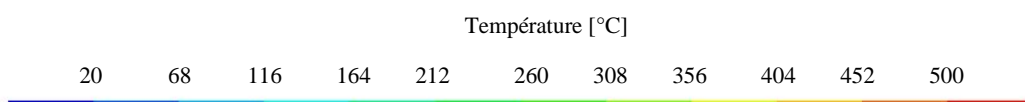
#### 5.1.4 CONDITIONS DE TENABILITÉ POUR LES SERVICES D'INTERVENTION

Il convient donc de déterminer les instants à partir desquels :

- la température en partie inférieure de la cellule atteint 100°C,
- est susceptible de se produire un phénomène de flashover.

Les durées obtenues sont données à titre indicatif.

Le champ de température dans l'axe du point d'inflammation est présenté sur la Figure 36 sur une coupe verticale dans la largeur du bâtiment.





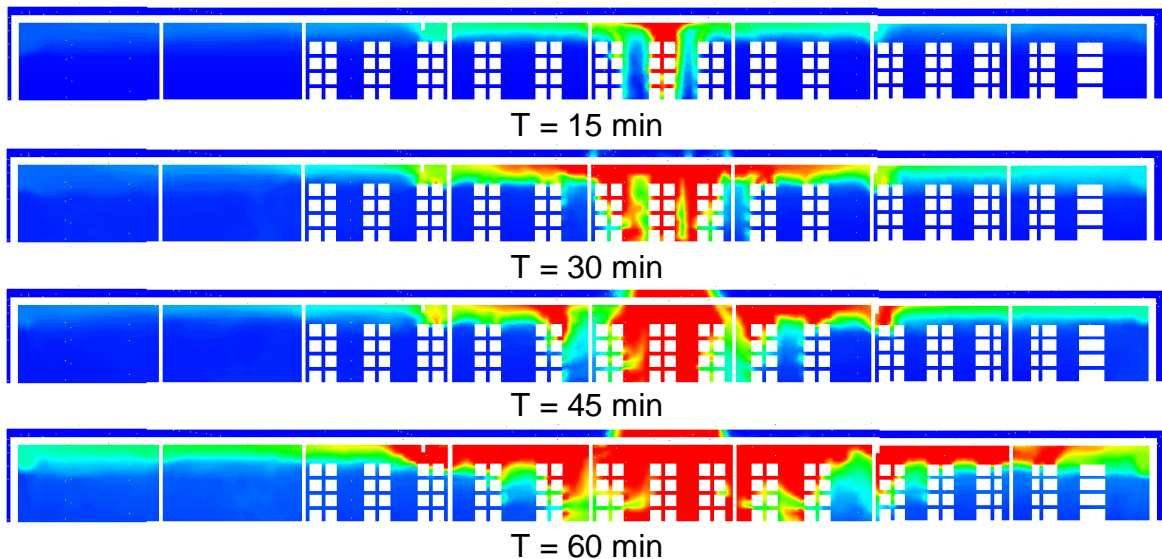


Figure 36 : Scénario C1-A - Champs de température verticale dans l'axe du départ de feu.

Les résultats des simulations CFD représentées par la Figure 36 montrent :

- un début de flashover est possible 45 minutes après le départ de feu, lorsque la température des fumées excède 500 °C dans les couches de gaz supérieures et entre en contact avec le stockage,
- une température à hauteur d'homme toujours inférieure à 100°C au cours de cette période, à l'exception dans la zone enflammée.

La durée de tenabilité pour les services de secours est donc de 45 minutes sous réserve que la structure tienne.

## 5.2 BÂTIMENT CANTINE : SCÉNARIO C2-A

Le scénario C2-A est celui d'un départ de feu à côté du mur séparant le bâtiment A du bâtiment cantine. Dans cette zone le stockage est principalement composé de de disques de frein, amortisseurs, pièces mécaniques diverses en métal. La proportion de combustible est estimée inférieure à 15%. L'objectif est d'étudier l'évacuation du personnel présent dans le bâtiment cantine dans la situation la plus pénalisante. Le mur séparant le bâtiment cantine et le bâtiment A est en parpaing sur la hauteur du bâtiment cantine (cf. Figure 37). Au-dessus le mur est en bardage. L'objectif est de s'assurer que les personnes présentes dans le bâtiment cantine auront évacué avant la chute du bardage assurant la protection des personnes face aux effets de l'incendie. Le critère de tenue du bardage retenu est celui d'un flux total reçu inférieur à 8 kW/m<sup>2</sup>, valeur qui correspond au seuil des effets dominos.



Figure 37 : Mur séparant le bâtiment A et le bâtiment cantine.

### 5.2.1 PUISSANCE DÉVELOPPÉE

La puissance de l'incendie développée calculée par le logiciel FDS est représentée sur la Figure 38. Elle est comparée à la puissance théorique au sens de Drysdale [1] telle que  $P = \alpha t^2$ , avec

- $\alpha$  = Taux d'accroissement de l'incendie ( $\text{kW/s}^2$ ).  $\alpha$  vaut  $0,0469 \text{ kW/s}^2$  pour un incendie rapide (fast) et  $0,01172$  pour un incendie moyen (medium) ;
- $t$  = temps (s).

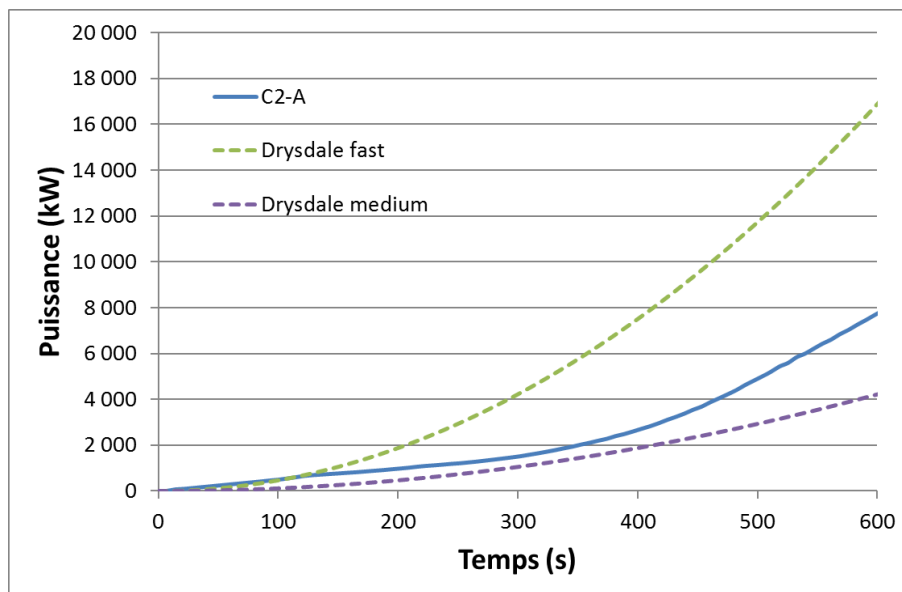


Figure 38 : Scénario C2-A - Évolution de la puissance de l'incendie

La montée en puissance se situe entre medium et fast ce qui est cohérent avec le stockage de cette zone principalement composé de disques de frein, amortisseurs et pièces mécaniques diverses en métal, et dont La proportion de combustible est estimée inférieure à 15%.

## 5.2.2 RÉSULTATS

La Figure 39 montre l'échelle utilisée pour le flux, bornée entre 0 et 8 kW/m<sup>2</sup>. La Figure 40 présente l'évolution du flux reçu sur le mur de séparation entre le bâtiment A et le bâtiment cantine. Le flux de 8 kW/m<sup>2</sup> est atteint localement après 10 minutes environ. Notons que l'atteinte de ce flux ne provoquerait pas instantanément la chute du bardage. De surcroît, même si des éléments du mur de séparation en bardage venaient à tomber, les personnes du bâtiment cantine seraient toujours protégées par la toiture de ce bâtiment. Finalement, il ressort de cette analyse que la cinétique de l'incendie est compatible avec le temps d'évacuation des personnes présentes dans le bâtiment cantine et estimé à 4,1 minutes.



Figure 39 : Échelle de flux

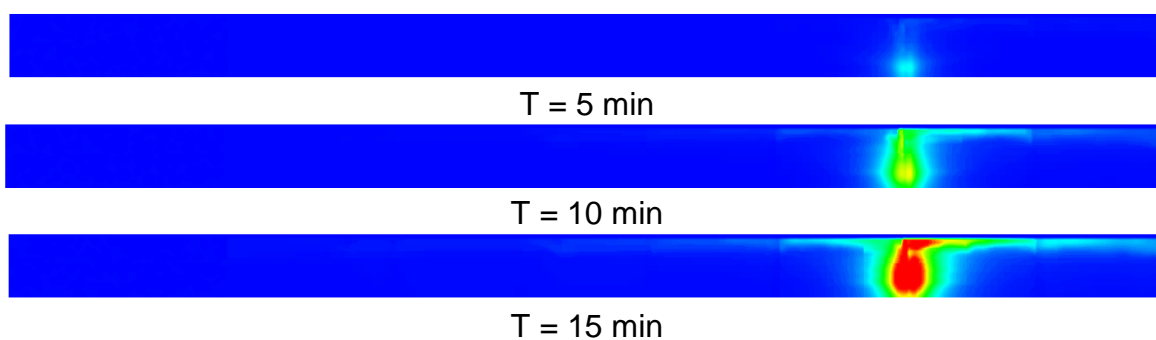


Figure 40 : Évolution du flux reçu sur le mur de séparation entre le bâtiment A et le bâtiment cantine.

## 5.3 MEZZANINE : SCENARIO C3-A

Le scénario C3-A est celui d'un départ de feu sur un poids lourd stationnant au plus près de la mezzanine dans le bâtiment A. L'objectif est d'étudier l'évacuation du personnel présent dans la mezzanine dans la situation la plus pénalisante. Le critère retenu est celui d'atteinte d'un flux de 3 kW/m<sup>2</sup>, correspondant au seuil des effets irréversibles pour les personnes, sur la paroi de la mezzanine. Ce seuil a été choisi pour protéger les personnes derrière la surface vitrée de la mezzanine. Ce critère est très sécuritaire puisqu'il correspond à une durée d'exposition de 2 minutes sans considération de fuite des personnes.

Deux scénarios d'incendie sur un poids lourd ont été considérés :

1. Fuite et inflammation d'une nappe de gazole.
2. Départ de feu sur une roue de la remorque.

La puissance de l'incendie du poids lourd en fonction du scénario a été calculée avec un modèle simple de propagation développé par l'INERIS et en considérant un chargement de 33 palettes de type 1510. Les résultats d'évolution de puissance ainsi obtenus sont présentés sur la Figure 41.

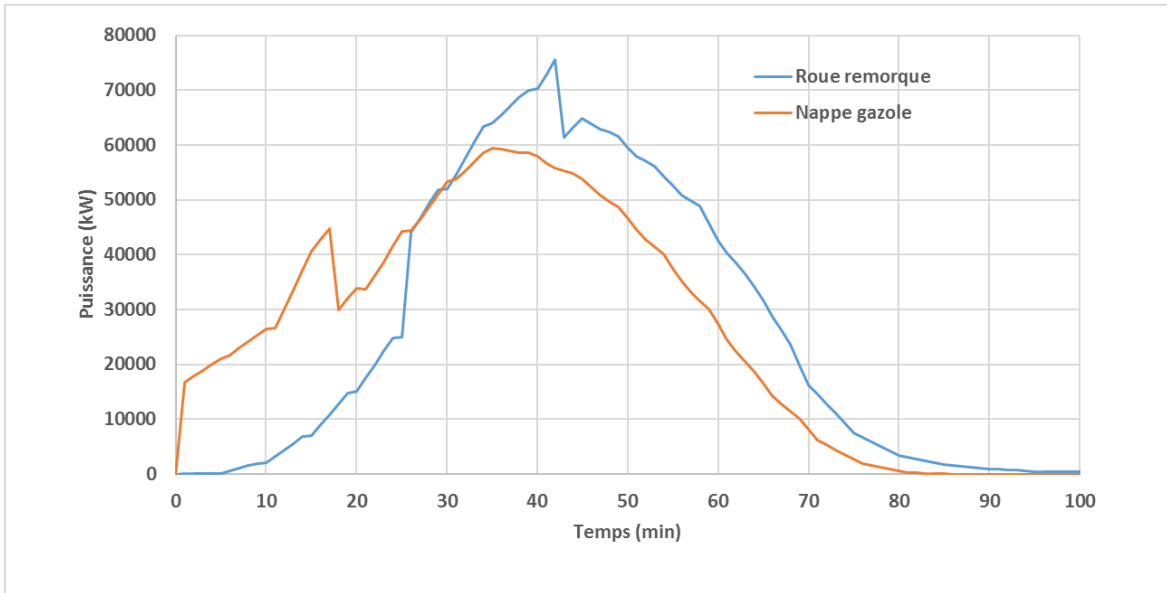


Figure 41 : Scénario C3-A - Évolution de la puissance de l'incendie du poids lourd en fonction du départ de feu.

Pour chacun de ces deux départs de feu un calcul a été réalisé avec le logiciel FDS (cf. Figure 42) pour obtenir le flux reçu par la paroi de la mezzanine. La puissance de l'incendie pour un départ de feu sur la nappe de gazole est initialement plus importante du fait du feu de nappe. Pour autant, le départ de feu au niveau de la roue de la remorque est celui pour lequel le départ de feu est au plus proche de la mezzanine.

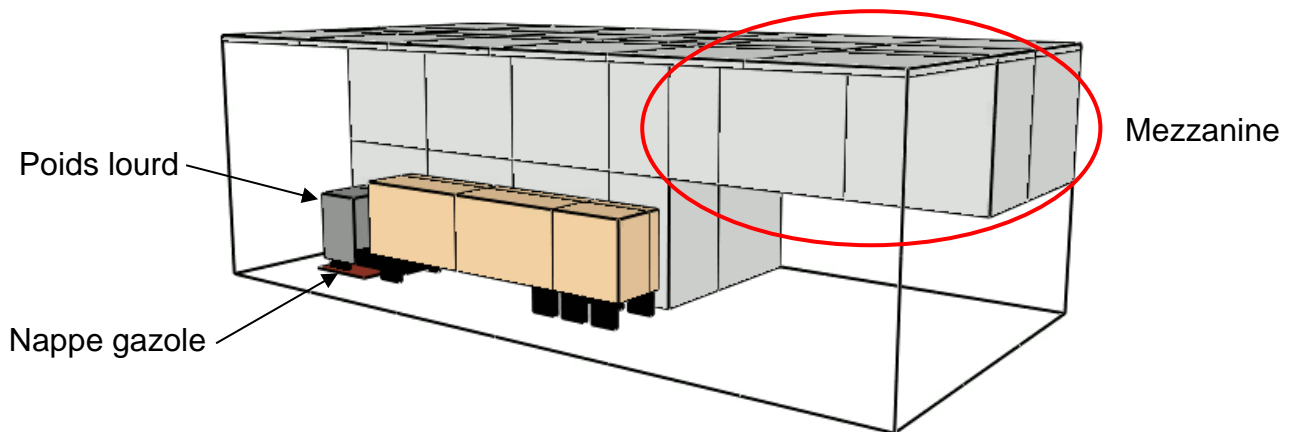


Figure 42 : Scénario C3-A - Configuration modélisée avec le logiciel FDS.

