



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 183385 - 2081363 - v1.0

28/05/2020

Etude d'ingénierie incendie d'une cellule EGHA de grande hauteur

FLIXECOURT

PRÉAMBULE

Le présent document a été établi sur la base des informations transmises à l'Ineris. La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations fournies.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du présent document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La prestation ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser le document après cette date.

L'établissement du présent document et la prestation associée sont réalisés dans le cadre d'une obligation de moyens.

Au vu de la mission qui incombe à l'Ineris au titre de l'article R131-36 du Code de l'environnement, celui-ci n'est pas décideur. Ainsi, les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre de cette prestation ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur. Par conséquent la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du présent document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toutes autres modifications qui y serait apportées. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour toute utilisation du document en dehors de son objet.

En cas de contradiction entre les conditions générales de vente et les stipulations du présent préambule, les stipulations du présent préambule prévalent sur les stipulations des conditions générales de vente.

Nom de la Direction en charge du rapport : DRA

Rédaction : RAHMAN Shihab

Vérification : TRUCHOT BENJAMIN; LE-ROUX BENJAMIN

Approbation : Stéphane DUPLANTIER le 28/05/2020

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

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	6
1.1.	Contexte.....	6
1.2.	Eléments contractuels.....	7
2.	DESCRIPTION DES CELLULES EGHA.....	8
2.1.	Généralités.....	8
2.2.	Ecrans de cantonnement, exutoires et surfaces d'ouvrants en façade.....	8
2.3.	Passerelles en toiture et escaliers de maintenance.....	8
2.3.1.	Passerelles en toiture.....	8
2.3.1.	Escaliers de maintenance.....	9
2.4.	Structure des racks des cellules EGHA.....	11
2.4.1.	Plans en coupe.....	11
2.4.2.	Profilés.....	13
2.4.3.	Fondations.....	16
2.4.4.	Chargement structurel.....	16
2.4.4.1.	Charges climatiques.....	17
2.4.4.2.	Charges d'exploitation.....	17
2.4.4.3.	Charges permanentes.....	17
3.	MESURES DE SECURITE MISES EN PLACE CONTRE LE RISQUE INCENDIE ET EVACUATION DES OPERATEURS EN CHARGE DE LA MAINTENANCE.....	18
3.1.	Sprinklage.....	18
3.2.	Moyens de détection.....	18
3.3.	Intervention des secours externes.....	18
3.4.	Evacuation des opérateurs en situation de maintenance.....	18
4.	CHOIX DES SCENARIOS A MODELISER.....	21
4.1.	Scénarios permettant d'étudier le désenfumage.....	21
4.2.	Scénarios permettant d'étudier l'effondrement de la structure.....	21
5.	HYPOTHESES DE MODELISATION DU DEVELOPEMENT DE L'INCENDIE.....	22
5.1.	Géométrie de la cellule modélisée.....	22
5.2.	Hypothèses relatives au combustible.....	22
5.2.1.	Température de propagation et taux de suie.....	22
5.2.2.	Puissance dégagée par les combustibles.....	23
5.2.3.	Toxicité des produits combustibles.....	23
5.2.3.1.	Notion de FED.....	23
5.2.3.2.	Notion de FEC.....	24
5.2.3.3.	Critère retenu.....	25
5.2.3.4.	Feu de produits 1510.....	25
5.2.4.	Notion de visibilité.....	25
6.	MODELISATION DU DEVELOPEMENT DE L'INCENDIE.....	27
6.1.	Critères de tenabilité.....	27
6.1.1.	Critères de tenabilité pour la sécurité des opérateurs en situation de maintenance.....	27
6.1.2.	Critères de tenabilité pour la sécurité des intervenants.....	27
6.2.	Calcul du scénario de départ de feu au centre de la cellule.....	27

6.2.1. Propagation du feu dans le stockage	28
6.2.2. Conditions de visibilité	29
6.2.3. Conditions de température	30
6.2.3.1. Occurrence du phénomène de flashover	30
6.2.3.2. Température à hauteur d'homme	32
6.2.4. Conditions de toxicité	33
6.3. Synthèse des résultats de calcul de développement d'incendie	34
7. MODELISATION DE LA REPONSE DE LA STRUCTURE A L'INCENDIE	35
7.1. Modèle d'échauffement des structures métalliques.....	35
7.2. Présentation de la structure modélisée et des scénarios d'incendie	35
7.3. Résultats des calculs d'effondrement.....	37
7.3.1. Départ de feu au centre (scénario S1)	37
7.3.1.1. Calcul 2D	37
7.3.1.2. Calcul 3D	38
7.3.2. Départ de feu près d'une paroi (scénario S2).....	41
7.3.2.1. Calcul 2D	41
7.3.2.2. Calcul 3D	42
7.3.3. Départ de feu près d'une paroi (scénario S2) avec adaptations structurelles	44
7.3.3.1. Renforcement des montants des échelles périphériques	44
7.3.3.2. Modification de la poutre en tête de montants	45
7.3.3.3. Calculs 2D avec adaptations structurelles : départ de feu près du mur (scénario S2)	47
7.3.3.4. Calculs 2D avec adaptations structurelles : départ de feu au centre (scénario S1)	49
8. CONCLUSION	51
9. REFERENCE	52

Liste des figures

Figure 1 : Plan de masse du site	6
Figure 2 : Passerelles entre bâtiments – schéma de principe	9
Figure 3 : Escalier de maintenance et position des appuis sur la façade de l'EGHA.	10
Figure 4 : Position des escaliers de maintenance et passerelles de franchissement en toiture	11
Figure 5 : Plans en coupe de la structure en racks de la cellule EGHA	12
Figure 6 : Matériaux et dimensions des profilés (plan de coupe transversal)	13
Figure 7 : Matériaux et dimensions d'une section de lisse (plan de coupe longitudinal)	14
Figure 8 : Position des profilés	16
Figure 9 : Boîtes d'ancrage	16
Figure 10 : Décomposition du temps d'évacuation en fonction du développement de l'incendie.	19
Figure 11 : Emplacement des issues de secours et parcours maximal d'évacuation.....	19
Figure 12 : Position des départs de feu pour les scénarios S1 et S2	21
Figure 13 : Géométrie modélisée sous le logiciel FDS, position de l'incendie correspondant au scénario S1.....	22
Figure 14 : Evolution temporelle de la puissance de la palette.....	23
Figure 15 : Puissance du feu dans la cellule EGHA	28
Figure 16 : Evolution de l'incendie à l'intérieur du stockage	29
Figure 17 : Echelle de visibilité (m).....	29
Figure 18 : Evolution de la visibilité au cours du temps à hauteur d'homme	29
Figure 19 : Evolution de la visibilité au cours du temps sur un plan vertical.	30
Figure 20 : Echelle de température	30
Figure 21 : Evolution de la température dans un plan de coupe horizontal à l'altitude $z=29$ m.....	31
Figure 22 : Evolution de la température dans un plan de coupe latéral à l'abscisse $x=85$ m	31
Figure 23 : Echelle de température	32
Figure 24 : Evolution de la température à hauteur d'homme	32
Figure 25 : Coupe verticale de toxicité à 8 min.....	32
Figure 26 : Echelle de toxicité considérée (ppm).....	33
Figure 27 : Evolution de la toxicité à hauteur d'homme	33
Figure 28 : Coupe verticale de toxicité à 6 min 30 s	34
Figure 29 : Position du motif 3D modélisé et des départs de feu	36
Figure 30 : Effondrement structurel du motif 2D pour un départ de feu au centre de la cellule	37
Figure 31 : Effondrement structurel du motif 3D pour un départ de feu au centre de la cellule	39
Figure 32 : Déplacement transversal des têtes de montants au cours de la ruine globale.....	40
Figure 33 : Effondrement structurel du motif 2D pour un départ de feu près d'une paroi	42
Figure 34 : Déplacement suivant (OY) du point A en fonction du temps	42
Figure 35 : Effondrement structurel du motif 3D pour un départ de feu près du mur.....	43
Figure 36 : Renforcement des montants périphériques.....	44
Figure 37 : Chronologie du flambement vers l'extérieur du montant B.....	45
Figure 38 : Renforcements retenus	46
Figure 39 : Chronologie du flambement vers l'intérieur	47
Figure 40 : Effondrement structurel du motif 2D avec adaptations structurelles pour un départ de feu près de la paroi.....	48
Figure 41 : Déplacement suivant (OY) du point A en fonction du temps	49
Figure 42 : Effondrement structurel du motif 2D avec structure renforcée pour un départ de feu au centre de la cellule	50

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

La société JJA prévoit la construction d'un site logistique à Mouflers dans le département de la Somme (80) et plus précisément sur la ZAC des Hauts Plateaux. Le plan de masse du site est présenté sur la Figure 1.



Figure 1 : Plan de masse du site

Les cellules EGHA, qui font l'objet de la présente étude, sont des cellules de stockage d'une hauteur sous bac de 45 m et d'une surface au sol de 6 000 m². Toutes les cellules EGHA sont entièrement automatisées et autoportées par des racks métalliques de structure identique. En particulier, aucune distinction n'est à signaler pour les cellules en bord de plateforme (EGHA1, EGHA5, EGHA6 et EGHA10) Aussi, une unique cellule est étudiée dans le présent rapport, les résultats obtenus sont directement transposables aux autres cellules de ce site.

Au sens de l'Arrêté du 11 Avril 2017, une étude d'ingénierie incendie est requise pour les cellules dépassant 23 m de haut telles que ces cellules EGHA. L'objectif d'une telle étude est de démontrer :

- l'adéquation entre la cinétique de développement de l'incendie et l'évacuation des personnes ainsi que l'intervention des services de secours ;
- l'absence de ruine en chaîne ;

- l'absence de ruine vers l'extérieur.

1.2. Eléments contractuels

Cette prestation fait suite à :

- une proposition technique et financière référencée INERIS-183385-648644-v2.0 en date du 27/06/2019 ;
- une commande en date du 23/07/2019.

2. DESCRIPTION DES CELLULES EGHA

2.1. Généralités

Ces cellules de stockage double profondeur possèdent une surface au sol d'environ 6 000 m² et ont une hauteur moyenne sous bac de 45 m. Les façades en vis-à-vis des cellules EGHA ainsi que les façades en pignon sont constituées de panneaux sandwich avec laine minérale fixés sur racks autoporteurs dans la cellule. Les panneaux sont munis de propriété EI 120 vis-à-vis d'un feu extérieur à la cellule associée. Ce système est dimensionné pour éviter la propagation du feu pendant 120 minutes entre cellules EGHA. Les cellules seront équipées de transstockeurs automatiques assurant la gestion totalement autonome des stockages sans intervention humaine à l'exception des phases de maintenance. La hauteur de stockage, soit le haut de la dernière palette, sera d'environ 43 m.

Les combustibles stockés relèvent de la rubrique ICPE 1510 et sont conditionnés au format Europalettes standard. Jusqu'à 11% (en nombre) des palettes pourront être constituées de palettes de la rubrique 2663.

2.2. Ecrans de cantonnement, exutoires et surfaces d'ouvrants en façade

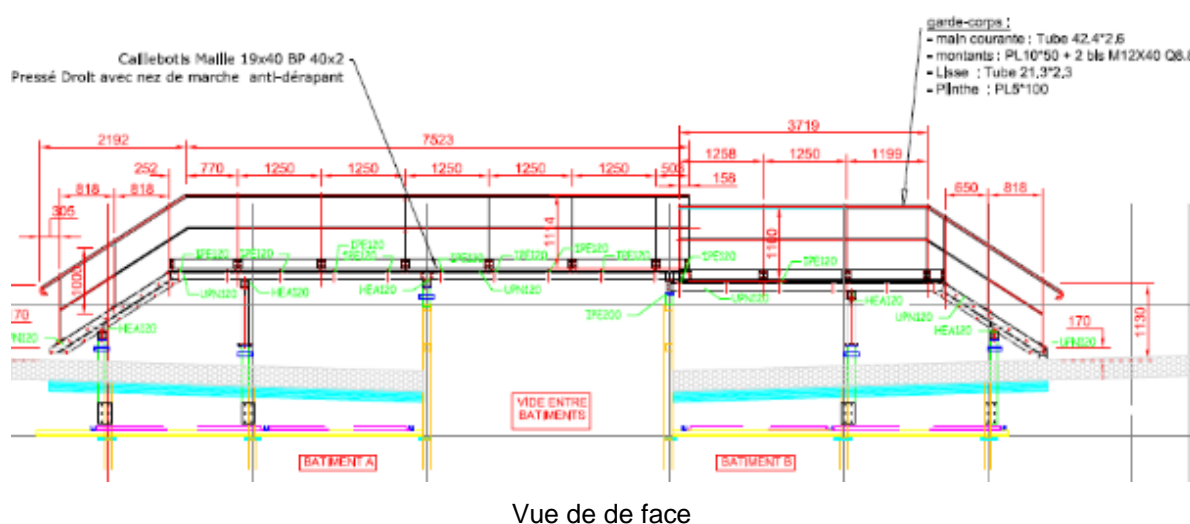
La cellule est séparée en 4 cantons d'environ 1400 m² chacun. Les exutoires sont répartis de manière homogène, leur surface utile représente 2% de la surface de la cellule.

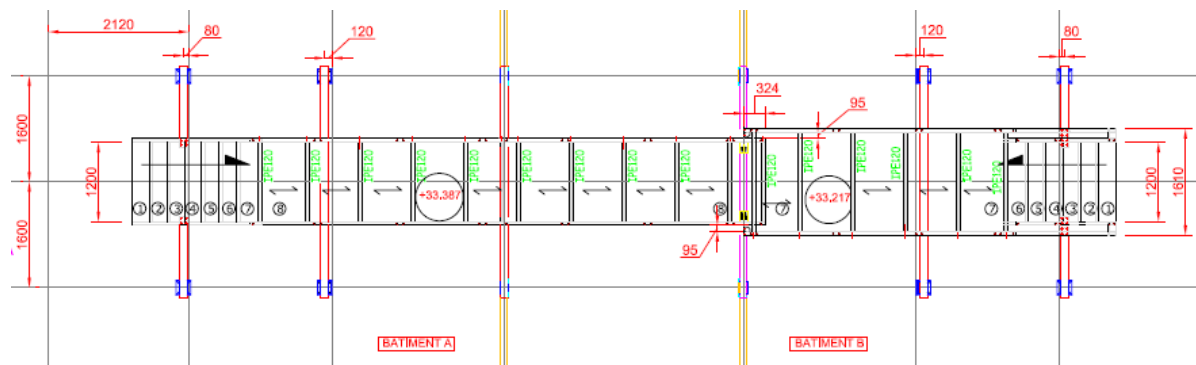
Les ouvrants en façade sont les portes de quais, ce qui représente bien une surface d'ouvrants supérieure à la surface d'exutoires du plus grand canton.

2.3. Passerelles en toiture et escaliers de maintenance

2.3.1. Passerelles en toiture

Afin de faciliter les opérations de maintenance, des passerelles de franchissement permettent en toiture le passage entre cellules EGHA comme présenté sur la Figure 4. Bien que reliant les cellules EGHA, ces passerelles, selon les informations transmises par le client, assurent une liaison faible et coulissante qui n'est pas de nature à propager la ruine structurelle d'une cellule à l'autre. Cette hypothèse est retenue dans la présente étude. Le schéma de principe des passerelles entre bâtiments est présenté sur la Figure 2.





Vue de dessus

Figure 2 : Passerelles entre bâtiments – schéma de principe

La structure porteuse des passerelles est constituée de profilés UPN120, HEA120, IPE200 et IPE120. La largeur des passerelles est d'environ 1,6 m et leur longueur d'environ 16 m. Elles prennent appui sur trois montants des bâtiments de chaque côté. Un plancher en caillebotis surmonté par des garde-corps métalliques surmonte la structure porteuse.

Le poids des passerelles est estimé en tenant compte des éléments porteurs et du plancher en caillebotis en négligeant le poids des garde-corps. Etant donnée la masse linéique de chaque élément, la nature en aluminium du plancher et leurs dimensions respectives, la masse de la passerelle est estimée à environ 900 kg. Cette masse est équirépartie entre les deux portiques acier des 2 bâtiments séparés. En comparaison, considérant une masse surfacique de toiture de 30 kg/m² (voir paragraphe 2.4.4.3) et une surface de toiture de 4,4 m (alvéole longitudinale de stockage) par 53 m, la masse de toiture exercée sur chaque portique acier est égale à 4 715 kg. Il y a donc un ordre de grandeur de différence entre la masse exercée par la passerelle et celle exercée par la toiture sur un portique acier des bâtiments autoportants : le poids des passerelles sera donc négligé dans toute la suite de l'étude. De même, il existe un ordre de grandeur de différence entre la surface horizontale de passerelle et la surface de toiture, et davantage entre la surface de passerelle et la surface de façade portée par les montants externes du portique : la prise au vent des passerelles sera donc négligée dans toute la suite de l'étude.

2.3.1. Escaliers de maintenance

D'autre part, un escalier de maintenance est également présent en bord des cellules EGHA2 et EGHA7 comme présenté sur la Figure 4. Ces escaliers sont positionnés hors de la zone de stockage et exercent un appui partiel sur les façades des cellules comme présenté sur la Figure 3.

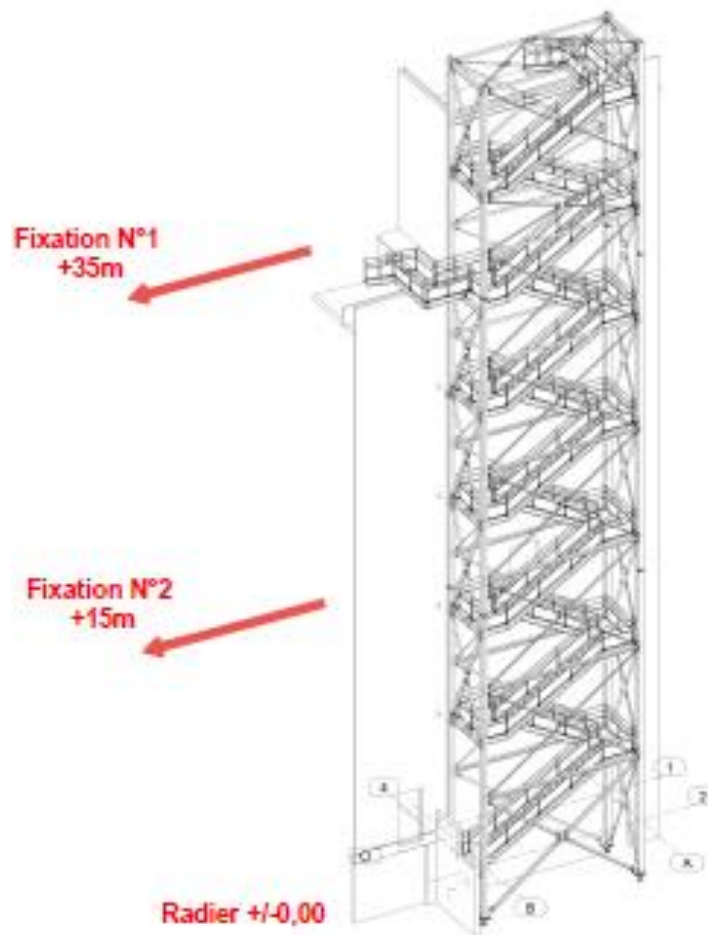
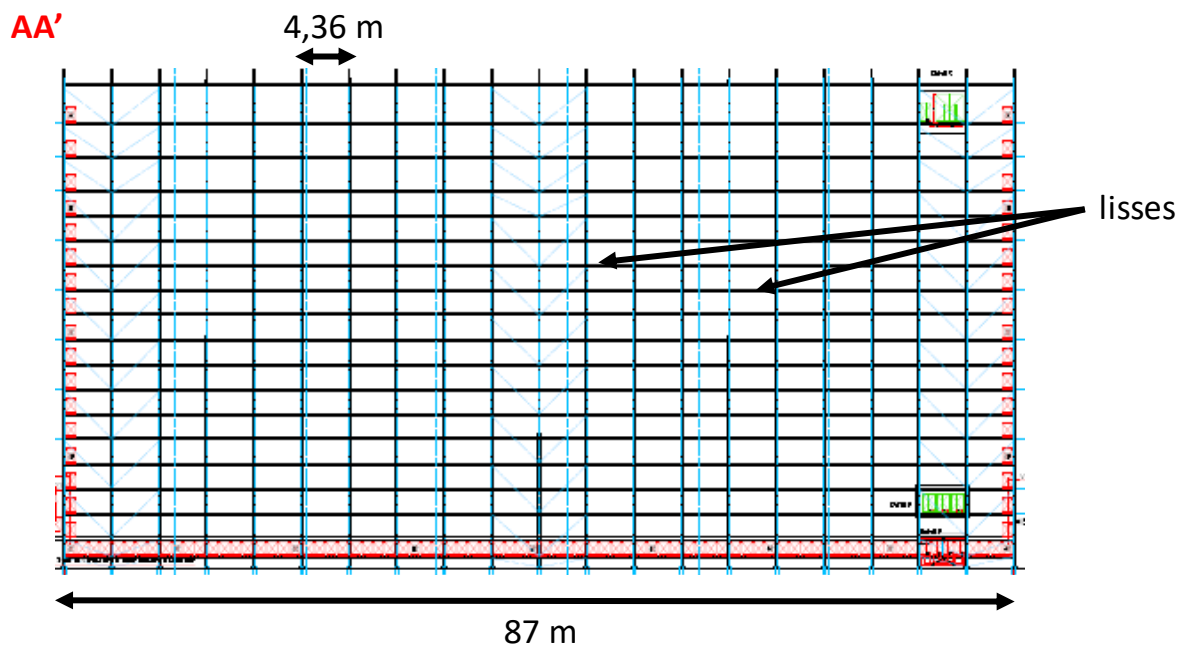


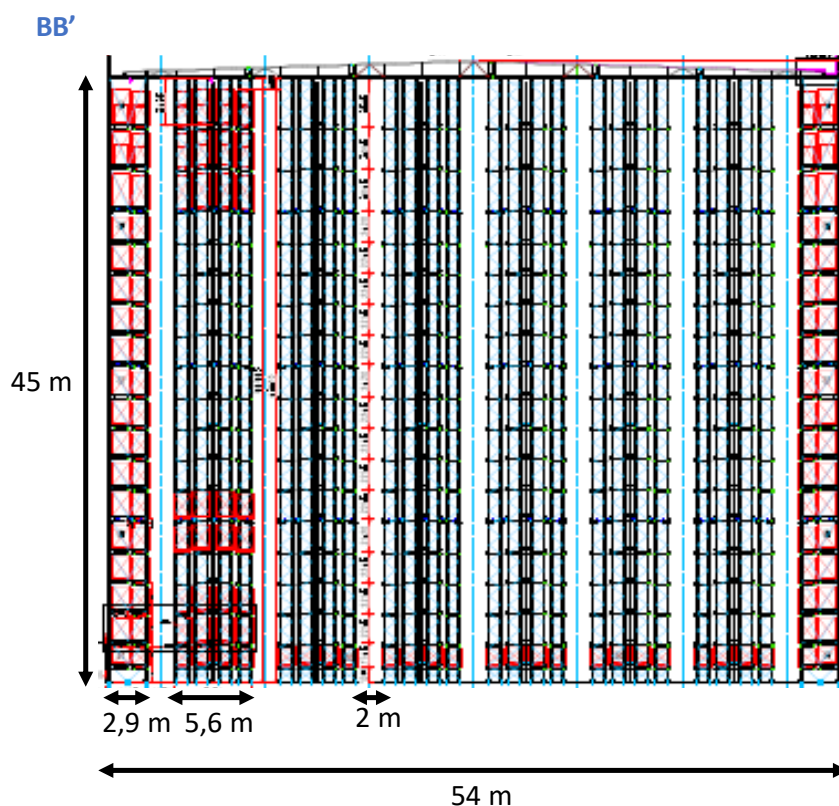
Figure 3 : Escalier de maintenance et position des appuis sur la façade de l'EGHA.