La Figure 43 montre l'échelle utilisée pour le flux reçu, bornée entre 0 et 3 kW/m<sup>2</sup>. La Figure 44 et la Figure 45 présentent l'évolution du flux reçu sur la paroi de la mezzanine respectivement pour le scénario de départ de feu sur une roue de la remorque et sur la nappe de gazole.

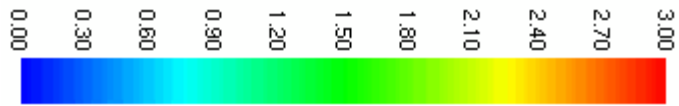


Figure 43 : Échelle de flux

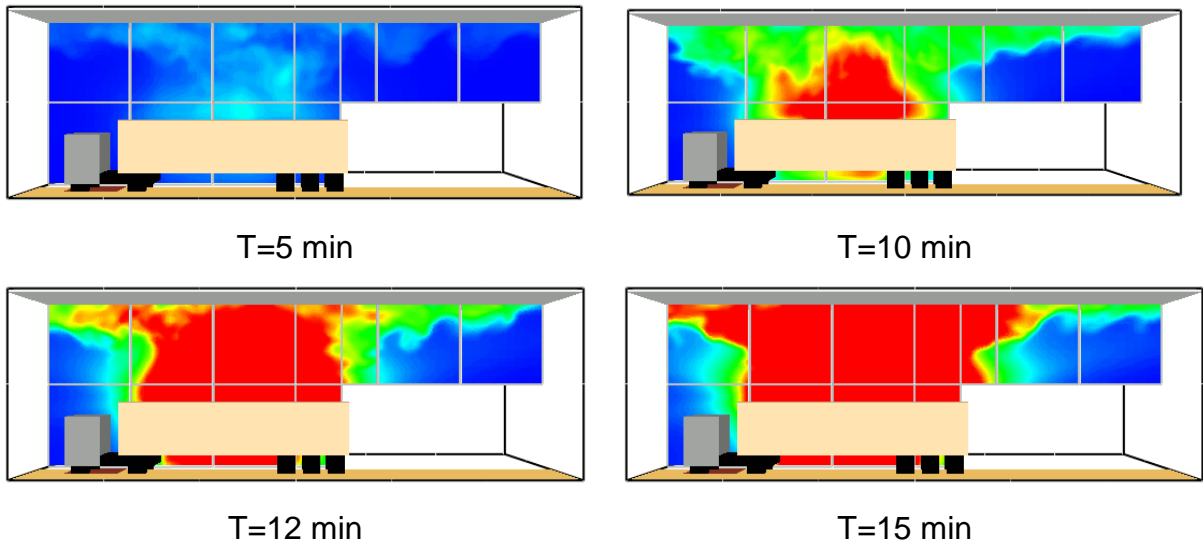


Figure 44 : Scénario C3-A - Départ de feu au niveau de la roue de la remorque - Évolution du flux reçu sur la paroi de la mezzanine.

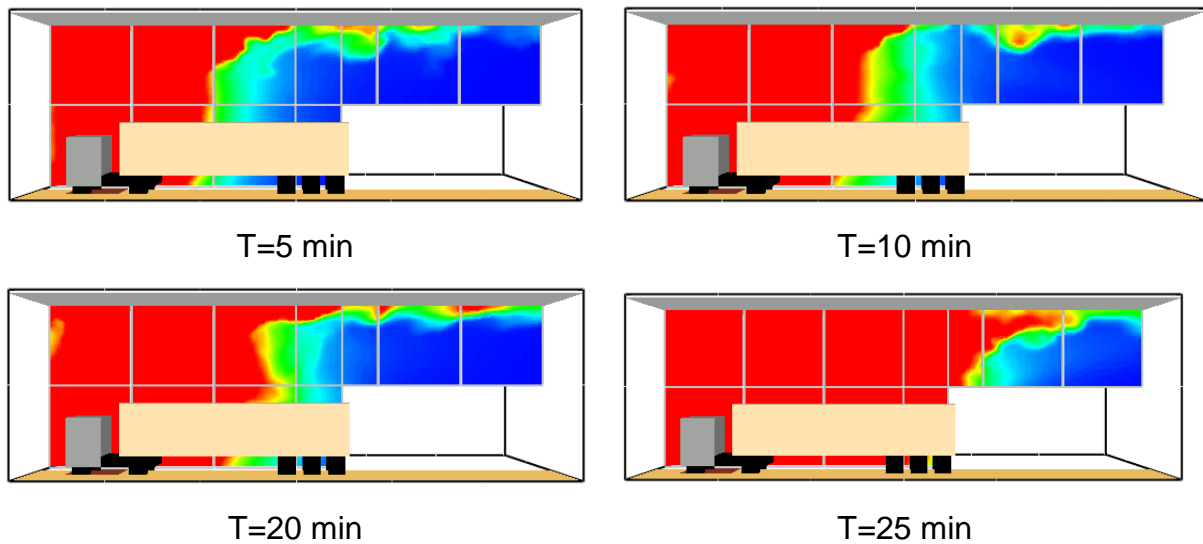


Figure 45 : Scénario C3-A - Départ de feu sur la nappe gazole - Évolution du flux reçu sur la paroi de la mezzanine.

Le critère de  $3 \text{ kW/m}^2$  est atteint après 12 minutes environ pour le scénario de départ de feu sur une roue et après 20 minutes pour celui sur la nappe de gazole. Ces temps sont compatibles avec le temps d'évacuation des personnes présentes dans la mezzanine et estimé à 3,9 minutes.

## 5.4 BÂTIMENT B : SCÉNARIO C1-B

### 5.4.1 PUISSANCE DÉVELOPPÉE

La puissance de l'incendie développée calculée par le logiciel FDS est représentée sur la Figure 46. Elle est comparée à la puissance théorique au sens de Drysdale [1] telle que  $P = \alpha t^2$ , avec

- $\alpha$  = Taux d'accroissement de l'incendie (kW/s<sup>2</sup>).  $\alpha$  vaut 0,0469 kW/s<sup>2</sup> pour un incendie rapide (fast) ;
- $t$  = temps (s).

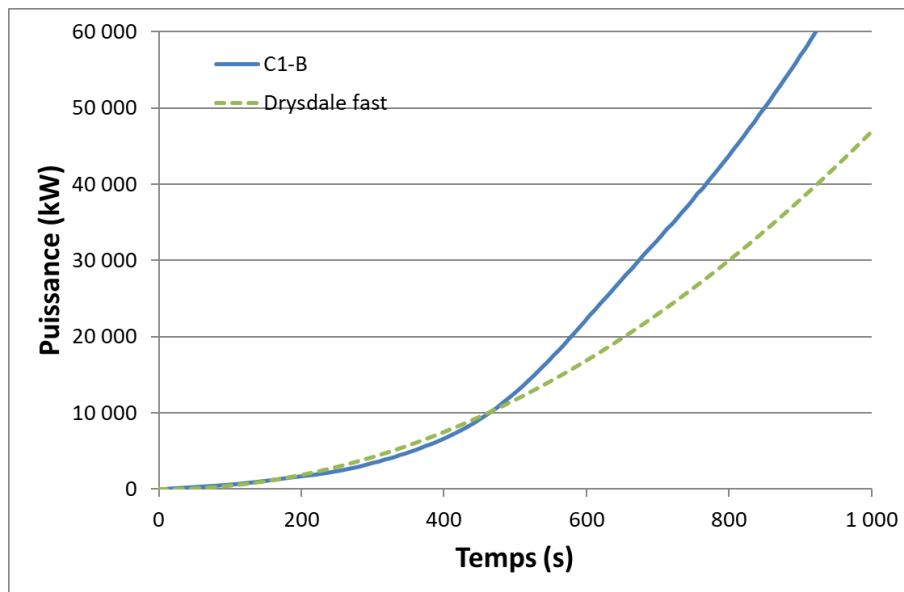


Figure 46 : Scénario C1-B - Évolution de la puissance de l'incendie

La montée en puissance est rapide ce qui est cohérent compte tenu de la géométrie des cellules et du stockage.

### 5.4.2 CONDITIONS DE TENABILITÉ POUR LE PERSONNEL

Les résultats obtenus pour les conditions de visibilité, thermiques et toxiques pendant l'évacuation du personnel sont présentés dans les paragraphes suivants.

#### 5.4.2.1 Conditions de visibilité

Pour mémoire, les distances de visibilité sont données à titre indicatif étant donné l'incertitude qui existe sur les coefficients  $K_m$  et  $C$ . La Figure 47 présente l'échelle de visibilité considérée, elle s'étend de 0 m à 10 m, la valeur maximale de visibilité étant supérieure. La Figure 48 montre l'évolution de la visibilité en fonction du temps telle que calculée à l'aide du logiciel FDS.



Figure 47 : Échelle de visibilité

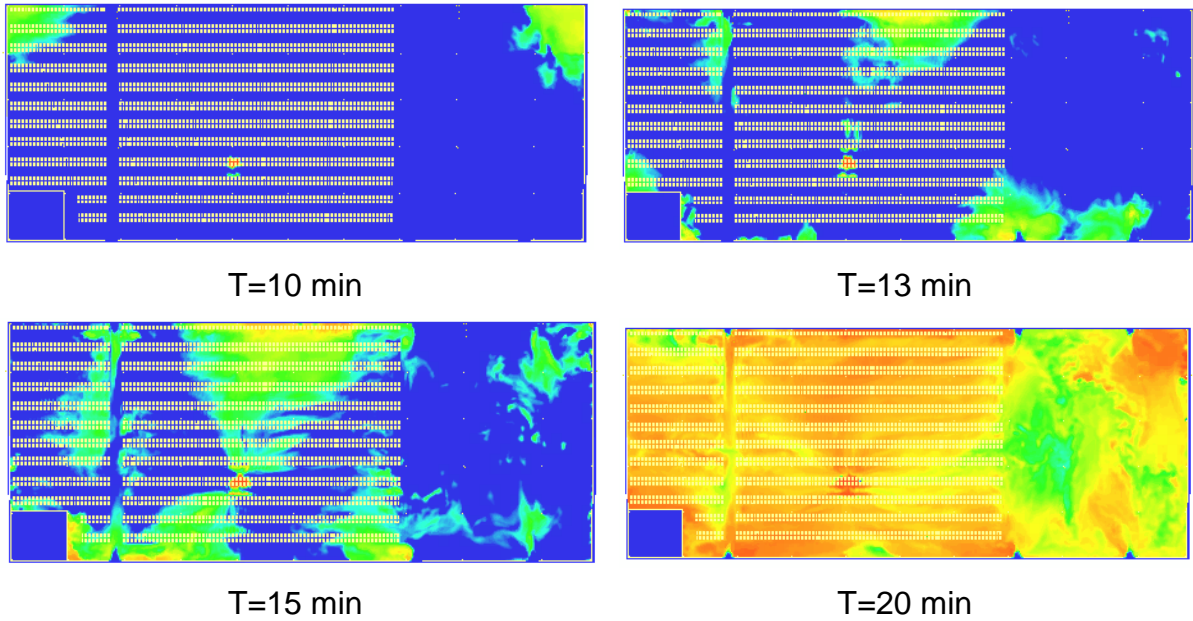


Figure 48 : Scénario C1-B - Évolution de la visibilité à hauteur d'homme au cours du temps.

Le temps disponible avant perte significative de visibilité à retenir ici est estimé à 13 minutes.

#### 5.4.2.2 Conditions thermiques

Afin d'éviter les dommages irréversibles au niveau des tissus pulmonaires, il convient d'éviter une montée de la température ambiante au-delà de 60 °C à hauteur de respiration des personnes. La Figure 49 montre l'échelle utilisée pour la température, bornée entre 20 et 60°C. La Figure 50 représente l'évolution de la température ambiante dans la cellule à hauteur d'homme en fonction du temps.

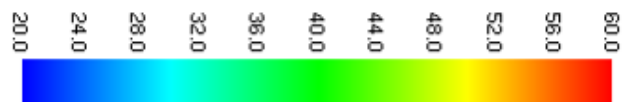
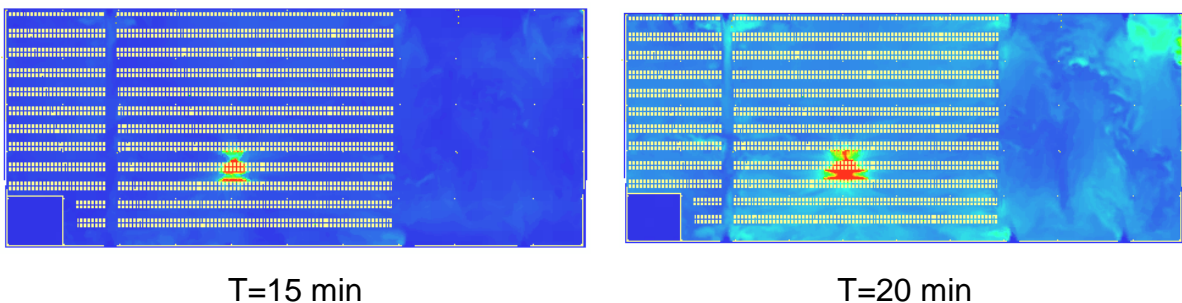


Figure 49 : Échelle de température





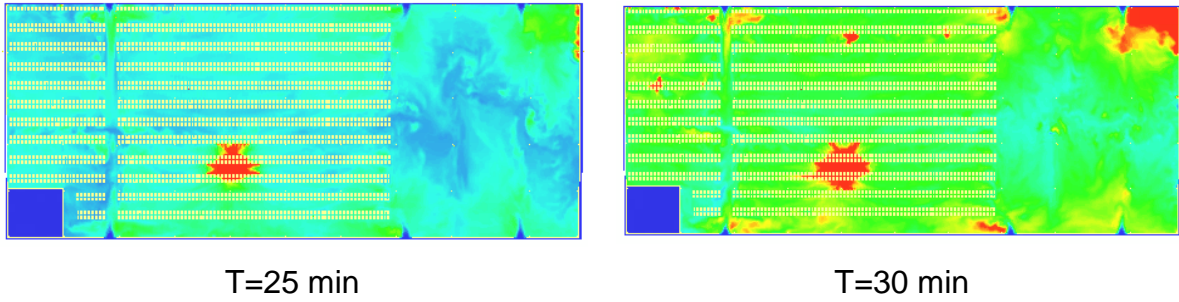


Figure 50 : Scénario C1-B - Évolution de la température à hauteur d'homme au cours du temps.

Les conditions thermiques restent acceptables jusqu'à 25 min après le départ de feu.

#### 5.4.2.3 Conditions de toxicité

La Figure 51 représente l'échelle de concentration en CO considérée, bornée entre 0 et 220 ppm et la Figure 52 trace l'évolution de la concentration de CO en ppm en fonction du temps telle que calculée par le logiciel FDS.