La majeure partie des efforts relatifs à la masse de la cage est reprise au sol. En outre, l'effort de vent maximal exercé sur la cage d'escalier (donnée client) et qui s'exerce sur les parois ponctuellement à 15 m et 35 m est égal à 1520 daN avant pondération par coefficient Eurocode. A titre de comparaison, l'effort de vent exercé directement sur une paroi entre deux montants est de 1210 N/m² (voir paragraphe 2.4.4.1) sur une surface correspondant à 43 m X 4,4 m soit au total 22 893 daN.

Les efforts liés à la présence ponctuelle d'escaliers de maintenance seront donc négligés dans toute la suite de l'étude.



Vue en coupe longitudinale



Vue en coupe transversale

Figure 5 : Plans en coupe de la structure en racks de la cellule EGHA

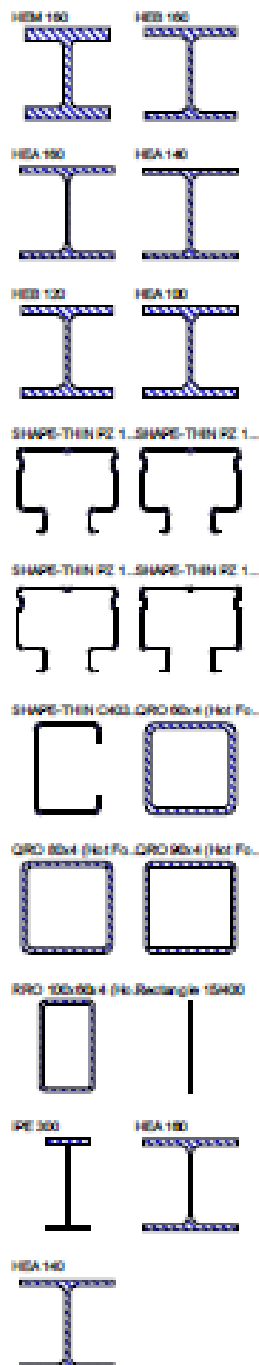
Il est important de noter que les cellules EGHA sont séparées les unes des autres d'une distance minimale de 4 m. Afin de justifier l'absence de ruine en chaîne, il convient donc de vérifier que la flèche

maximale des profilés métalliques en périphérie ne dépasse pas cette valeur. Ce point fait l'objet de calculs au chapitre 0.

2.4.2. Profilés

Ce paragraphe décrit les dimensions et les profils des éléments structurels métalliques des racks ainsi que leur positionnement. Suite aux calculs d'effondrement structurel réalisés dans la présente étude, certains des profils présentés dans ce paragraphe ont été révisés. Les profils corrigés sont présentés spécifiquement au paragraphe 7.3.3 après la première étape de calculs structurels.

Les dimensions des profilés des éléments structurels présents dans la coupe transversale de la Figure 5 ainsi que les nuances d'acier associée sont présentées sur la Figure 6.



■ MATÉRIAUX

Matér. n°	Module E [kN/cm²]	Module G [kN/cm²]	Poids spécif. γ [kN/m³]	Coef. thermique α [1/°C]	Coefficient partiel γ_M [-]	Modèle du matériau
1	S460MC DIN EN 10149-2:2013-09 21000.00	8078.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrope linéairement élastique
2	S355GD DIN EN 10346:2009-03 21000.00	8078.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrope linéairement élastique
3	Acier S 355 EN 10025-2:2004-11 21000.00	8078.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrope linéairement élastique

SECTIONS

Section n°	Matér. n°	I_x [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	Axes princip. α [°]	Rotation α' [°]	Dimensions totales [m]	
		A [cm ²]	A_y [cm ²]	A_z [cm ²]			Largeur b	Hauteur h
1	HEM 180 3	97.05	5098.00	20.31	0.00	0.00	166.0	
2	HEB 180 3	54.25	2492.00	10.81	0.00	0.00	160.0	
3	HEA 180 3	38.77	1673.00	7.85	0.00	0.00	160.0	
4	HEA 140 3	31.42	1033.00	6.25	0.00	0.00	140.0	
5	HEB 120 3	34.01	864.40	6.52	0.00	0.00	120.0	
6	HEA 100 3	21.24	349.20	4.03	0.00	0.00	100.0	
8	SHAPE-THIN PZ 140X120X3.5 1	15.77	264.32	5.27	0.00	0.00	140.0	
9	SHAPE-THIN PZ 140X120X3.5 2	15.77	264.32	5.27	0.00	0.00	140.0	
10	SHAPE-THIN PZ 140X120X2.5 2	11.48	196.84	3.78	0.00	0.00	140.0	
11	SHAPE-THIN PZ 140X120X2.0 2	9.27	160.80	3.03	0.00	0.00	140.0	
13	SHAPE-THIN C403015 2	1.59	4.19	0.39	0.00	0.00	30.0	
16	QRO 80x4 (formé à chaud) 3	8.79	45.40	3.79	0.00	0.00	60.0	
17	QRO 80x4 (formé à chaud) 3	12.00	114.00	5.12	0.00	0.00	80.0	
18	QRO 90x4 (formé à chaud) 3	13.60	166.00	5.79	0.00	0.00	90.0	
20	RRO 100x80x4 (formé à chaud) 3	12.00	158.00	6.99	0.00	0.00	60.0	
22	Rectangle 151400 3	60.00	8000.00	50.00	0.00	0.00	15.0	
23	IPE 300 3	53.81	8356.00	19.82	0.00	0.00	150.0	
24	HEA 180 3	38.77	1673.00	7.85	0.00	0.00	160.0	
25	HEA 140 3	31.42	1033.00	6.25	0.00	0.00	140.0	

Figure 6 : Matériaux et dimensions des profilés (plan de coupe transversal)

De même, la section d'une lisse liant les portiques transversaux entre eux, telle que présentée sur la Figure 5, est présentée sur la Figure 7.

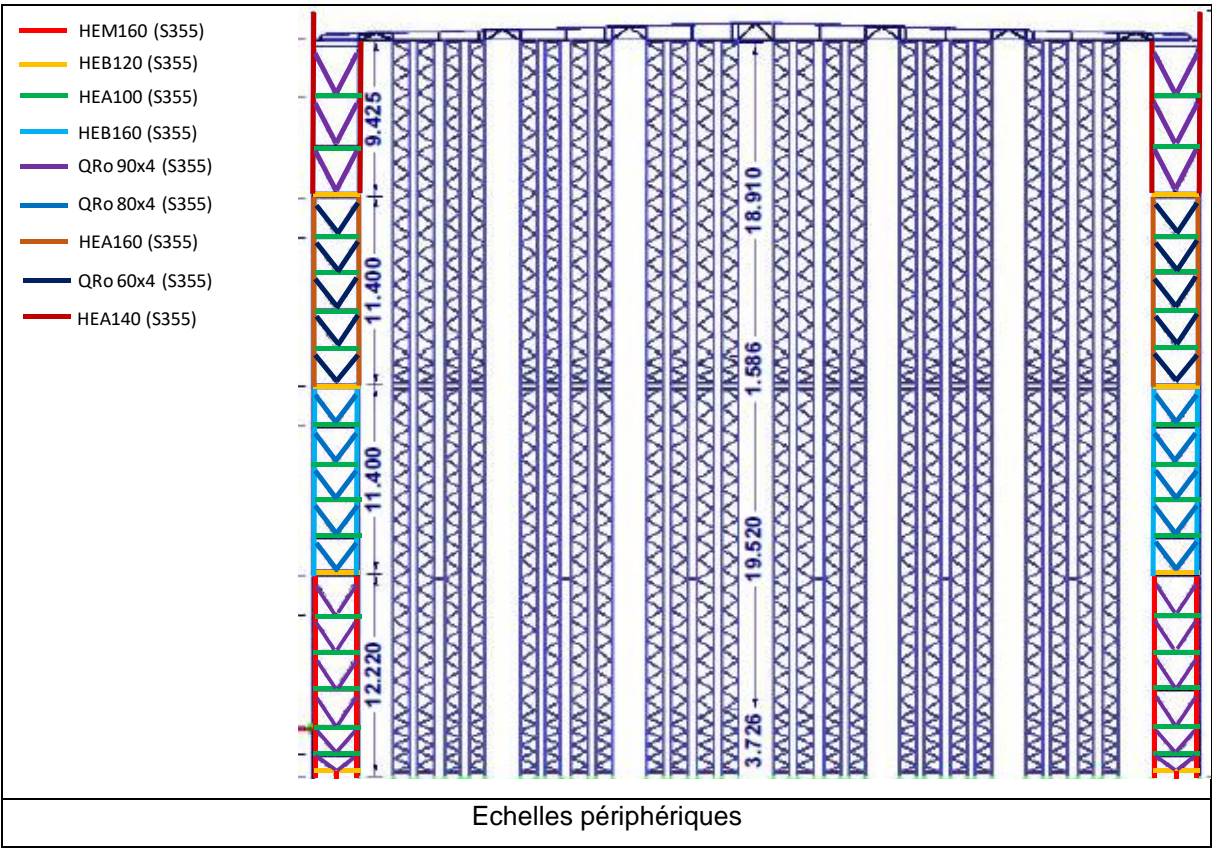
SHAPE-THIN CS2

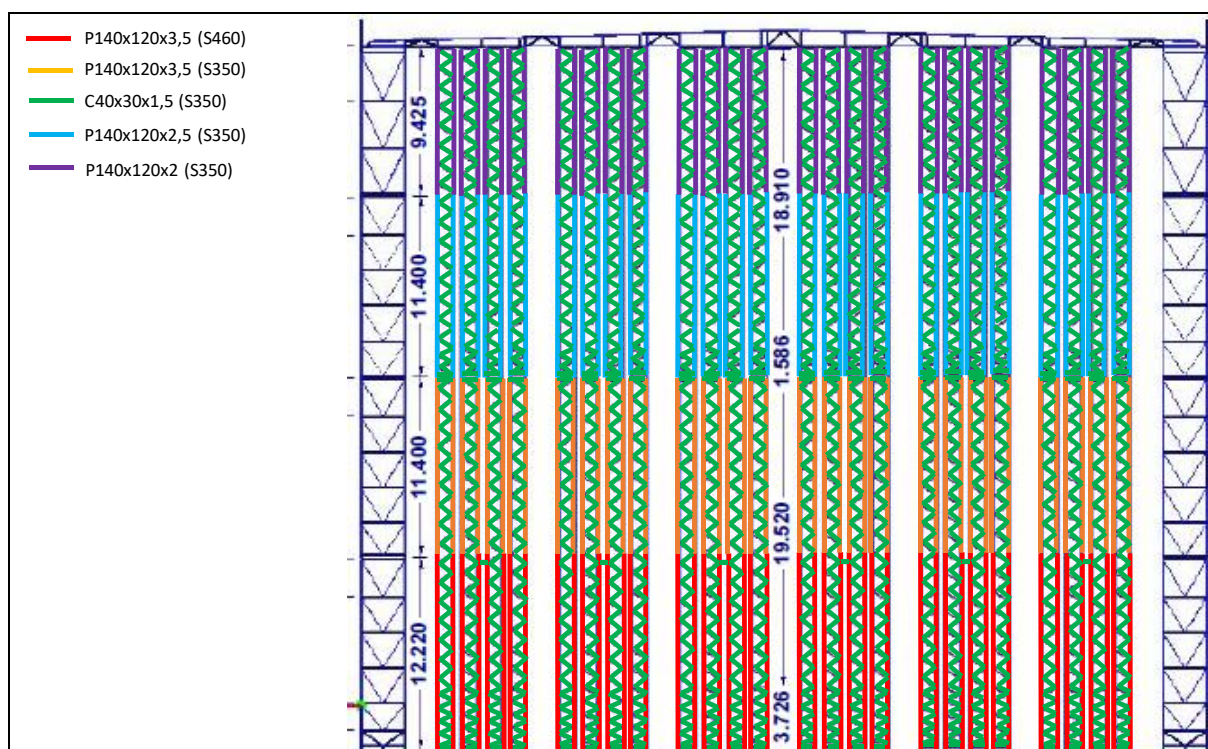
MATÉRIAUX							
Matér. n°	Module E [kN/cm²]	Module G [kN/cm²]	Poids spécif. γ [kN/m³]	Coef. thermique α [1/K]	Coefficient partiel γ _M [-]	Modèle du matériau	
1	S350GD 1.0529 DIN EN 10346:2009-03 21000.00	8076.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrope linéairement élastique	

SECTIONS							
Section n°	Matér. n°	I _x [cm⁴] A [cm²]	I _y [cm⁴] A _y [cm²]	I _z [cm⁴] A _z [cm²]	Axes princip. α [°]	Rotation α' [°]	Dimensions totales [mm] Largeur b Hauteur h
1	SHAPE-THIN CS200602 1	7.67	425.50	2.88	0.00	0.00	60.0 200.0

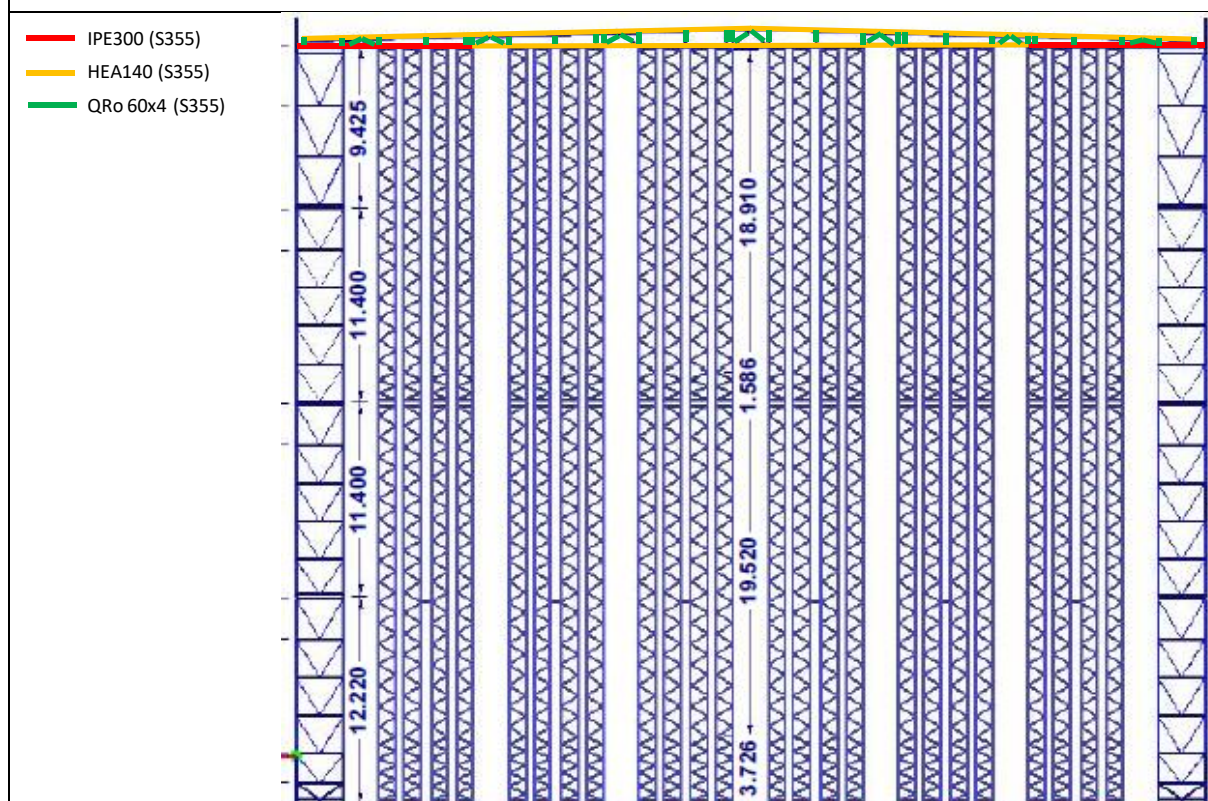
Figure 7 : Matériaux et dimensions d'une section de lisse (plan de coupe longitudinal)

La position de ces différents profilés sur le motif structural d'étude est présentée sur la Figure 8. Ces schémas n'intègrent pas les modifications issues des modélisations de la présente étude.





Echelles intérieures



Toiture

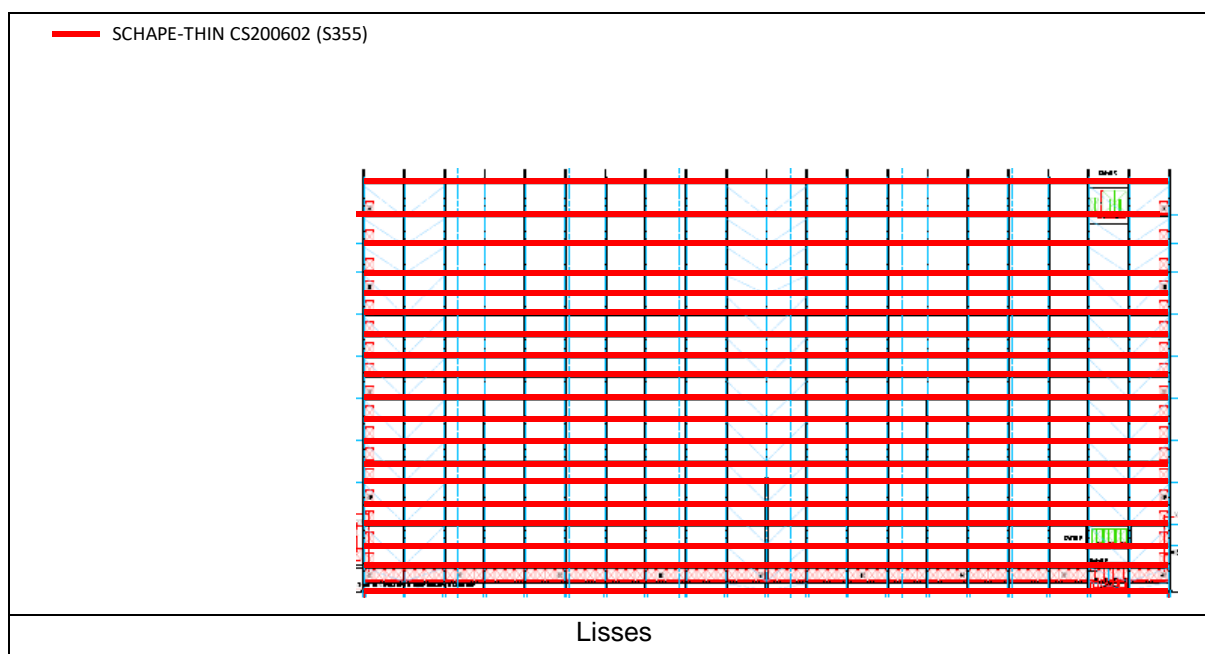


Figure 8 : Position des profilés

2.4.3. Fondations

La structure métallique en racks est ancrée dans la dalle. Les boîtes d'ancrage sont représentées sur le schéma de la Figure 9.



Figure 9 : Boîtes d'ancrage

Au regard de ces éléments, la conditions limite au sol des poteaux est une condition de type encastrement.

2.4.4. Chargement structurel

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 :

$$1,0 G + 0,9 Q + 0,2 W$$

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

2.4.4.1. Charges climatiques

Les effets de la neige et du vent sont pris en compte dans cette étude. Un poids de neige correspondant à 36 kg/m^2 est appliqué sur la structure, hypothèse commune avec la société SCHAEFER en charge du dimensionnement statique des racks. 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, les bâtiments étudiés se situant en zone climatique 3 et en terrain de catégorie III-a, hypothèses communes avec la société SCHAEFER. La pression dynamique appliquée sera alors de 1210 N/m^2 , hypothèse commune avec le dimensionnement statique de SCHAEFER.

La direction de vent retenue est la direction longitudinale par rapport au bâtiment, car il s'agit d'une configuration favorisant la ruine vers l'extérieur.

2.4.4.2. Charges d'exploitation

Dans le cas présent, les charges d'exploitation sont liées à la présence de palettes. La masse de chaque palette est de 640 kg , masse maximale d'une palette au cours de l'exploitation. Toutes les alvéoles de stockage des racks sont considérées occupées par ces palettes. Dans le sens longitudinal, jusqu'à 4 palettes peuvent occuper ces alvéoles.

2.4.4.3. Charges permanentes

Les charges permanentes sont :

- la masse propre des éléments de structure, fonction de leur typologie et de la masse volumique de l'acier (7800 kg/m^3) ;
- la masse de la toiture : étanchéité, isolant, chevrons, bac acier ;
- la masse des éléments des façades (panneaux sandwich) ;

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

La masse surfacique de la toiture est 30 kg/m^2 et celles des panneaux sandwich en façade est de 25 kg/m^2 .

3. MESURES DE SECURITE MISES EN PLACE CONTRE LE RISQUE INCENDIE ET EVACUATION DES OPERATEURS EN CHARGE DE LA MAINTENANCE

Ce chapitre décrit les mesures de protection mise en place ainsi que le système de détection incendie. Ce dernier est un élément essentiel de la sécurité pour les personnes, il s'agit en effet du déclencheur de l'évacuation.

3.1. Sprinklage

Afin de lutter efficacement contre un départ de feu, les rayonnages des palettiers sont sprinklés par nappes intermédiaires distantes, entre elles, de moins de 12 mètres (3 nappes intermédiaires prévues) suivant les spécifications de la note technique FM 08_09 de Juillet 2019, avec un sprinklage de type ESFR FM à déclenchement des têtes à 70 °C dans le stockage. En toiture, le déclenchement des têtes ESFR se produit également à 70 °C. L'agent extincteur utilisé est de l'eau.

3.2. Moyens de détection

L'alarme incendie est déclenchée suite à la rupture des fusibles des têtes de sprinkler avec report d'alarme vers les bureaux et le local gardien. En situation d'opérations de maintenance, l'INERIS préconise l'utilisation de détecteurs portatifs de CO par le binôme en intervention. Alternativement, un système de détection fixe (optique, ponctuel/linéaire, par aspiration de fumées) indépendant du sprinkler pourra être mis en place.

3.3. Intervention des secours externes

La détection d'un départ de feu renvoie une alarme reliée au poste de garde. Celui-ci alerte ensuite le responsable de la plateforme, qui effectuera le lien direct entre le site et le centre de secours le plus proche, permettant l'intervention des services de secours en cas de départ de feu.