Figure 51 : Échelle des concentrations volumiques en monoxyde de carbone

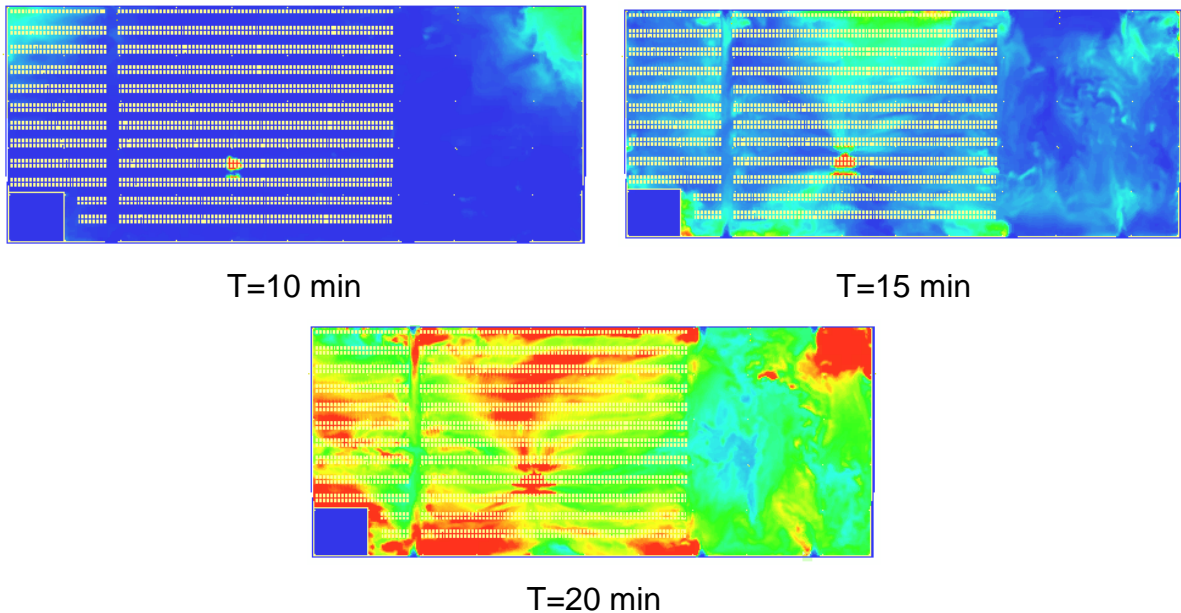


Figure 52 : Scénario C1-B - Évolution de la concentration de CO à hauteur d'homme au cours du temps.

La toxicité reste compatible avec l'évacuation des personnes jusqu'à 15 min après le départ de feu.



#### 5.4.2.4 Synthèse

Le Tableau 8 synthétise les durées de tenabilité obtenues dans le bâtiment B.

Conditions	Durée de tenabilité (min)
Visibilité	13
Thermiques	25
Toxiques	15

Tableau 8 : Scénario C1-B - Synthèse des résultats

La durée de tenabilité retenue est donc de 13 min. Pour mémoire la durée nécessaire à l'évacuation est de 5,5 min (cf. Tableau 3).

#### 5.4.3 CONDITIONS DE TENABILITÉ POUR LES SERVICES D'INTERVENTION

Il convient donc de déterminer les instants à partir desquels :

- la température en partie inférieure de la cellule atteint 100°C,
- intervient le flashover.

Les durées obtenues sont données à titre indicatif.

Le champ de température dans l'axe du point d'inflammation est présenté sur la Figure 53 sur une coupe verticale dans la longueur du bâtiment.

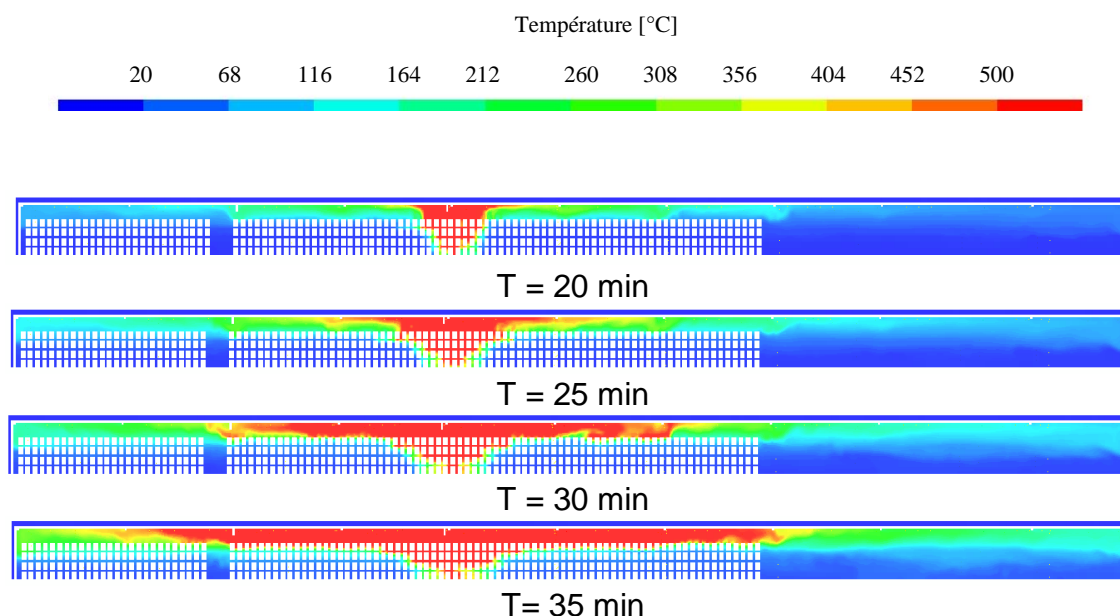


Figure 53 : Scénario C1-B - Champs de température verticale dans l'axe du départ de feu.

Les résultats des simulations CFD représentées par la Figure 53 montrent :

- un début de flashover est possible 30 minutes après le départ de feu, lorsque la température des fumées excède 500 °C dans les couches de gaz supérieures et entre en contact avec le stockage,

- une température à hauteur d'homme toujours inférieure à 100°C au cours de cette période, à l'exception dans la zone enflammée.

La durée de tenabilité pour les services de secours est donc de 30 minutes sous réserve que la structure tienne.

## 5.5 SYNTHÈSE

Le Tableau 9 synthétise les durées de tenabilité pour le personnel et les services d'intervention.

Scénario	Localisation des personnes à évacuer	Personnel		Services d'intervention
		Durée de tenabilité (min)	Durée nécessaire d'évacuation (min)	Durée de tenabilité (min)
C1-A	Bâtiment A	13	6,8	45
C2-A	Bâtiment cantine	10	4,1	-
C3-A	Mezzanine	12	3,9	-
C1-B	Bâtiment B	13	5,5	30

*Tableau 9 : Synthèse sur les durées de tenabilité*

Les résultats de modélisation présentés dans ce chapitre permettent de conclure à l'adéquation entre la cinétique d'évacuation du bâtiment A, du bâtiment cantine, de la mezzanine et du bâtiment B et la montée en puissance de l'incendie.

## **6 MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DE LA STRUCTURE À L'INCENDIE**

### **6.1 MÉTHODOLOGIE**

Dans ce chapitre, on étudie la ruine de la structure en acier pour chacun des bâtiments A et B soumis à l'incendie.

Plus précisément, il s'agit de s'assurer que :

- la ruine de la structure métallique se produise vers l'intérieur du bâtiment ;
- il n'y pas de ruine en chaîne engendrée par la ruine de la structure métallique ;
- la cinétique de ruine de la structure est compatible avec le temps nécessaire à l'évacuation des personnes.

Le chapitre se décompose en :

- la présentation des scénarios se différenciant par l'emplacement du départ de feu dans chacun des bâtiments A et B ;
- la présentation des hypothèses de calcul pour chacun des bâtiments A et B ;
- les résultats de modélisation du comportement de la structure métallique de chacun des bâtiments A et B soumise à l'incendie en 3D au moyen du code LSDyna.

### **6.2 CAS PARTICULIER DE LA SALLE DE STOCKAGE AÉROSOLS ET LIQUIDES INFLAMMABLES**

Le cas de la salle de stockage aérosols et liquides inflammables est traité de manière spécifique. En effet, au vu de la quantité stockée, un incendie dans cette salle serait susceptible de provoquer un feu de nappe dont la durée est estimée à 30 minutes. Pour éviter tous risques d'effondrement vers l'extérieur du mur intercellulaire et du mur extérieur, **l'INERIS préconise de mettre en place une protection thermique EI 30 sur les poteaux de ces murs et sur les poutres jusqu'au premier élément transverse sur le treillis** (cf. Figure 54) comme cela est conseillé dans le guide de vérification du comportement au feu des bâtiments à simple rez-de-chaussée en charpente métallique du CTICM.

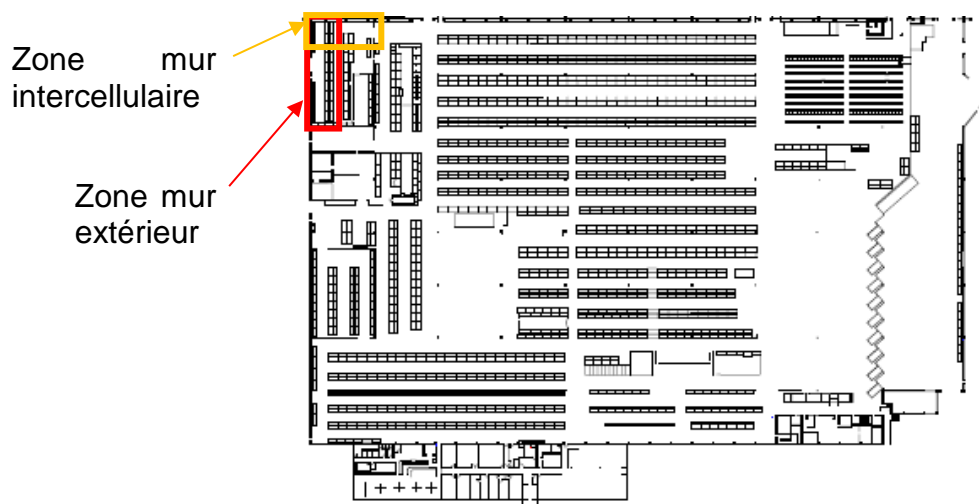


Figure 54 : Cas particulier de la salle de stockage aérosols et liquides inflammables.

### 6.3 CHOIX DES SCÉNARIOS MODÉLISÉS

Les différents scénarios considérés correspondent à différents emplacements du départ de feu dans les bâtiments.

#### 6.3.1 BÂTIMENT A

Trois scénarios sont considérés dans le bâtiment A :

- S1-A : départ de feu au centre du stockage du bâtiment A ;
- S2-A : départ de feu près du mur séparatif avec la cantine et les bureaux ;
- S3-A : départ de feu près du mur intercellulaire entre bâtiments A et B.

Le scénario S1-A permet de favoriser au mieux la propagation du départ de feu. Les scénarios S2-A et S3-A représentent des feux dans des zones libérant des puissances différentes. Leur positionnement peut potentiellement générer des modes de ruine vers l'extérieur.

La position de ces trois départs de feu est représentée sur la Figure 55.

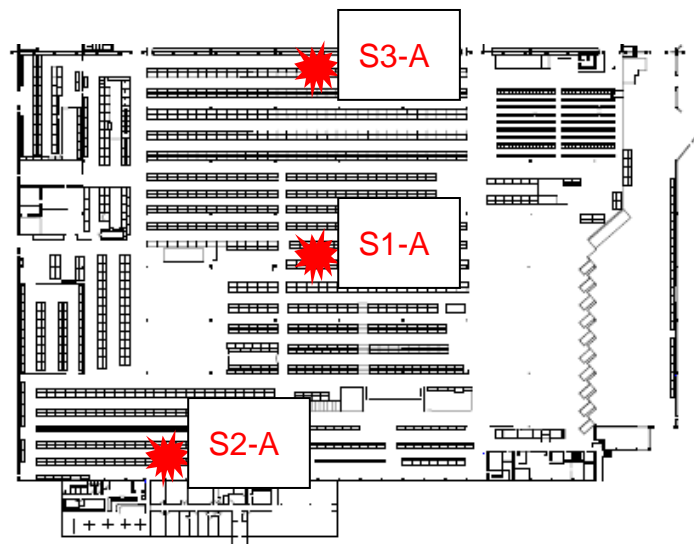


Figure 55 : Position des départs de feu pour l'étude structurelle du bâtiment A

### 6.3.2 BÂTIMENT B

De la même manière, trois scénarios sont considérés dans le bâtiment B :

- S1-B : départ de feu au centre du stockage du bâtiment B ;
- S2-B : départ de feu près du mur périphérique au Nord ;
- S3-B : départ de feu près du mur intercellulaire entre bâtiments A et B.

Le scénario S1-B permet de favoriser au mieux la propagation du départ de feu. Les scénarios S2-B et S3-B représentent des feux dans des zones libérant des puissances différentes. Leur positionnement peut potentiellement générer des modes de ruine vers l'extérieur.

La position de ces trois départs de feu est représentée sur la Figure 56.

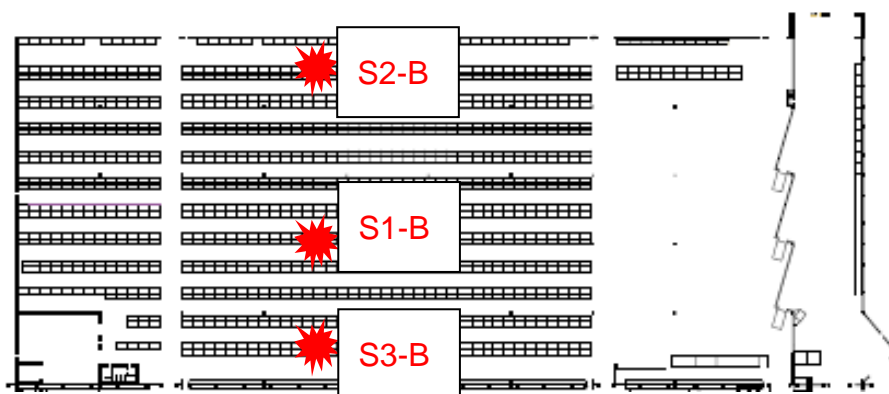


Figure 56 : Position des départs de feu pour l'étude structurelle du bâtiment B

## 6.4 HYPOTHÈSES DE CALCULS

### 6.4.1 DOMAINE DE CALCUL DANS LE BÂTIMENT A

La zone structurelle du bâtiment A modélisée est représentée sur la Figure 57.