3.4. Evacuation des opérateurs en situation de maintenance

Le système de stockage dans les cellules EGHA est entièrement automatisé, il n'y a pas de postes de travail. La seule présence humaine dans la zone est liée aux opérations de maintenance réalisées par du personnel compétent et qualifié.

Les interventions de maintenance s'effectuent en binômes qui seront en contact visuel et/ou communication, aucun cheminement transversal entre allées n'est possible. En cas d'intervention, le transstockeur de l'allée concernée ainsi que les convoyeurs sont immobilisés. Il est à noter que le site est gardienné en permanence, 7 jours sur 7 et 24h sur 24.

L'évacuation peut se décomposer en différentes phases représentées sur le diagramme de la Figure 10.

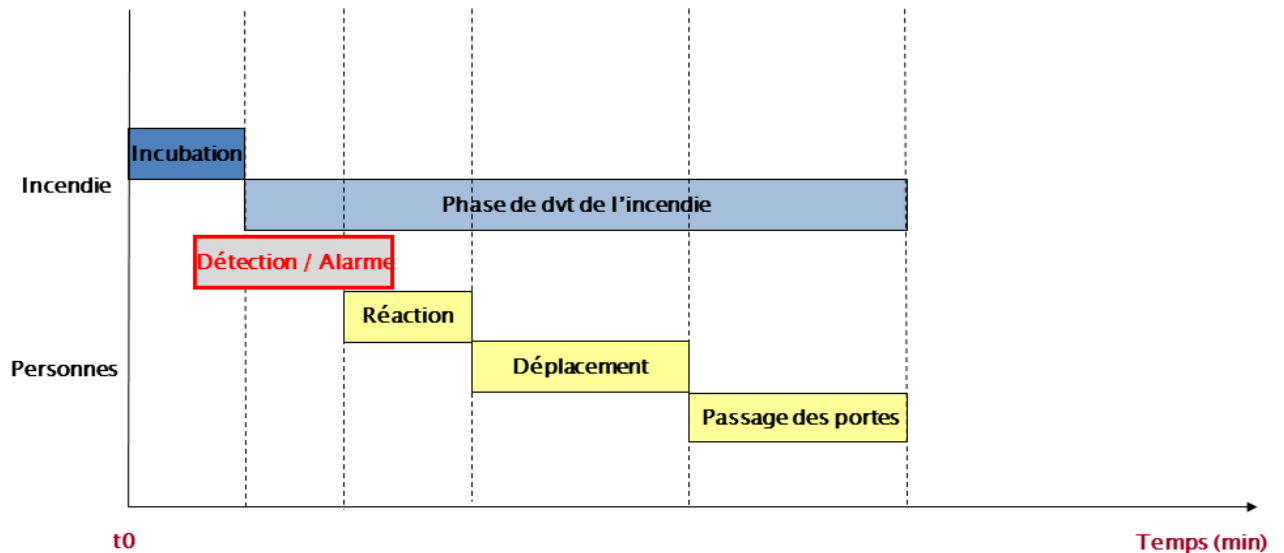


Figure 10 : Décomposition du temps d'évacuation en fonction du développement de l'incendie.

La Figure 11 montre les distances au sol à parcourir dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire pour un départ de feu bloquant l'accès à l'issue de secours la plus proche. La position des issues de secours y est également représentée.

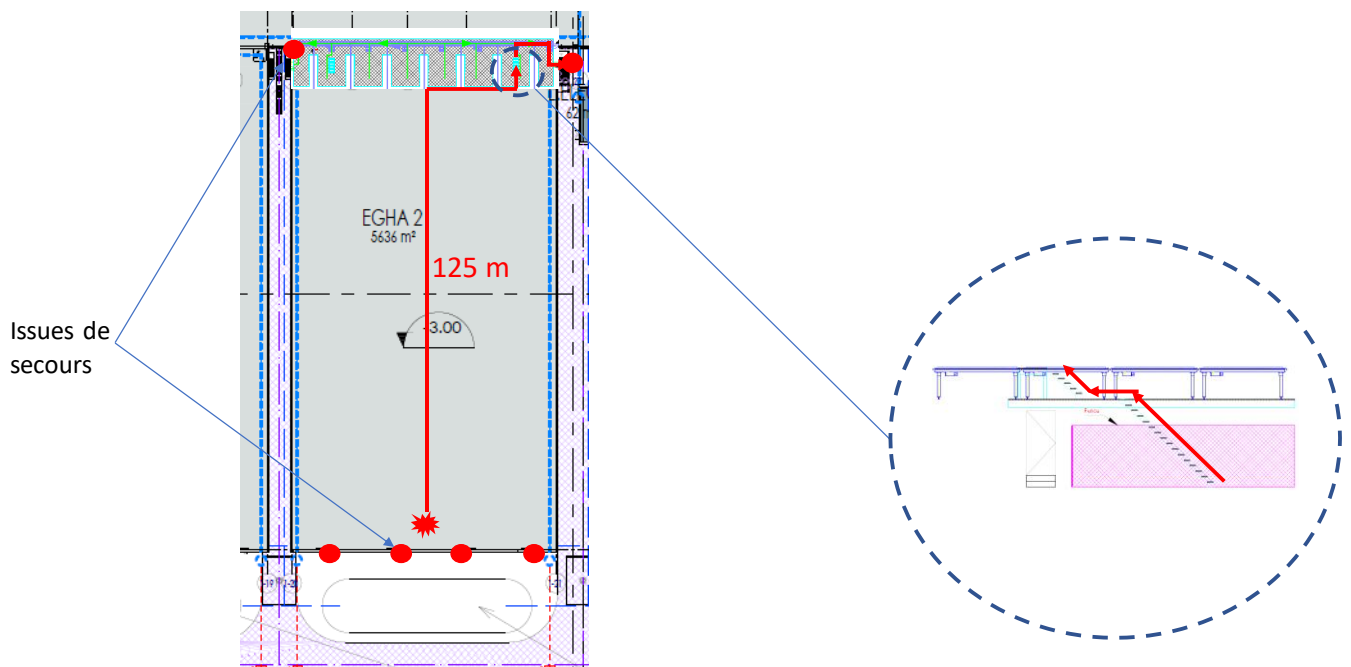


Figure 11 : Emplacement des issues de secours et parcours maximal d'évacuation

Le bâtiment étant décaissé de 3 m par rapport au niveau du sol, l'évacuation impliquera de remonter sur mezzanine pour atteindre les issues, comme le montre la Figure 11.

Les distances les plus importantes à parcourir sont de l'ordre de 125 m en considérant le cas du départ d'incendie particulièrement défavorable car obstruant un côté pour l'évacuation. Il convient de rappeler qu'aucun poste de travail permanent n'est présent dans cette cellule et que la seule présence de personnel est liée aux opérations de maintenance. Comme décrit plus haut, l'INERIS préconise

l'utilisation de détecteurs portatifs de CO par les opérateurs en charge de la maintenance ou, alternativement, un système de détection fixe (optique, ponctuel/linéaire, par aspiration de fumées) indépendant du sprinkler.

L'opérateur peut être amené à monter sur une échelle afin d'atteindre les niveaux en hauteur, la hauteur maximale sera considérée égale à 41 m.

Le temps total nécessaire à l'évacuation de cette personne serait ainsi de 6 min 30 s, en l'absence de fumées. L'absence de fumées pendant cette durée sera vérifié au chapitre 1. Le temps d'évacuation est décomposé comme suit :

- un temps de détection de deux minutes ;
- un temps de réaction d'une minute ;
- une vitesse de descente d'échelle de 0,5 m/s ;
- une vitesse d'évacuation de 1 m/s au sol si la visibilité est optimale, 0,5 m/s si le déplacement a lieu dans des conditions de visibilité réduites ;
- un temps de franchissement des portes de 0,8 personne/s/porte.

Le Tableau 1 présente les temps nécessaires pour chaque étape de l'évacuation.

Action	Durée (s)		Remarques	
T0 : Départ de feu	-			
Détection	120		Détection sprinkler et opérateurs munis de détecteurs portatif de CO	
Réaction	60		Temps de réaction des personnes	
Descente d'échelle	82		La vitesse de descente d'une échelle est estimée à 0,5 m/s et la hauteur d'une échelle à 41 m	
Déplacement	125	250	Si la visibilité le permet, la vitesse de déplacement est de 1 m/s	Si la visibilité ne le permet pas, la vitesse de déplacement est 0,5 m/s
Franchissement des portes et passage dans les cellules adjacentes	3		0,8 personne/s/porte	
TOTAL	390 s, soit 6 min 30 s	515 s soit 8 min 35 s		

Tableau 1 : Temps d'évacuation nécessaire

4. CHOIX DES SCENARIOS A MODELISER

Les scénarios ont été choisis afin de rendre compte des situations pénalisantes rencontrées vis-à-vis des problématiques de désenfumage et de tenue des structures porteuses. Pour chacun de ces scénarios, le départ de feu a lieu au niveau du sol, favorisant la propagation verticale du feu par « effet cheminée », et le sprinkler est supposé défaillant.

4.1. Scénarios permettant d'étudier le désenfumage

Un unique scénario de désenfumage suffit ici, il s'agit d'un départ de feu au centre de la cellule EGHA. Il correspond au développement de feu le plus rapide. Il est important de rappeler qu'aucune personne n'est présente dans la cellule en fonctionnement normal.

4.2. Scenarios permettant d'étudier l'effondrement de la structure

Deux scénarios de départ de feu doivent être étudiés pour évaluer la ruine de la structure. Le premier est un départ de feu au centre du stockage afin de favoriser la propagation du feu. Le second est un départ de feu près d'une paroi latérale, cette position peut entraîner une accumulation de gaz chauds au niveau de l'échelle périphérique et entraîner potentiellement une ruine vers l'extérieur. Les positions des départs de feu pour ces deux scénarios sont indiquées sur la Figure 12. Dans la suite, le scénario de départ de feu en milieu de cellule est appelé le scénario S1 et le scénario de départ de feu en bord de cellule est appelé S2. Le scénario S1 est identique au scénario considéré pour le volet désenfumage.

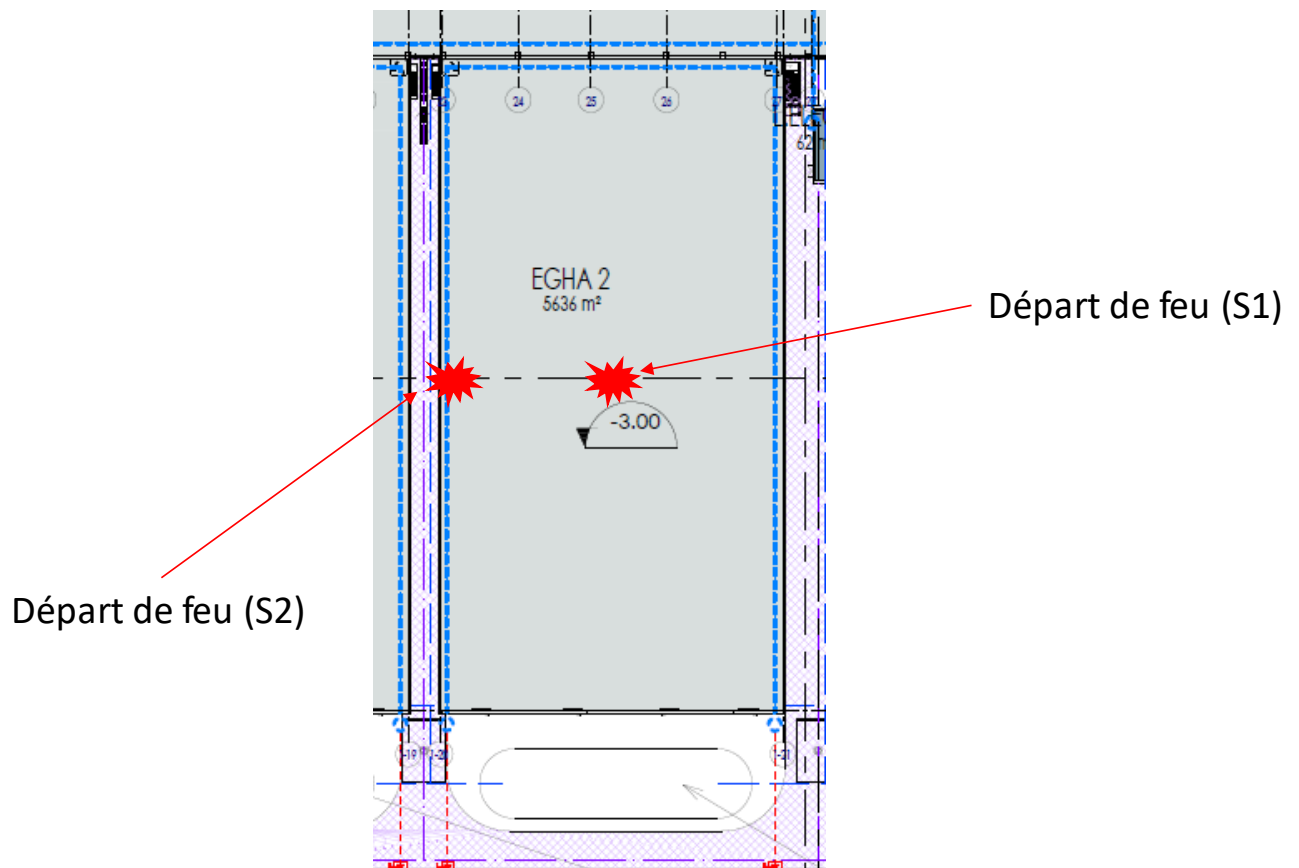


Figure 12 : Position des départs de feu pour les scénarios S1 et S2

5. HYPOTHESES DE MODELISATION DU DEVELOPEMENT DE L'INCENDIE

Dans ce chapitre, les différentes hypothèses de modélisations régissant la cinétique de l'incendie de la cellule EGHA sont présentées, notamment sur la configuration du stockage et sur le choix des combustibles.

Le logiciel utilisé pour calculer la propagation du feu et des fumées 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.

5.1. Géométrie de la cellule modélisée

La Figure 13 présente la géométrie en 3D telle que modélisée sous le logiciel FDS.

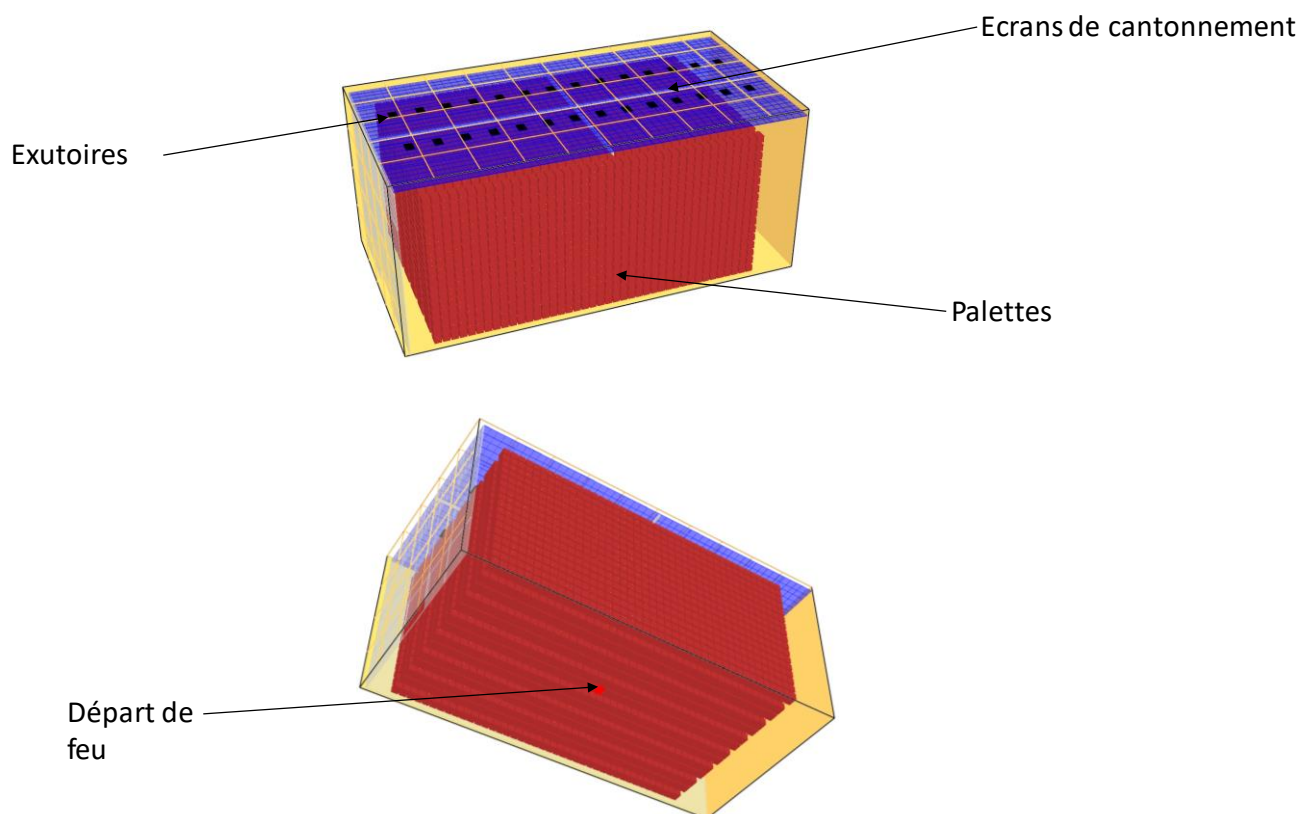


Figure 13 : Géométrie modélisée sous le logiciel FDS, position de l'incendie correspondant au scénario S1.

La taille de maille retenue pour les simulations numériques est de 0,3 m, soit un maillage comportant au total 9 828 000 mailles.

5.2. Hypothèses relatives au combustible

5.2.1. Température de propagation et taux de suie

Comme mentionné en introduction, les produits stockés appartiennent majoritairement à la rubrique 1510. La température de propagation de l'incendie est prise égale à 250°C au regard de la présence de cartons pour le conditionnement. Une attention particulière sera portée à la courbe de puissance calculée par le logiciel FDS afin de s'assurer d'une modélisation physique du développement de l'incendie. De plus, la diversité des produits stockés et notamment la part de plastique parmi ces produits

a conduit à considérer, dans une approche majorante, du polyuréthane pour décrire la réaction globale de combustion et notamment le taux de production de suie qui pilote l'évolution de la visibilité dans la cellule.

5.2.2. Puissance dégagée par les combustibles

Les palettes stockées sur site relèvent de la rubrique ICPE 1510 et mesurent typiquement $1,3 \times 0,9 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}^3$. La puissance associée, en tenant compte d'une proportion de matières classées en rubrique 2662 de 11% en nombre de palettes, et d'après la démarche relevant de la méthode Flumilog [5], est égale à 2287 kW.

Afin de respecter au mieux le nombre total de palettes dans la simulation numérique, l'unité combustible est constituée de 4 palettes fusionnées. Ainsi, dans la simulation, l'unité combustible mesure $2,6 \text{ m} \times 1,8 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$. La puissance associée correspond donc à 4 fois la puissance associée à une seule palette, soit 9148 kW. Compte tenu de la surface d'une unité combustible dans la simulation, le taux de dégagement de chaleur par unité de surface de palette est alors égal à 363 kW/m².

L'évolution dans le temps de la puissance de cette unité combustible est représentée sur la Figure 14.

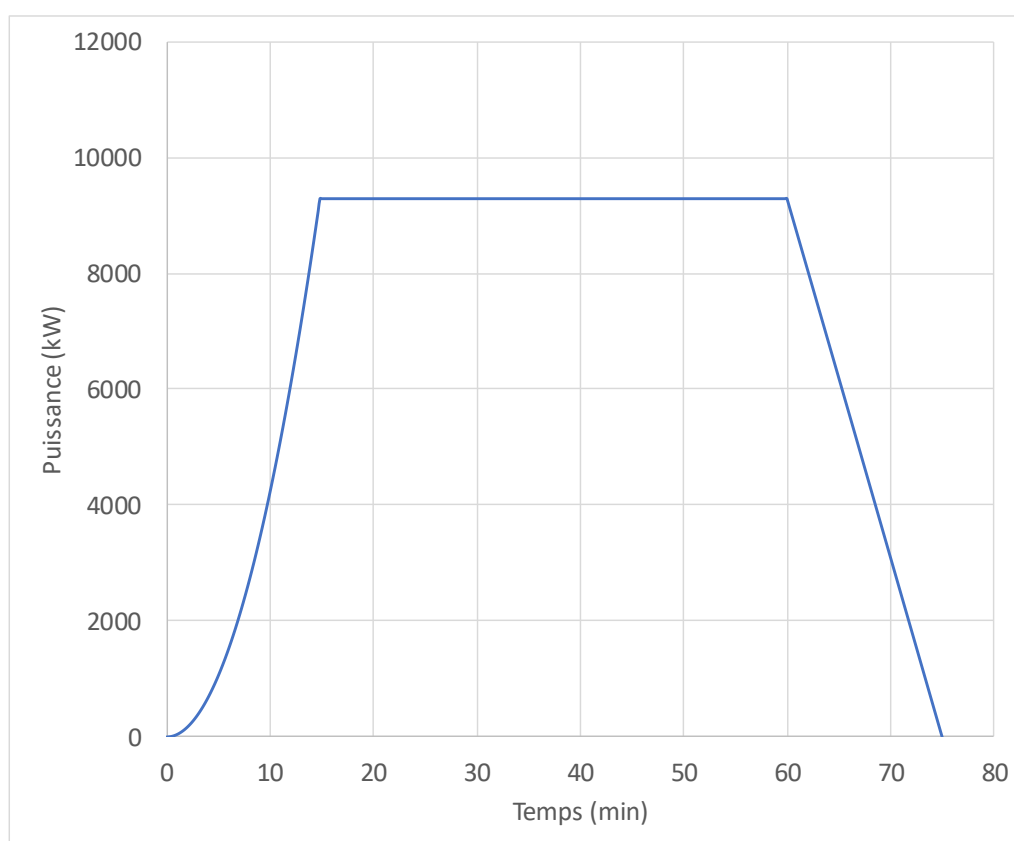


Figure 14 : Evolution temporelle de la puissance de la palette

5.2.3. Toxicité des produits combustibles

L'approche utilisée est celle de la norme ISO 13571 [1] qui permet de distinguer l'effet des gaz irritants et celui des gaz asphyxiants sur la capacité des personnes à évacuer.

5.2.3.1. 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 selon la

norme 13571 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 :

$$FED_{tox} = \sum_{t1}^{t2} \frac{[CO] \times v_{CO_2}}{35\,000} \Delta t + \sum_{t1}^{t2} \frac{([HCN] \times v_{CO_2})^{2.36}}{1.2 \times 10^6} \Delta t$$

Equation 1

$$v_{CO_2} = e^{\frac{[CO_2]}{5}}$$

Avec :

[CO]	=	Concentration moyenne de CO [ppm] sur le temps Δt
[HCN]	=	Concentration moyenne de HCN [ppm] sur le temps Δt
[CO ₂]	=	Concentration moyenne de CO ₂ [ppm] sur le temps Δt
Δt	=	Pas de temps [min]
t1	=	Durée d'exposition de l'individu [min]

Il est à noter que les termes contenant la concentration des gaz dans l'équation 1 sont à multiplier par un facteur v traduisant l'hyperventilation. Celle-ci est principalement la conséquence de la présence du dioxyde de carbone CO₂.