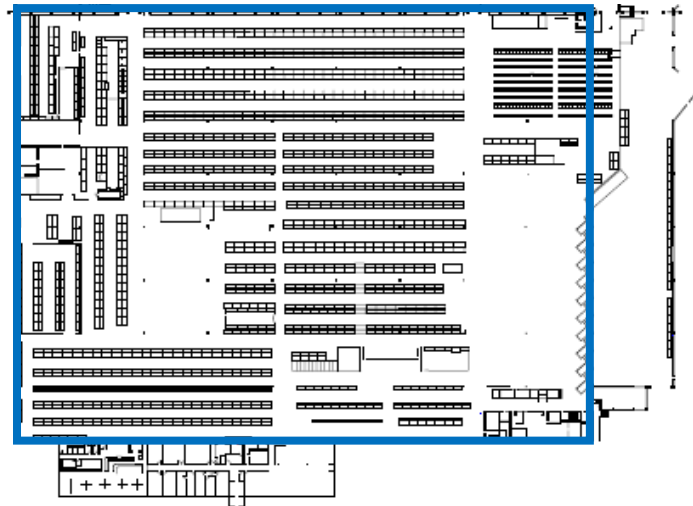


Figure 57 : Étendue de la zone structurale modélisée dans le bâtiment A

L'étendue de la zone représentée sur la Figure 57 est en effet suffisante pour conclure sur la ruine en chaîne, la ruine vers l'extérieur et le temps de ruine de manière sécuritaire. En toute état de cause, la zone non modélisée apporterait une rigidité structurale retardant la ruine sans remettre en cause les conclusions concernant le sens de ruine et la ruine en chaîne.

#### 6.4.2 CHARGES APPLIQUÉES AU BÂTIMENT A

Les chargements pris en compte sont ceux décrits dans le tableau 9.3 de l'Eurocode 1 / Partie 1 : «Base de calcul ». Les charges prises en compte s'écrivent ainsi sous la forme :

$$1,0 G + 0,8 Q + 0,2 W$$

Dans cette équation, G représente les charges permanentes, Q les charges d'exploitation et W l'action des charges climatiques.

##### 6.4.2.1 Charges climatiques

Les effets de la neige et du vent sont pris en compte dans cette étude. Un poids de neige correspondant à 35 kg/m<sup>2</sup> est appliqué sur la structure. En ce qui concerne le vent, les pressions appliquées dépendent de la position géographique, de la typologie du terrain, ainsi que des dimensions et de la forme du bâtiment. Ainsi, le bâtiment étudié se situant en zone climatique 2 et en terrain de catégorie IIIb, la pression dynamique appliquée sera de 548 N/m<sup>2</sup>. La répartition des chargements qui en découle est présentée Figure 58 et Figure 59.

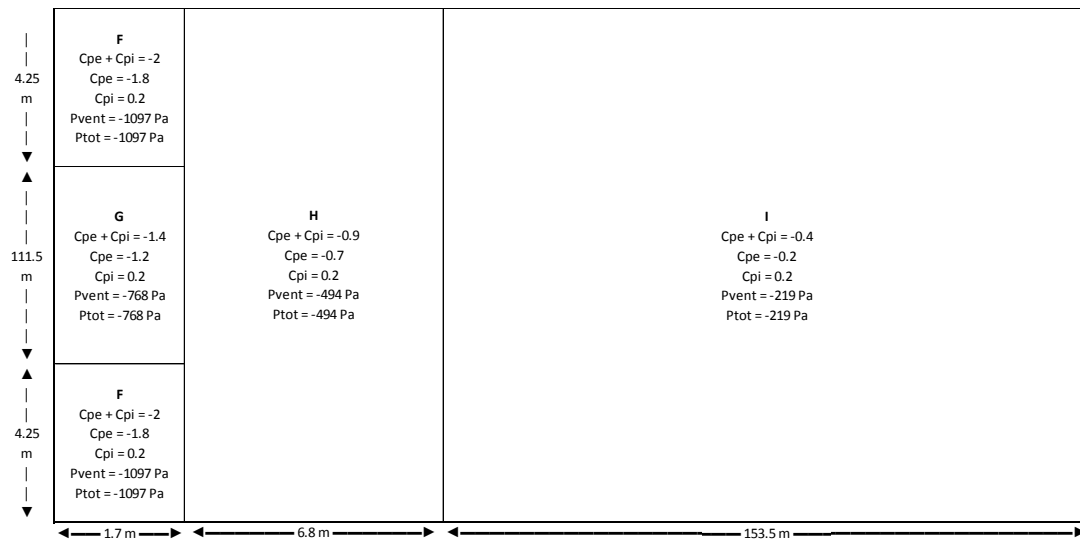


Figure 58 : chargement vent en toiture du bâtiment A

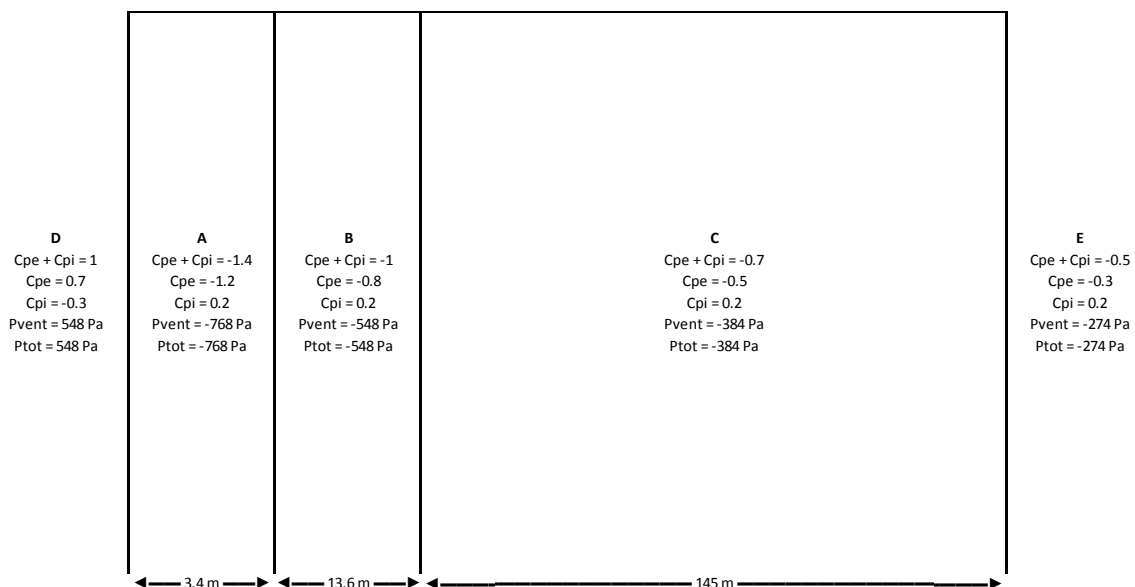


Figure 59 : chargement vent en façade du bâtiment A

#### 6.4.2.2 Charges d'exploitation

Dans le cas présent, aucune charge d'exploitation ne vient peser sur la structure.

#### 6.4.2.3 Charges permanentes

Les charges permanentes sont :

- le poids propre des éléments de structure, fonction de leur typologie et de la masse volumique de l'acier ( $7\,800\text{ kg/m}^3$ ),
- le poids de la toiture : étanchéité, isolant, chevrons, bac aciers soit  $40\text{ kg/m}^2$
- le poids des éléments des façades (bardages) soit  $25\text{ kg/m}^2$

Ces charges sont ensuite distribuées sur les différents éléments constituant la structure.

### 6.4.3 DOMAINE DE CALCUL DANS LE BÂTIMENT B

La zone structurale du bâtiment B modélisée est représentée sur la Figure 60.

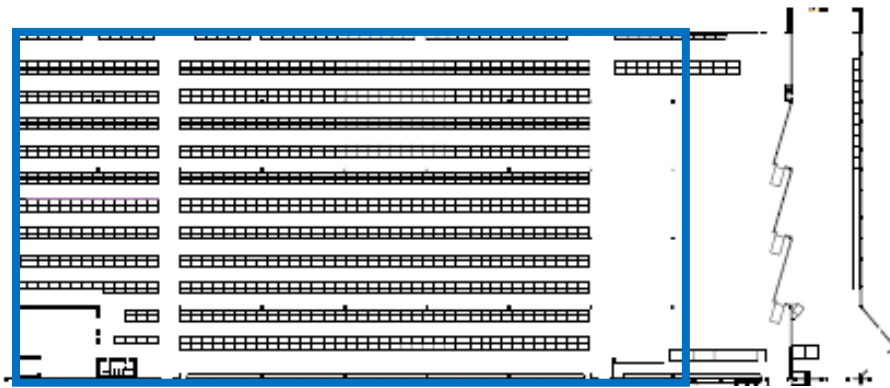


Figure 60 : Étendue de la zone structurale modélisée dans le bâtiment B

L'étendue de la zone représentée sur la Figure 60 est en effet suffisante pour conclure sur la ruine en chaîne, la ruine vers l'extérieur et le temps de ruine de manière sécuritaire. En toute état de cause, la zone non modélisée apporterait une rigidité structurale retardant la ruine sans remettre en cause les conclusions concernant le sens de ruine et la ruine en chaîne.

### 6.4.4 CHARGES APPLIQUÉES AU BÂTIMENT B

Comme pour le bâtiment A, les chargements pris en compte sont ceux décrits dans le tableau 9.3 de l'Eurocode 1 / Partie 1 : «Base de calcul ». Les charges prises en compte s'écrivent ainsi sous la forme :

$$1,0 G + 0,8 Q + 0,2 W$$

Dans cette équation, G représente les charges permanentes, Q les charges d'exploitation et W l'action des charges climatiques.

#### 6.4.4.1 Charges climatiques

Les effets de la neige et du vent sont pris en compte dans cette étude. Un poids de neige correspondant à 35 kg/m<sup>2</sup> est appliqué sur la structure. En ce qui concerne le vent, les pressions appliquées dépendent de la position géographique, de la typologie du terrain, ainsi que des dimensions et de la forme du bâtiment. Ainsi, le bâtiment étudié se situant en zone climatique 2 et en terrain de catégorie IIIb, la pression dynamique appliquée sera de 548 N/m<sup>2</sup>. La répartition des chargements qui en découle est présentée Figure 58 et Figure 59.



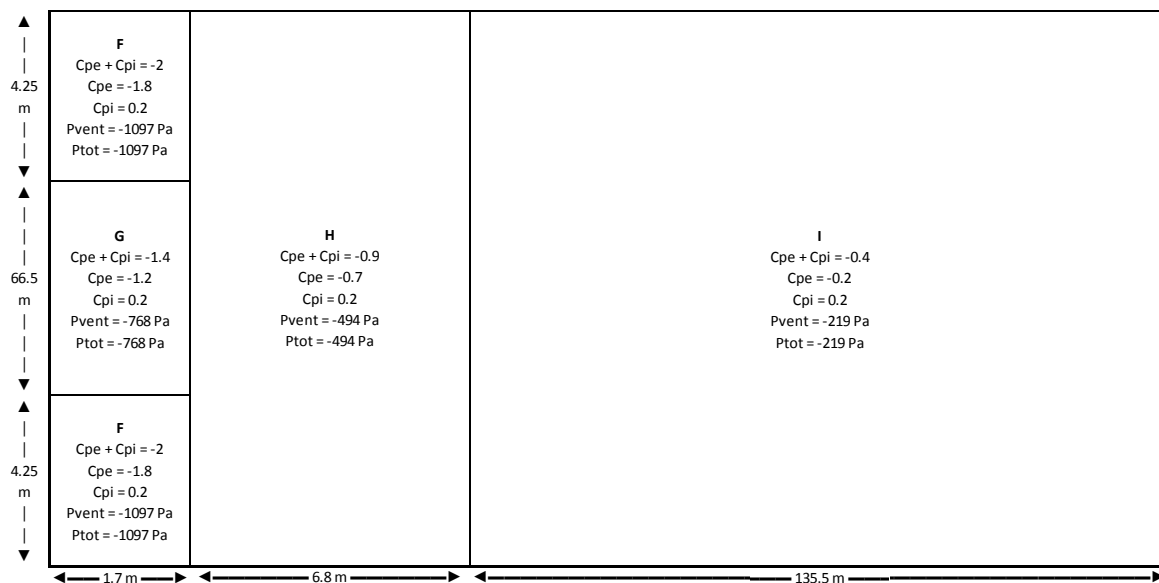


Figure 61 : chargement vent en toiture du bâtiment B

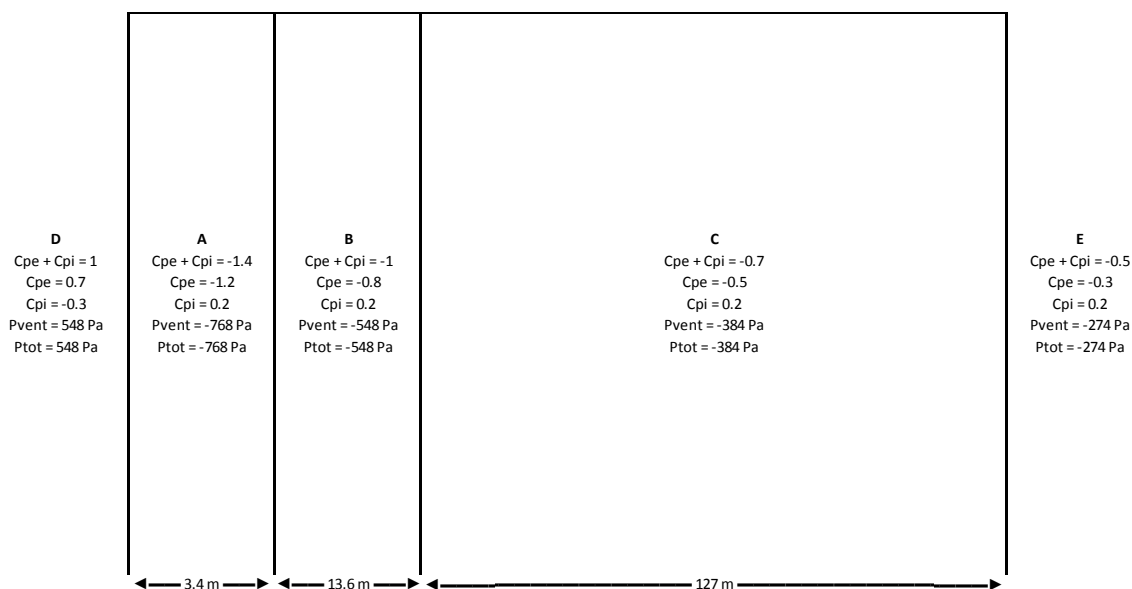


Figure 62 : chargement vent en façade du bâtiment B

#### 6.4.4.2 Charges d'exploitation

Dans le cas présent, aucune charge d'exploitation ne vient peser sur la structure.

#### 6.4.4.3 Charges permanentes

Les charges permanentes sont :

- le poids propre des éléments de structure, fonction de leur typologie et de la masse volumique de l'acier ( $7\,800\text{ kg/m}^3$ ),
- le poids de la toiture : étanchéité, isolant, chevrons, bac aciers soit  $40\text{ kg/m}^2$
- le poids des éléments des façades (bardages) soit  $25\text{ kg/m}^2$

Ces charges sont ensuite distribuées sur les différents éléments constituant la structure.

#### **6.4.5 COUPLAGE THERMO-MECANIQUE**

La première étape du calcul de la réponse de la structure métallique à l'agression thermique consiste à évaluer l'évolution temporelle de la température des gaz autour de la structure au moyen du code FDS, dont les résultats sont présentés au chapitre 5. Ensuite, l'échauffement des différents éléments de la structure est calculé en tenant compte des phénomènes de convection et de rayonnement.

Les calculs d'échauffement des éléments de structure permettent de définir l'évolution temporelle de leurs caractéristiques mécaniques. Afin d'évaluer la réponse de la structure de stockage, il est nécessaire d'étudier le comportement global de ces structures en calculant les déplacements et les niveaux de contraintes et de déformations résultant des charges appliquées.

L'enjeu principal de l'analyse thermomécanique sera de s'assurer du non effondrement de la structure vers l'extérieur. Pour cela, il convient de calculer les efforts de dilatation induits dans les éléments de structure constituant le stockage puis de caractériser la cinétique et le sens d'effondrement.

La ruine des éléments peut intervenir par :

- compression ou traction : la résistance à la compression et à la traction de chaque matériau est donnée par l'Eurocode 3, partie 1.2 ;
- flexion : la résistance à la flexion est conditionnée par une compression ou une traction des fibres externes des poutres ;
- flambement. La résistance au flambement est donnée par l'effort d'Euler. Le flambement n'intervient que lorsque la contrainte critique est supérieure au seuil de ruine par compression.

Le calcul d'effondrement structurel a été réalisé en 3D au moyen du logiciel LSDyna. LS-DYNA est un progiciel de calcul aux éléments finis de dynamique transitoire développé par Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Son solveur explicite permet à ses utilisateurs une analyse multi-physique, dynamique et non linéaire. Il est très largement employé dans les industries automobile, aérospatiale, militaire et nucléaire (<http://www.lstc.com/products/ls-dyna>).

#### **6.4.6 CONDITIONS LIMITES**

Tous les calculs sont réalisés sur la base d'une condition limite de type rotule liant les poteaux au sol. Cette condition limite permet d'effectuer des prédictions sécuritaires concernant le sens de ruine. Les bords du motif structurel sont laissés libres.

### **6.5 RÉSULTATS**

L'analyse des modélisations sous LS-DYNA consiste en une étude de la déformée globale de la structure. Cette analyse est effectuée pour chacun des bâtiments A et B.

#### **6.5.1 BÂTIMENT A**

La Figure 63 présente les vues considérées pour l'analyse de la déformée.

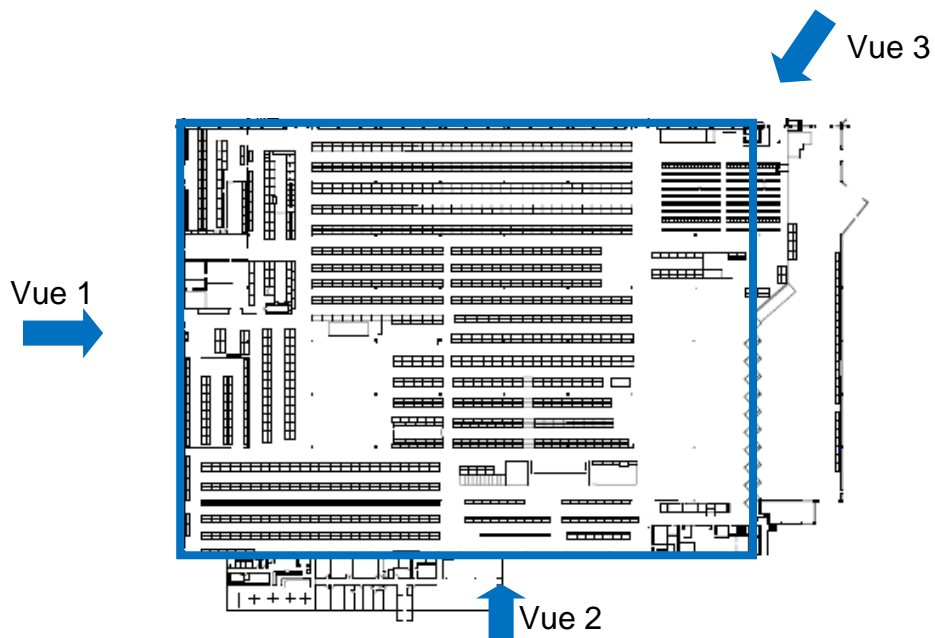


Figure 63 : Les vues utiles pour l'analyse de la déformée

#### 6.5.1.1 Résultats pour le scénario S1-A : départ de feu au centre du stockage

La Figure 64 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S1-A.

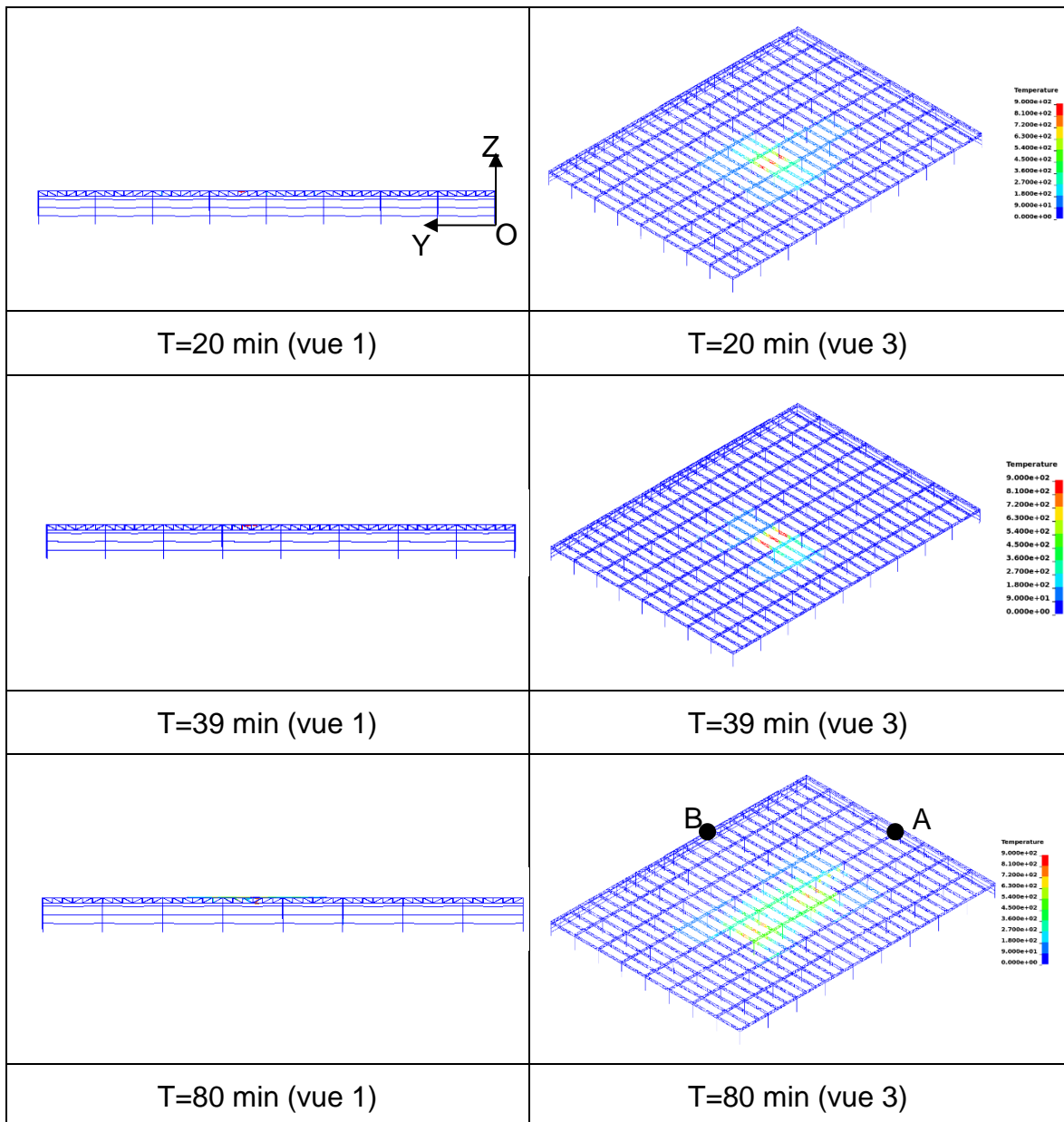
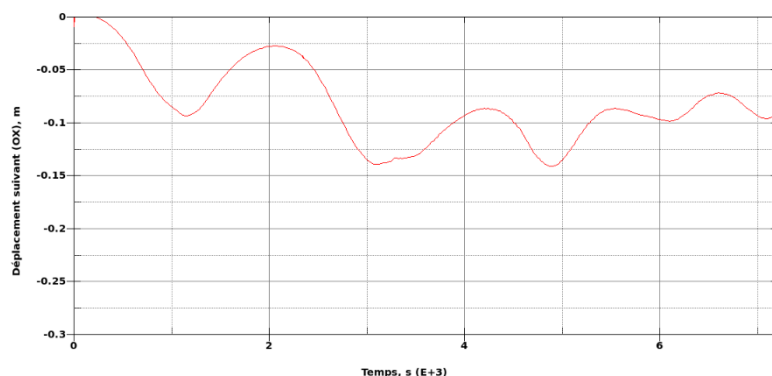


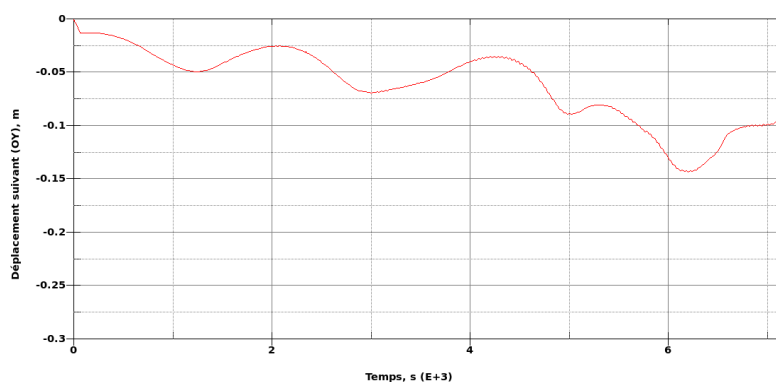
Figure 64 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu au centre du magasin A

La Figure 64 montre une déformée globale évoluant peu au cours du feu. De fait, cela met en évidence un feu qui reste localisé au centre du bâtiment et qui se propage difficilement vers les bords ainsi qu'une structure suffisamment robuste par conception. Les stockages en présence conditionnent ce type de feu et la structure ne subit pas de ruine prononcée. Cependant, la ruine locale d'éléments de poutre en acier est constatée à la 39<sup>e</sup> minute. On retiendra donc un temps de tenue structurelle de 39 minutes pour ce scénario.

Sur la Figure 65, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 64 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

Figure 65 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

Sur les deux courbes tracées sur la Figure 65, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux. Aux deux extrémités du bâtiment, le déplacement maximal vers l'extérieur est inférieur à 15 cm. On observe par la suite un retour progressif vers l'intérieur du bâtiment.

Du côté de la cantine et des bureaux, on note la présence de deux murs en face des poteaux périphériques : un mur de 2 m de haut et un mur de 4 m de haut. La flèche maximale des poteaux à ces hauteurs est respectivement de 4 cm et 7 cm. Au cours de la visite du site, il a été visuellement constaté qu'un jeu de quelques cm était présent entre les poteaux et ces murs. Bien que faibles, les flèches en tête de poteaux peuvent générer un impact sur le mur. Des éléments de murs sont alors susceptibles de chuter vers l'extérieur. Par conséquent, sans qu'il soit nécessaire de mettre en place des mesures de protection, le personnel et les services de secours doivent être sensibilisés à ce point de manière préventive.

Du côté du mur intercellulaire, un espace supérieur à 30 cm sépare le mur des poteaux, aucune ruine en chaîne intercellulaire n'est donc à prévoir.

### 6.5.1.2 Résultats pour le scénario S2-A : départ de feu près du mur séparatif avec la cantine et les bureaux

La Figure 66 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S2-A.

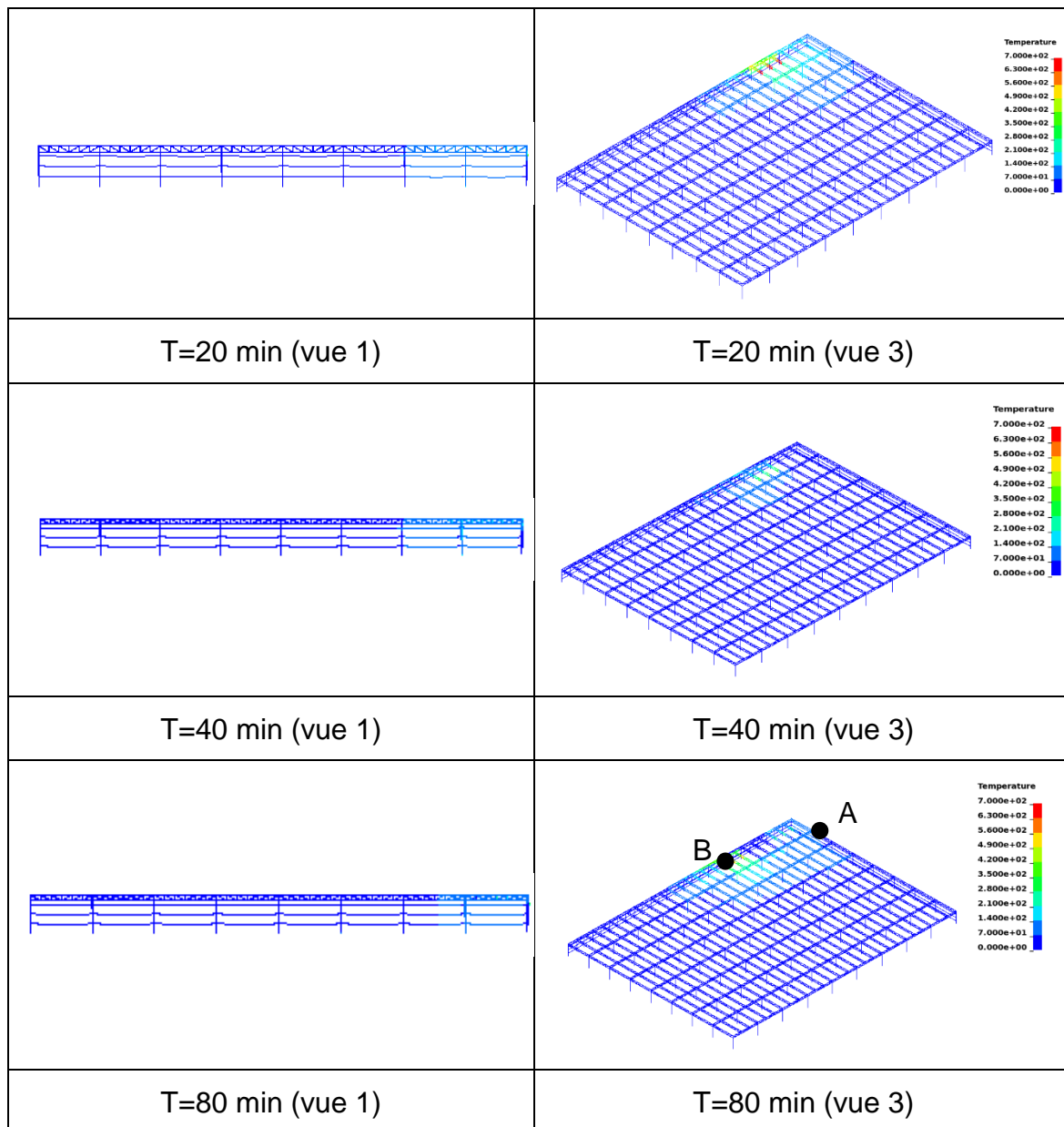
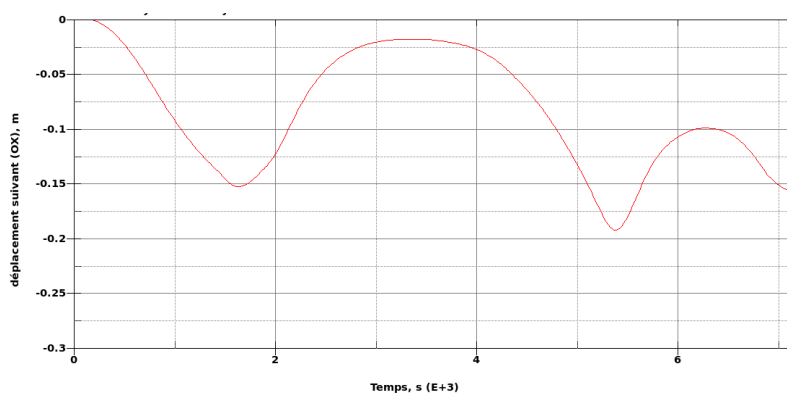