5.2.3.2. Notion de FEC

La concentration effective fractionnelle (FEC) permet d'évaluer les effets des gaz irritants en fonction de leurs concentrations dans les fumées.

$$X_{FEC} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{Seuil_i}$$

Equation 2

Avec :

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

Le Tableau 2 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 [1].

Gaz toxique	Seuil _i [ppm]
HCl	1 000
HBr	1 000
HF	500
SO ₂	150
NO ₂	250

Tableau 2 : Valeurs de seuils pour chaque gaz toxique

5.2.3.3. 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.

5.2.3.4. Feu de produits 1510

Les unités combustibles présentes dans la cellule EGHA ne sont supposées contenir qu'une quantité limitée de produits plastiques, et très peu de produits dont la toxicité est plus importante que celle des produits plastiques. Ainsi, de manière prudente, la toxicité de ces produits sera étudiée en se basant sur des résultats d'essais réalisés à l'INERIS de feu sur fûts contenant un mélange de matières plastiques. La valeur retenue pour X_{FED} et X_{FEC} est de 0,3. Dès lors, en se basant sur les résultats des essais évoqués, il est possible de remonter à une concentration en CO équivalente comme présenté dans le Tableau 3.

	Valeur seuil	Concentration seuil de CO [ppm]
FED	0,3	1 320
FEC	0,3	220

Tableau 3 : 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 CO₂ est prise en compte comme présenté au paragraphe 5.2.3.1.

Concernant les conditions toxiques, 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 3 donc la plus rapidement atteinte.

5.2.4. Notion de visibilité

L'évaluation de l'opacité des fumées est déterminée à partir de la relation suivante [2] :

$$K = K_m \rho Y_s$$

Avec :

$$K = \text{Coefficients d'extinction [m}^{-1}\text{]}$$

K_m	=	Coefficient d'extinction massique qui dépend du combustible [m^2/kg]
ρ	=	Masse volumique de la suie [kg/m^3]
Y_s	=	Concentration massique de suie [-]

La valeur de K_m est prise égale à $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ selon les travaux de G.W. Mulholland et C. Croarkin [3] pour la combustion de bois et de plastique.

La distance de visibilité est alors donnée par :

$$D = C/K$$

Dans cette relation, 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 sera pris égal à 3 de manière prudente.

6. MODELISATION DU DEVELOPPEMENT DE L'INCENDIE

Ce chapitre présente les résultats pour les conséquences thermiques, toxiques et de perte de visibilité pour le scénario de désenfumage présenté au chapitre 1. Il est important de rappeler qu'aucune personne n'est présente en fonctionnement normal dans la cellule EGHA. Les conditions thermiques, toxiques et de visibilité sont toutefois examinées à hauteur d'homme afin de prévoir les conditions d'intervention pour les services de secours mais également à la hauteur de 41 m correspondant à une hauteur maximale de travail pour les opérateurs en situation de maintenance.

6.1. Critères de tenabilité

6.1.1. Critères de tenabilité pour la sécurité des opérateurs en situation de maintenance

Afin d'assurer la sécurité de l'opérateur en phase de maintenance, trois critères doivent respectés :

- le temps au bout duquel la température à hauteur d'homme atteint 40 °C, température considérée comme la température limite ;
- le critère de visibilité avec une valeur limite de 10 m pour permettre l'évacuation des personnes à une vitesse de 1 m/s ;
- le critère de toxicité tel que décrit au paragraphe 5.2.3.

6.1.2. Critères de tenabilité pour la sécurité des intervenants

Afin d'évaluer la possibilité d'intervention pour les services de secours, deux temps caractéristiques sont étudiés :

- le temps au bout duquel la température à hauteur d'homme atteint 100 °C, température considérée comme la température limite d'utilisation des ARI (Appareil Respiratoire Isolant) ;
- le temps au bout duquel la température des couches chaudes, située en partie haute du bâtiment, atteint 500 °C car à partir de cette température, un flashover est susceptible de se produire.

Dans la suite de ce chapitre, chacun des critères mentionnés ci-dessus est examiné pour le scénario de désenfumage retenu au chapitre 1, c'est-à-dire le départ de feu au centre de la cellule.

6.2. Calcul du scénario de départ de feu au centre de la cellule

Ce paragraphe présente le développement du feu pour un départ de feu au centre de la cellule EGHA. La montée en puissance de l'incendie avec départ de feu au centre de la cellule est présentée sur la Figure 15.

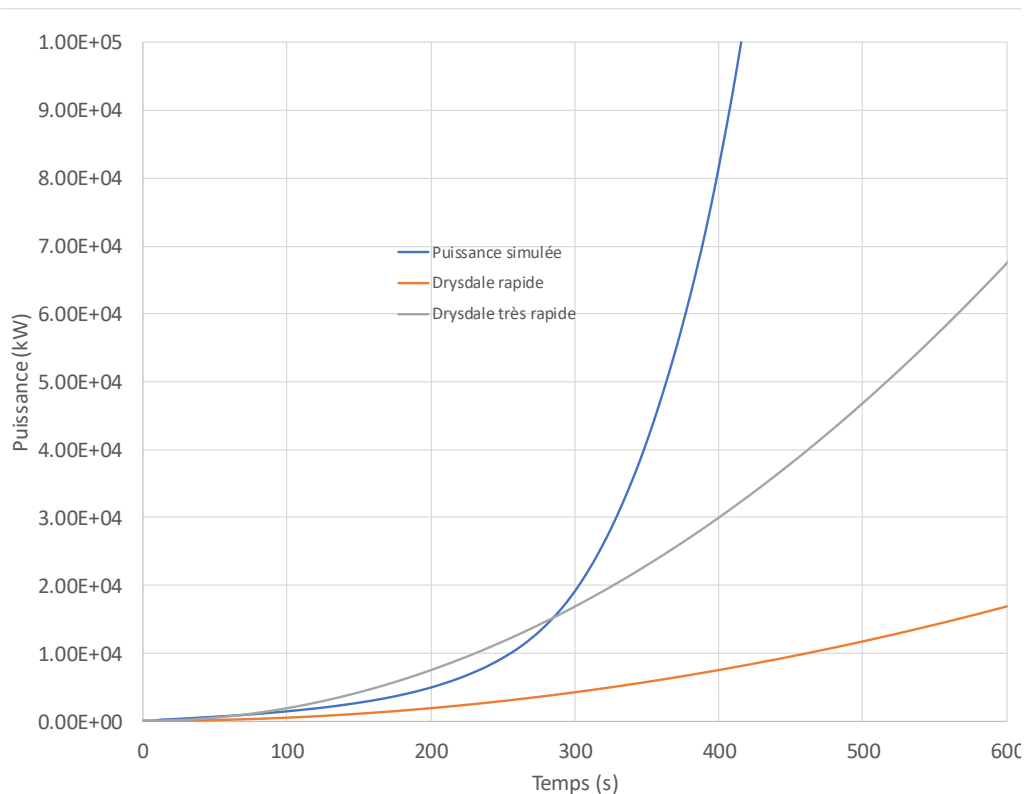
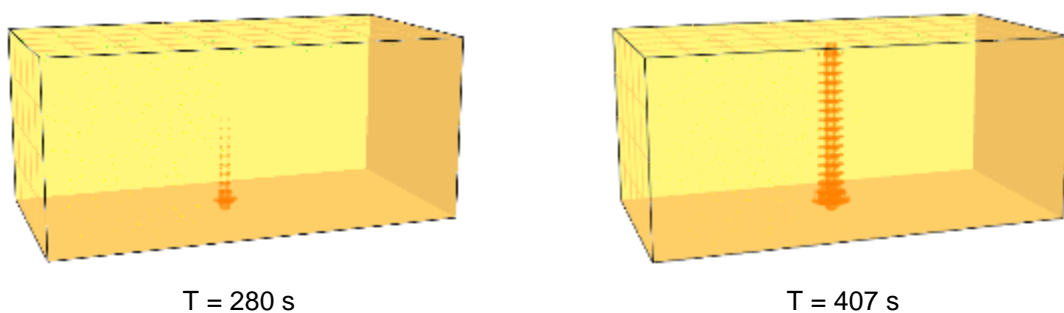


Figure 15 : Puissance du feu dans la cellule EGHA

Cette courbe montre l'augmentation de la puissance au cours du calcul en comparaison aux cinétiques d'incendie décrites par Drysdale [4]. La transition vers une cinétique très rapide est pilotée par la propagation de proche en proche, transition permettant de vérifier la pertinence du critère retenu pour la propagation entre palette. La disposition et l'aération des racks grande hauteur favorise en effet une montée en puissance très rapide de l'incendie 5 minutes environ après le départ de feu. Cette évolution est physiquement logique dans la mesure où les corrélations proposées par Drysdale [4] ont été établies pour des hauteurs de stockage de moins de 10 m.

6.2.1. Propagation du feu dans le stockage

La Figure 16 présente une vue 3D l'évolution de l'incendie à l'intérieur des racks. La grandeur représentée est la zone où le taux de dégagement de chaleur par unité de volume d'une valeur supérieure à 50 kW/m^3 , valeur représentative de la zone de présence des flammes.



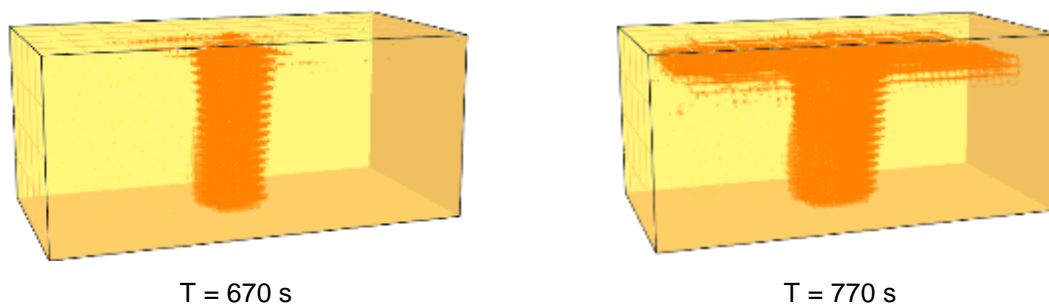


Figure 16 : Evolution de l'incendie à l'intérieur du stockage

La Figure 16 illustre le dégagement de chaleur sur l'axe vertical par « effet cheminée » caractéristique des feux de stockage en racks, puis l'ouverture du feu sous forme de « V » sur la partie supérieure des racks.

6.2.2. Conditions de visibilité

La Figure 17 présente l'échelle de visibilité considérée, elle s'étend de 0 m à 10 m. Cette échelle est volontairement bornée, la valeur maximale calculée par le logiciel étant supérieure, de l'ordre de 30 m.



Figure 17 : Echelle de visibilité (m)

La Figure 18 présente l'évolution dans le temps de la visibilité à hauteur d'homme.