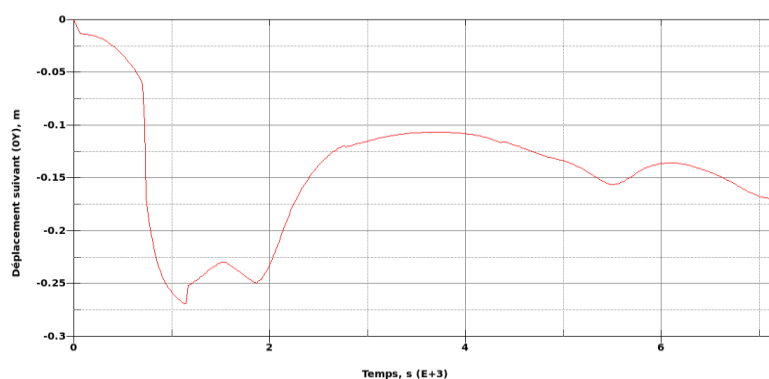
Figure 66 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu près du mur séparatif entre le bâtiment A et la zone de cantine et des bureaux

La Figure 66 montre une déformée globale évoluant peu au cours du feu. Les stockages en présence conditionnent ce type de feu et la structure ne subit pas de ruine prononcée. Aucune ruine locale n'est constatée pour ce scénario. Cependant, les profilés subissent des déformations vers l'extérieur qu'il convient de tracer en fonction du temps.

Sur la Figure 67, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 66 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

Figure 67 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

Sur les deux courbes tracées sur la Figure 67, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux. A l'extrémité notée A, le déplacement est égal à environ 20 cm tandis qu'il peut atteindre 27 cm au point B. Par la suite, on note un retour progressif vers l'intérieur du bâtiment.

Du côté de la cantine et des bureaux, on note la présence de deux murs en face des poteaux périphériques : un mur de 2 m de haut et un mur de 4 m de haut. La flèche maximale des poteaux à ces hauteurs est respectivement de 4 cm et 7 cm. Au cours de l'inspection du site, il a été visuellement constaté qu'un jeu de quelques cm était présent entre les poteaux et ces murs. Bien que faibles, les flèches en tête de poteaux peuvent générer un impact sur le mur. Des éléments de murs sont alors susceptibles de chuter vers l'extérieur. Par conséquent, sans qu'il soit nécessaire de mettre en place des mesures de protection, le personnel et les services de secours doivent être sensibilisés à ce point de manière préventive.

Du côté du mur intercellulaire, un espace supérieur à 30 cm sépare le mur des poteaux, aucune ruine en chaîne intercellulaire n'est donc à prévoir.

### 6.5.1.3 Résultats pour le scénario S3-A : départ de feu près du mur séparatif entre les bâtiments A et B

La Figure 68 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S3-A.

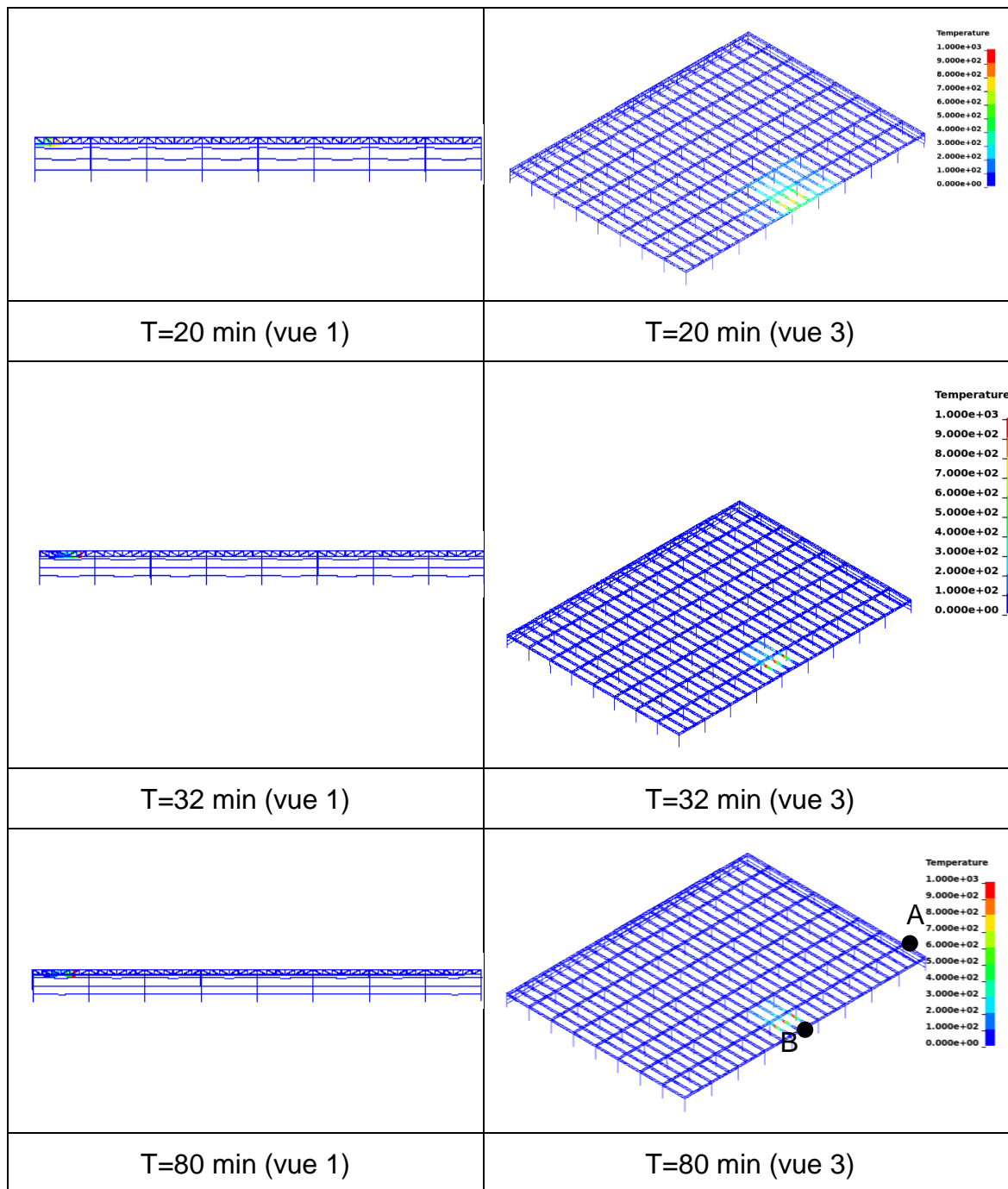
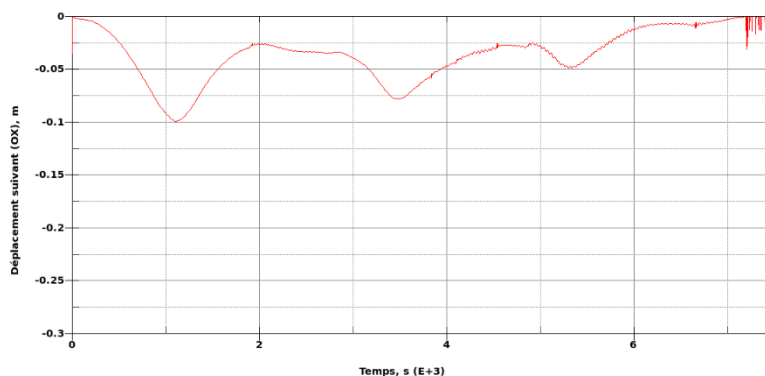


Figure 68 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu près du mur séparatif entre les bâtiments A et B

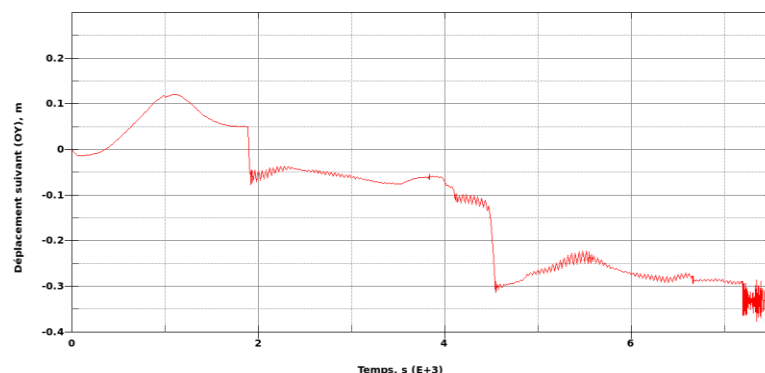


La Figure 68 montre une déformée globale évoluant peu au cours du feu. Les stockages en présence conditionnent ce type de feu et la structure ne subit pas de ruine prononcée. Cependant, la ruine locale d'éléments de poutre en acier est constatée à la 32<sup>e</sup> minute. On retiendra donc un temps de tenue structurelle de 32 minutes pour ce scénario.

Sur la Figure 69, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 68 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

Figure 69 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

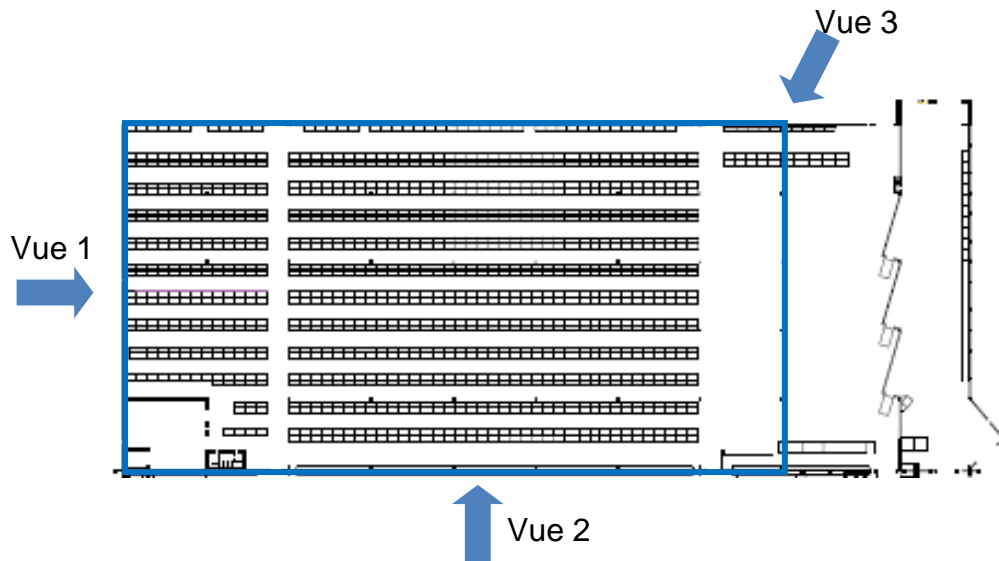
Sur la première courbe tracée sur la Figure 69, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux tandis que sur la seconde courbe, un déplacement positif dénote un déplacement vers l'extérieur. A l'extrémité notée A, le déplacement est égal à environ 10 cm tandis qu'il peut atteindre 12 cm au point B. Par la suite, on note un retour progressif vers l'intérieur du bâtiment dans les deux cas.

Du côté de la cantine et des bureaux, les déplacements calculés ne sont pas supérieurs à ceux constatés pour les précédents scénarios.

Du côté du mur intercellulaire, un espace supérieur à 30 cm sépare le mur des poteaux, aucune ruine en chaîne intercellulaire n'est donc à prévoir.

## 6.5.2 BÂTIMENT B

La Figure 70 présente les vues considérées pour l'analyse de la déformée.



*Figure 70 : Les vues utiles (bâtiment B) pour l'analyse de la déformée*

### 6.5.2.1 Résultats pour le scénario S1-B : départ de feu au centre du stockage

La Figure 71 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S1-B.

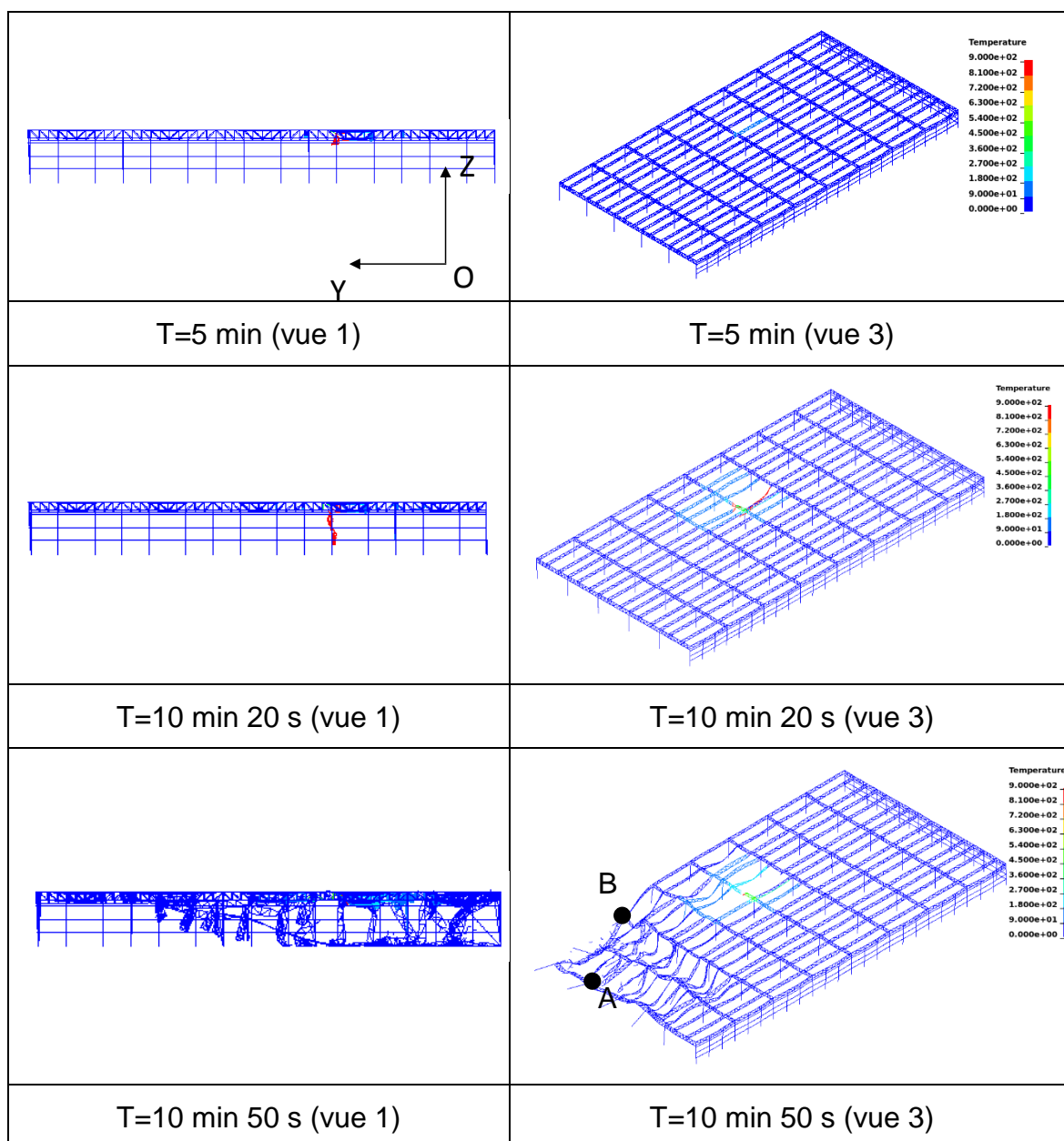
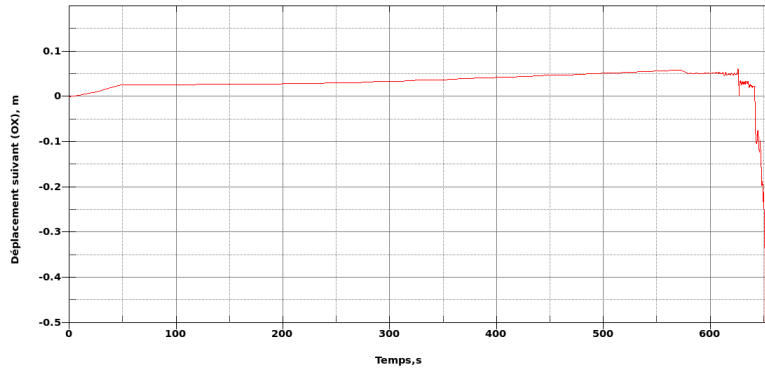


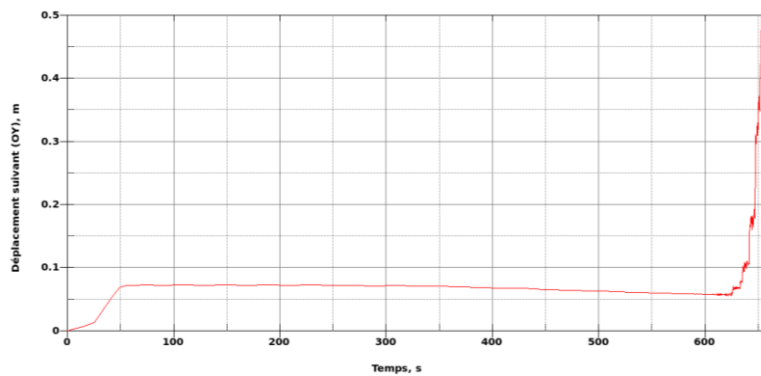
Figure 71 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu au centre du bâtiment B

La Figure 71 montre que la ruine débute localement au bout de 10 min 20s et devient globale au bout de 10 min 50 s. La ruine du bâtiment s'effectue vers l'intérieur. On notera que la ruine s'amorce en coin de motif car à cet endroit, il y a moins de retenue de la structure environnante par rapport à la structure située autour du départ de feu.

Sur la Figure 72, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 72 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

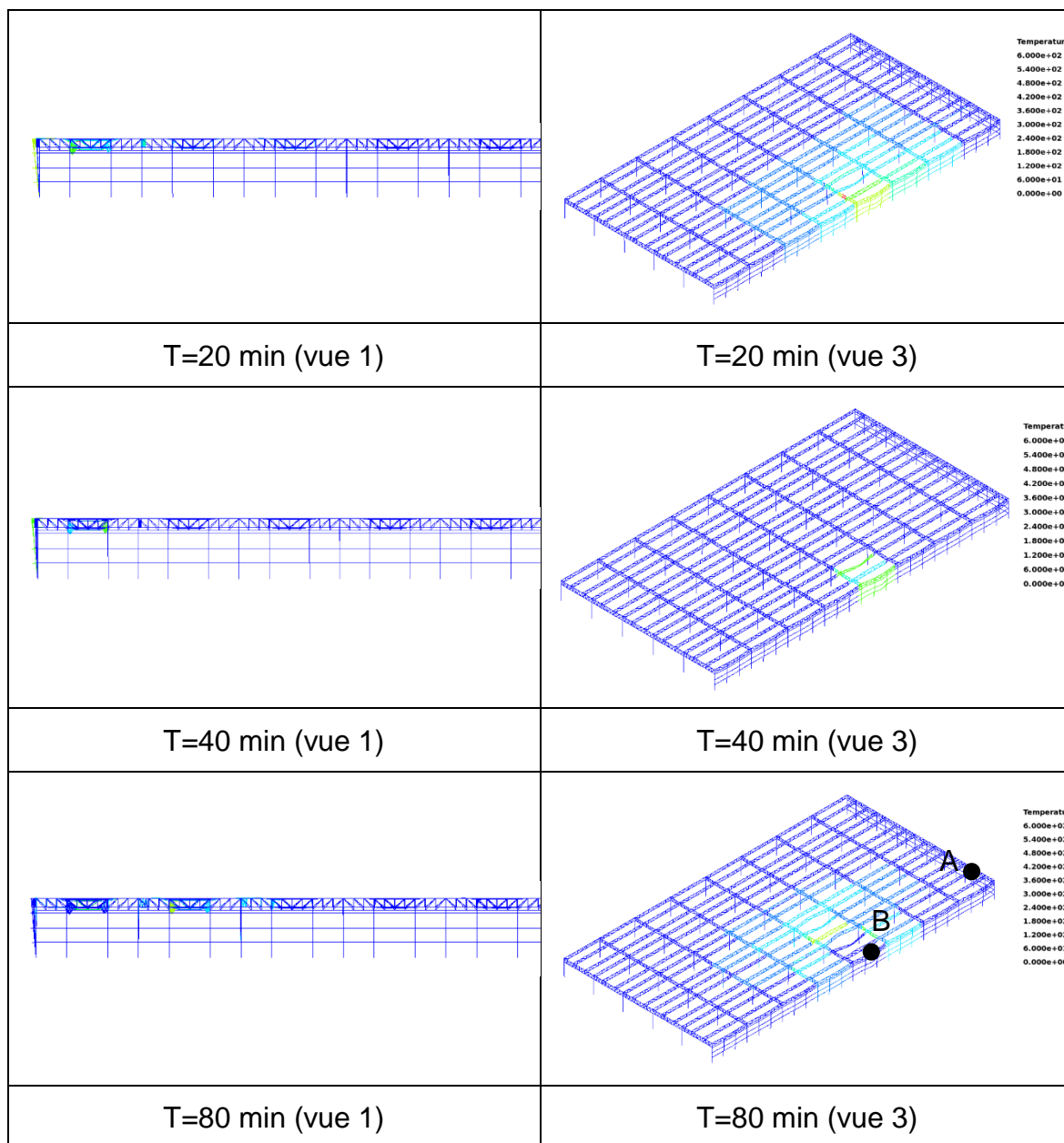
Figure 72 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

Sur la première courbe tracée sur la Figure 72, un déplacement positif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux tandis que sur la deuxième courbe, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'extérieur. Sur la première courbe, on observe un déplacement vers l'extérieur de 6 cm avant un retour vers l'intérieur. Sur la deuxième courbe, aucun déplacement vers l'extérieur n'est constaté, la ruine s'effectue directement vers l'intérieur.

Aucun de ces déplacements n'est de nature à générer ni une ruine vers l'extérieur, ni une ruine en chaîne.

#### 6.5.2.2 Résultats pour le scénario S2-B : départ de feu près du mur périphérique au Nord

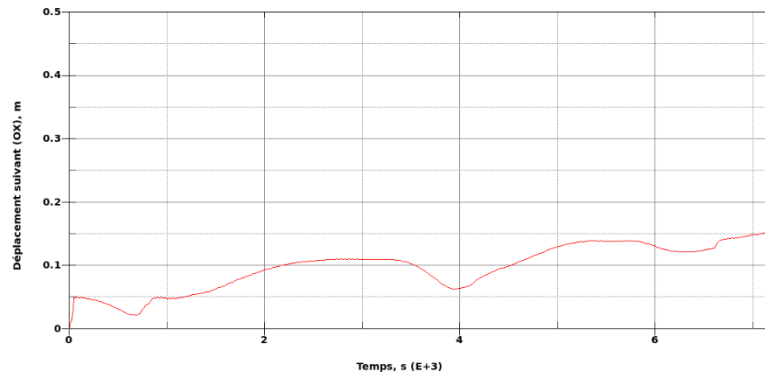
La Figure 73 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S2-B.



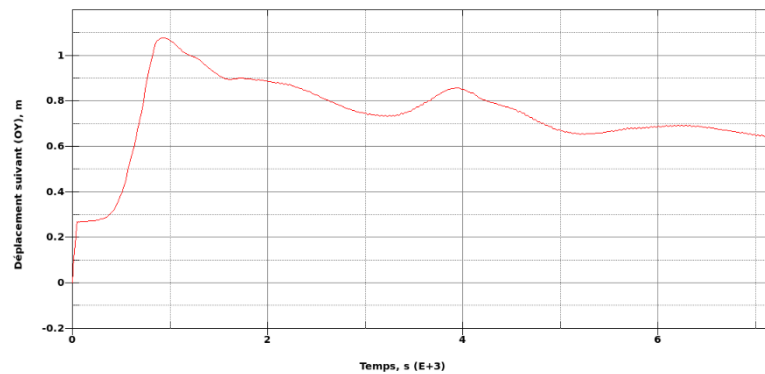
*Figure 73 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu près du mur périphérique au Nord du bâtiment B*

La Figure 73 montre qu'une déformation du motif se produit localement autour du feu sans toutefois entraîner de ruine. Cela est dû à la puissance de feu limitée pour ce scénario.

Sur la Figure 74, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 73 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



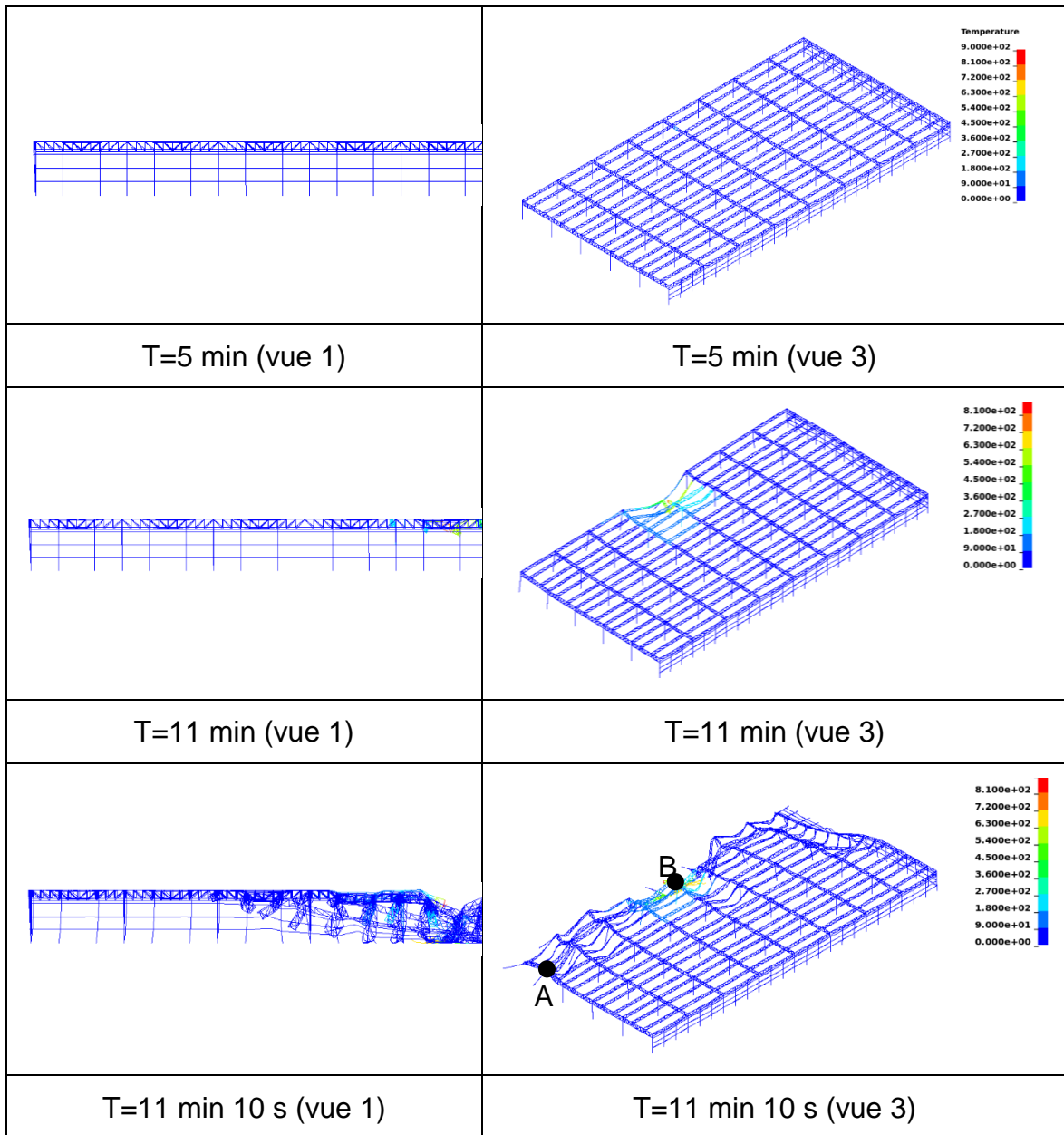
Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

Figure 74 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

Sur la première courbe tracée sur la Figure 74, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux tandis que sur la deuxième courbe, un déplacement positif dénote un déplacement vers l'extérieur. Sur la première courbe, aucun déplacement vers l'extérieur n'est observable, la ruine s'effectue directement vers l'intérieur. Sur la deuxième courbe, un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux jusqu'à une distance de 1,1 m est observable, sans toutefois qu'il n'y ait de rupture et ruine vers l'extérieur. Aucun mur n'est présent de ce côté, seuls des panneaux de bardage sont greffés sur les poteaux. Toutefois, l'amplitude de la flèche conduit à préconiser de ne pas s'approcher d'une distance inférieure à 5 m en cas d'intervention par les services de secours.

#### 6.5.2.3 Résultats pour le scénario S3-B : départ de feu près du mur séparatif entre les bâtiments A et B

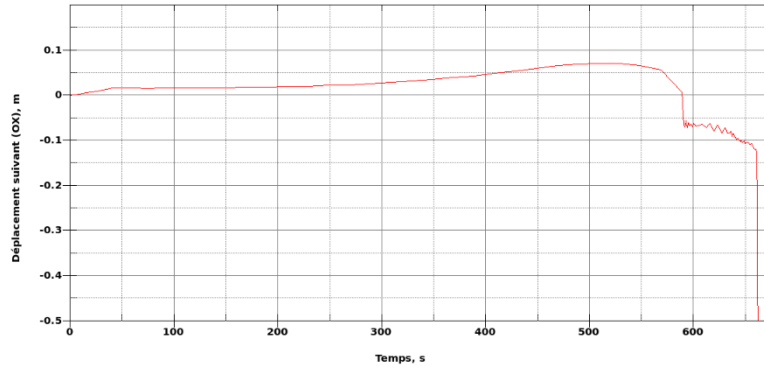
La Figure 75 présente la déformée globale à différents instants pour le scénario S3-B.



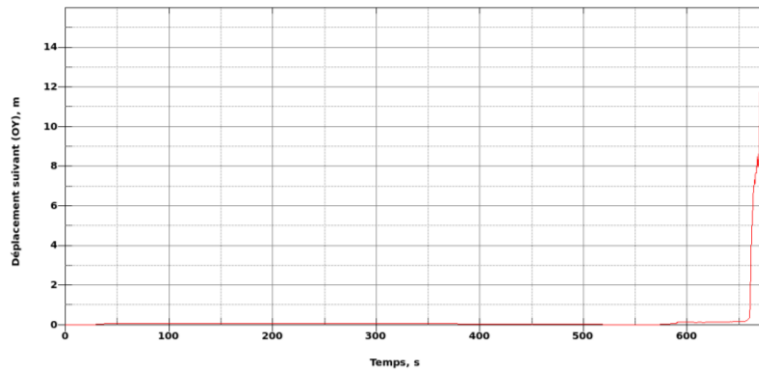
*Figure 75 : Évolution de la déformée globale pour un départ de feu près du mur séparatif entre les bâtiments A et B*

La Figure 75 montre une ruine s'amorçant localement à partir de 11 minutes et gagnant l'ensemble du motif en quelques secondes. On retiendra donc un temps de tenue structurelle de 11 minutes pour ce scénario.

Sur la Figure 76, l'évolution dans le temps du déplacement pour les points notés A et B sur la Figure 68 est présentée. Il s'agit des deux points situés en extrémité haute du magasin et susceptibles de subir les déplacements les plus importants.



Déplacement suivant (OX) au niveau du point A



Déplacement suivant (OY) au niveau du point B

Figure 76 : Déplacement en fonction du temps aux points A et B

Sur la première courbe tracée sur la Figure 76, un déplacement positif dénote un déplacement vers l'extérieur des têtes de poteaux tandis que sur la seconde courbe, un déplacement négatif dénote un déplacement vers l'intérieur. À l'extrémité notée A, le déplacement vers l'extérieur peut atteindre jusqu'à 7 cm avant que la ruine revienne vers l'intérieur. Au point B, la ruine s'effectue directement vers l'intérieur sans aucun déplacement vers l'extérieur.

Ce scénario de révèle aucun risque de ruine vers l'extérieur ni de ruine en chaîne.

### 6.5.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE COMPORTEMENT À L'INCENDIE DES STRUCTURES

Le Tableau 10 présente l'ensemble des résultats de ruine structurelle obtenus à travers l'étude.



Scénario	Ruine locale ou globale ?	Temps de ruine	Flèche maximale vers l'extérieur	Risque de ruine en chaîne ?	Préconisation
<b>S1-A</b>	locale	39 min	15 cm	non	Attention aux éléments de mur côté cantine et bureaux susceptibles de chuter vers l'extérieur
<b>S2-A</b>	-	-	27 cm	non	Attention aux éléments de mur côté cantine et bureaux susceptibles de chuter vers l'extérieur
<b>S3-A</b>	locale	32 min	12 cm	non	Attention aux éléments de mur côté cantine et bureaux susceptibles de chuter vers l'extérieur
<b>S1-B</b>	globale	10 min 50 s	6 cm	non	-
<b>S2-B</b>	-	-	1,1 m	non	Ne pas approcher de la paroi Nord d'une distance inférieure à 5 m en cas d'intervention
<b>S3-B</b>	globale	11 min	7 cm	non	-

*Tableau 10 : Résumé des résultats de l'étude structurelle*

Le Tableau 10 montre que la ruine en chaîne et la ruine globale vers l'extérieur ne se produisent pour aucun des scénarios étudiés. Par ailleurs, les temps de ruine sont compatibles avec les temps nécessaires à l'évacuation des personnes. Il est toutefois à noter que :

- Pour les scénarios de départ de feu S1-A, S2-A et S3-A, des éléments de murs peuvent chuter vers l'extérieur du côté de la cantine et des bureaux. Par conséquent, des mesures de protection et de prévention préalables devront être mise en place pour protéger le personnel et les services d'intervention.

- Au vu de la flèche maximale constatée pour le scénario S2-B, il est déconseillé aux services de secours de s'approcher de la paroi Nord du bâtiment B d'une distance inférieure à 5 m.

## 7 CONCLUSIONS

L'étude a permis de montrer la compatibilité entre, d'un côté, la cinétique de l'incendie et la ruine de la structure, et de l'autre, l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours pour le bâtiment A, le bâtiment cantine, la mezzanine du bâtiment A et le bâtiment B.

Le Tableau 11 synthétise les durées calculées de tenabilité pour le personnel ainsi que les temps de ruine calculés pour les bâtiments A et B.

Localisation des personnes à évacuer	Durée de tenabilité (min)	Temps de ruine (min) / Type de ruine	Durée nécessaire d'évacuation (min)
Bâtiment A	13	32 / locale	6,8
Bâtiment cantine	10	-	4,1
Mezzanine	12	-	3,9
Bâtiment B	13	10,9 / globale	5,5

*Tableau 11 : Synthèse sur les durées de tenabilité et les temps de ruine*

Aucune ruine vers l'extérieur ni ruine en chaîne n'est constatée. Il est toutefois à noter que :

- Pour les scénarios de départ de feu S1-A, S2-A et S3-A, des éléments de murs peuvent chuter vers l'extérieur du côté de la cantine et des bureaux. Par conséquent, sans qu'il soit nécessaire de mettre en place des mesures de protection, le personnel et les services de secours doivent être sensibilisés à ce point de manière préventive.
- Au vu de la flèche maximale constatée pour le scénario S2-B, il est déconseillé aux services de secours de s'approcher de la paroi Nord du bâtiment B d'une distance inférieure à 5 m.

En ce qui concerne la salle de stockage aérosols et liquides inflammables, l'INERIS préconise de mettre en place une protection EI 30 sur les poteaux du mur extérieur et du mur intercellulaire et à partir de ces murs sur les poutres jusqu'au premier élément transverse sur le treillis.



## 8 **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Drysdale, An introduction to fire dynamics. – New-York : Wiley, 1999.
- [2] Flumilog, Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt – Partie A – DRA-09-90977-14553A Version 2
- [3] ISO/TR 16738, Ingénierie de la sécurité incendie – évaluation du comportement et du mouvement des personnes.
- [4] AFNOR - Guide d'application – Ingénierie de la sécurité incendie – Entrepôts – Guide des modalités d'application de l'article 6 – 6<sup>ième</sup> alinéa de l'arrêté du 5 Août 2002
- [5] G.W. Mulholland. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter smoke, Production and Properties, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3<sup>rd</sup> edition, 2002.
- [6] G.W. Mulholland and C. Croarkin, Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. Fire and Materials, 24 :227-230, 2000.
- [7] Norme ISO 13571 – composants dangereux du feu - Novembre 2012



## 9 LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
1	Description du logiciel FDS	3





## **ANNEXE 1**

### **PRÉSENTATION DU LOGICIEL FDS**



L'outil de simulation utilisé pour ces modélisations est FDS 5 [5] (Fire Dynamic Simulator) développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology). Le logiciel FDS est conçu pour la simulation numérique d'incendie. Plus précisément, il s'agit de simuler un écoulement réactif à faible nombre de Mach, donc peu compressible, dont l'établissement est piloté par des phénomènes thermiques. Ceci nécessite la résolution des équations de Navier Stokes couplées à des modèles chimiques et thermiques. Le code de calcul considère un domaine 3D et intègre un modèle de combustion, des modèles d'échange de chaleur (radiation, convection et conduction) et des modèles de turbulence (L.E.S : Large Eddy Simulation ou D.N.S : Direct Numerical Simulation).

Dans le contexte des applications de FDS par l'INERIS, même si cela n'est pas exclusif, il convient de noter que l'utilisation principale du logiciel par l'institut concerne surtout les incendies à moyenne et grande échelles qui nécessitent l'utilisation du modèle L.E.S.

Les phénomènes physiques que FDS peut simuler sont triés en 4 classes :

- Les phénomènes fluides, représentés par le modèle hydrodynamique,
- Les phénomènes chimiques, représentés par le modèle de combustion adapté au modèle de turbulence choisi,
- Les phénomènes thermiques, représentés par un ensemble de modèles thermiques,
- Les actions et événements externes, dont chacun est représenté par un modèle spécifique.

Le domaine de simulation est un espace 3D contenant principalement un mélange gazeux. Il s'agit principalement d'un mélange d'air et de produits de combustion. Certaines zones de l'espace peuvent être occupées par des objets solides. La problématique principale est la détermination des mouvements de cette partie gazeuse et des échanges énergétiques au sein même de ce gaz mais aussi avec les obstacles. Le point central de la simulation est la résolution des équations de conservation généralement appelées équations de Navier-Stokes pour un domaine fluide. Ceci comprend les équations de conservation de la masse, des espèces chimiques, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La fermeture est effectuée par une équation d'état : la relation des gaz parfaits appliquée à un mélange.

## 1.1 MODÈLE DE COMBUSTION

Pour un calcul L.E.S, la finesse des maillages adoptés n'est pas suffisante pour résoudre la diffusion de l'oxygène et du combustible par exemple. Ainsi FDS utilise un modèle de combustion particulier basé sur la fraction de mélange, qui ne prend pas en compte l'aspect moléculaire de la combustion.

La fraction de mélange  $Z$ , qui obéit de fait à une loi de conservation, est définie par :

$$Z = \frac{sY_{C_xH_yO_z} - (Y_{O_2} - Y_{O_2}^\infty)}{sY_{C_xH_yO_z}^\infty + Y_{O_2}^\infty}, \quad \text{avec} \quad s = \frac{v_{O_2} M_{O_2}}{v_{C_xH_yO_z} M_{C_xH_yO_z}}$$

Les  $Y_i$  représentent les fractions de chaque espèce, ici l'oxygène et le combustible, tandis que l'indice  $\infty$  indique leurs niveaux maximums.  $\nu_i$  est le coefficient stœchiométrique et  $M_i$  la masse molaire de chaque espèce.

L'hypothèse de réaction à chimie rapide formulée dans le code suppose que le combustible et l'oxydant disparaissent simultanément. Le modèle est donc un modèle de flamme mince puisque la flamme est une enveloppe dans l'espace 3D. Ainsi la flamme est définie comme étant la zone comprenant toutes les cellules où

$$Z = Z_f \quad \text{avec} \quad Z_f = \frac{Y_{O_2}^\infty}{s Y_{C_x H_y O_z}^\infty + Y_{O_2}^\infty}$$

La combustion est entièrement commandée par la fraction de mélange puisqu'elle est liée à toutes les espèces via des relations d'état basées sur le modèle irréversible de réaction retenu :



La flamme mince est donc l'enveloppe constituée des cellules où  $Z = Z_f$ , dans lesquelles se déclenche une réaction instantanée consommant tout le combustible et le comburant, et y laisse seulement les suies et autres produits de combustion. Le dégagement de chaleur local est également lié à la fraction de mélange.

Numériquement, ce dégagement de chaleur s'effectue en trois étapes :

- localisation de la flamme mince,
- calcul du dégagement de chaleur surfacique local,
- distribution de l'énergie aux cellules concernées par la flamme.

La part de l'énergie calculée due à l'élévation de température est ensuite injectée dans l'équation de l'énergie, mais pas celle issue de la radiation. Cette distribution peut être choisie par l'utilisateur.

## 1.2 PHÉNOMÈNES THERMIQUES

### 1.2.1 MODÈLES DE CONDUCTION ET DE PYROLYSE

FDS propose 2 modèles de conduction et de pyrolyse pour les solides et un modèle pour les liquides.

Pour les solides :

- 1- Le premier modèle considère un solide thermiquement épais dans lequel la conduction thermique est supposée mono dimensionnelle (dans la direction normale à la surface d'échange) dans un milieu semi-infini.

La fermeture du système est assurée par une condition de Neumann homogène à une distance infiniment loin de la surface.

Pour les solides susceptibles de pyrolyser, le modèle de pyrolyse est utilisé quand la température de surface du solide atteint une température seuil appelée température de pyrolyse. La température de surface est alors fonction des flux

radiatifs et convectifs, mais également du taux de pyrolyse caractérisé par le terme  $-\dot{m}''\Delta H_v$ .

où

$\dot{m}''$  : débit de gaz de pyrolyse produit

$\Delta H_v$  : chaleur latente d'évaporation du combustible

- 2- Le second modèle considère un solide thermiquement mince et suppose la température homogène dans le solide. Par conséquent, seule la température de surface est évaluée. Le modèle de pyrolyse est semblable à celui utilisé pour les matériaux épais.

Pour les liquides, la vitesse d'évaporation du combustible est fonction de la température du liquide et de la concentration de sa phase gazeuse à la surface de la flaque. L'équilibre est atteint lorsque la pression partielle du produit en phase gazeuse est égale à la pression de Clausius-Clapeyron.

### 1.2.2 MODÈLE RADIATIF

Le transfert de chaleur par rayonnement est résolu par une méthode dite n-flux. Cette méthode est basée sur l'hypothèse d'un milieu optiquement gris. Par conséquent, le milieu de propagation du rayonnement thermique joue un rôle actif. Le bilan entre le flux reçu et le flux émis doit donc être effectué dans chaque volume élémentaire de l'espace. Cette hypothèse de base est relativement bien adaptée à la problématique des incendies puisqu'une grande partie du transfert de chaleur radiatif met en cause les fumées qui sont bien représentées par un milieu optiquement gris.

Dans les zones réactives, la distribution de l'énergie libérée par la combustion est répartie entre une partie transmise directement au milieu et celle transmise par rayonnement. Par première partie a pour effet un échauffement local impliquant des mouvements de convection. Elle est donc appelée fraction convective de l'énergie libérée. L'autre partie est appelée partie fraction radiative. Par défaut, FDS considère la fraction radiative est de 35%.



**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

**Institut national de l'environnement industriel et des risques**

Parc Technologique Aïata  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) - Internet : <http://www.ineris.fr>