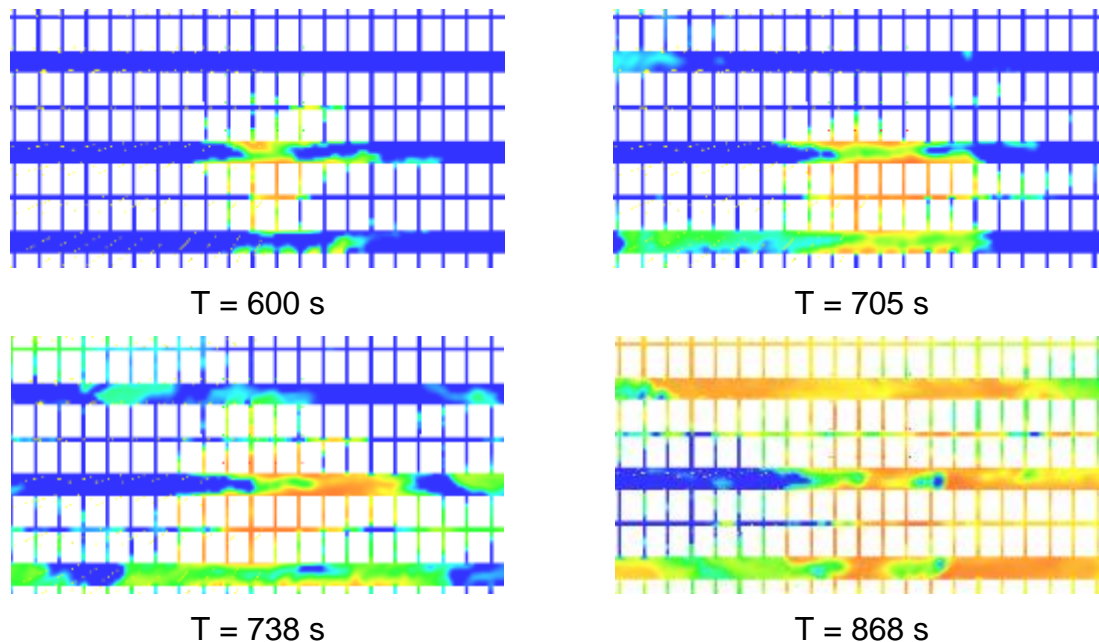


Figure 18 : Evolution de la visibilité au cours du temps à hauteur d'homme

Comme constaté sur la Figure 18, la visibilité diminue significativement, au niveau du sol, 12 minutes après le départ de feu. Ce temps est à comparer aux 6 minutes 30 s nécessaires à l'évacuation des opérateurs en situation de maintenance calculées au paragraphe 3.4 : la visibilité au niveau du sol restera donc supérieure à 10 m pendant toute la durée de l'évacuation. Il reste donc à présent à

s'assurer que cette visibilité reste bien supérieure à 10 m également au niveau de la mezzanine servant à atteindre les issues de secours.

L'évolution de la distance de visibilité sur un plan vertical est reproduite sur la Figure 19, cette représentation permet d'appréhender la chute de visibilité pendant la phase de descente d'une personne sur l'échelle et l'évacuation au niveau de la mezzanine, 3 m au-dessus du niveau 0 de la cellule. Ce temps est à comparer aux 262 s nécessaires à la personne pour descendre de l'échelle calculées au paragraphe 3.4. La visibilité en hauteur restera supérieure à 5 m pendant toute la durée de la descente de l'échelle.

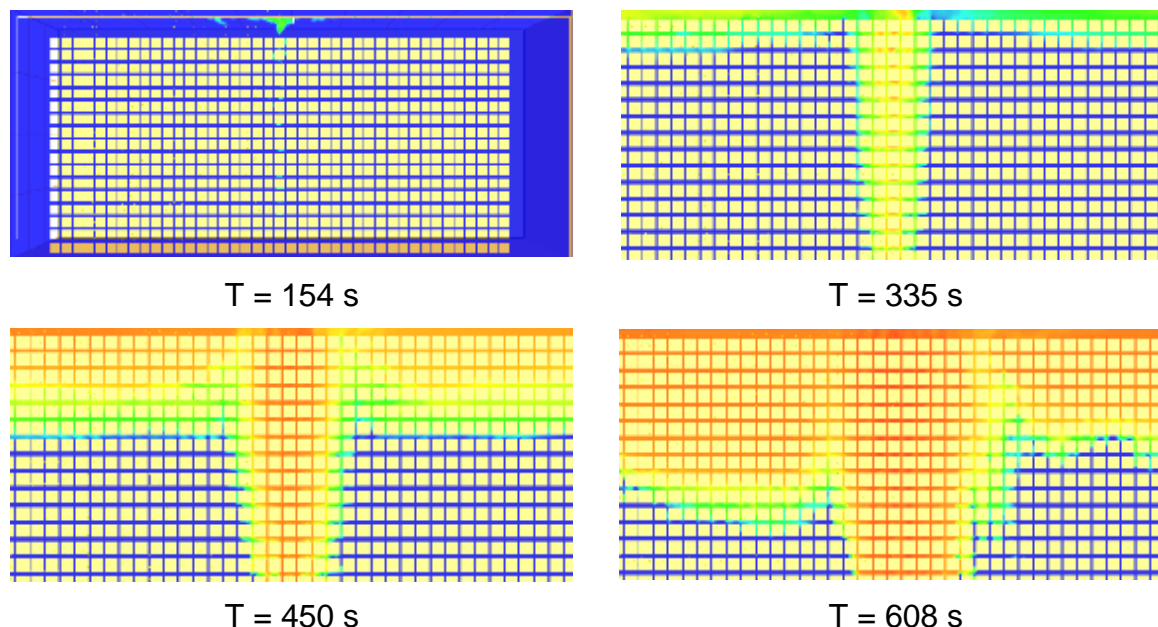


Figure 19 : Evolution de la visibilité au cours du temps sur un plan vertical.

La visibilité au niveau de la mezzanine reste bien supérieure à 10 m jusqu'à la fin de l'évacuation. Le temps disponible pour l'évacuation peut donc être calculé sur la base d'une vitesse de déplacement horizontal de 1 m/s. Le temps retenu pour l'évacuation sera donc bien de 6 min 30 s, comme explicité au paragraphe 3.4.

6.2.3. Conditions de température

6.2.3.1. Occurrence du phénomène de flashover

Sur la Figure 21, la température est tracée à l'altitude $z = 29$ m qui correspond à la plus haute partie du stockage. La température d'occurrence du phénomène de flashover est considérée égale à 500 °C. Ce sera donc la température maximale considérée, comme constaté sur la Figure 20.



Figure 20 : Echelle de température

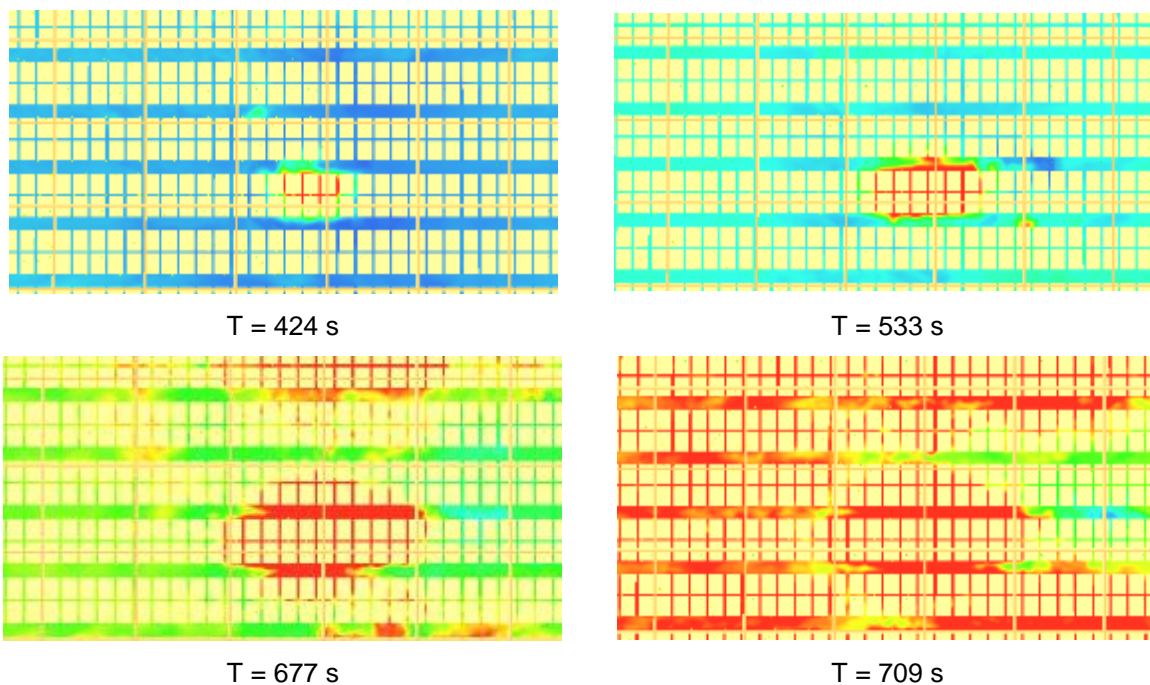


Figure 21 : Evolution de la température dans un plan de coupe horizontal à l'altitude $z=29$ m

La Figure 22 illustre l'évolution de la température dans un plan de coupe latéral situé au milieu de la cellule. Cette figure met en évidence les retombées latérales de fumées chaudes.

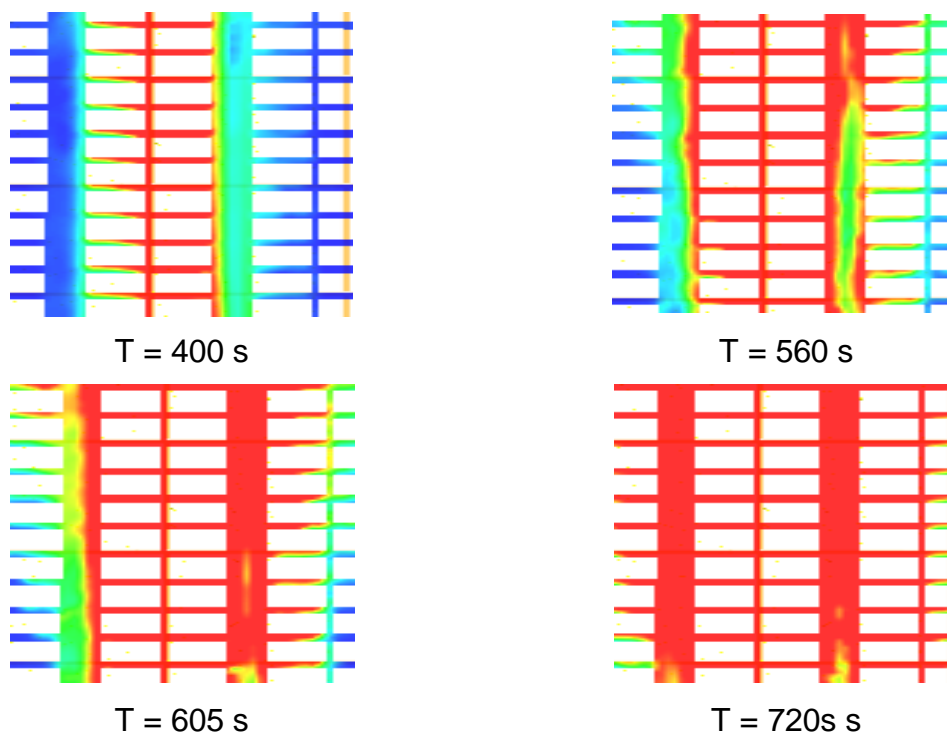


Figure 22 : Evolution de la température dans un plan de coupe latéral à l'abscisse $x=85$ m

La Figure 21 et la Figure 22 montrent que les fumées chaudes gagnent toute la largeur de la cellule entre la 11^e et la 12^e minute. Le flashover risque donc de se produire dans ce laps de temps. De manière prudente, le temps d'occurrence du flashover sera considéré égal à 11 minutes.

6.2.3.2. Température à hauteur d'homme

La température limite avant que les conditions de tenabilité soient compromises est prise égale à 40 °C, l'échelle de température a donc été bornée à cette valeur, Figure 23. La Figure 24 présente l'évolution de la température à hauteur d'homme, à l'altitude $z = 1,80$ m.



Figure 23 : Echelle de température

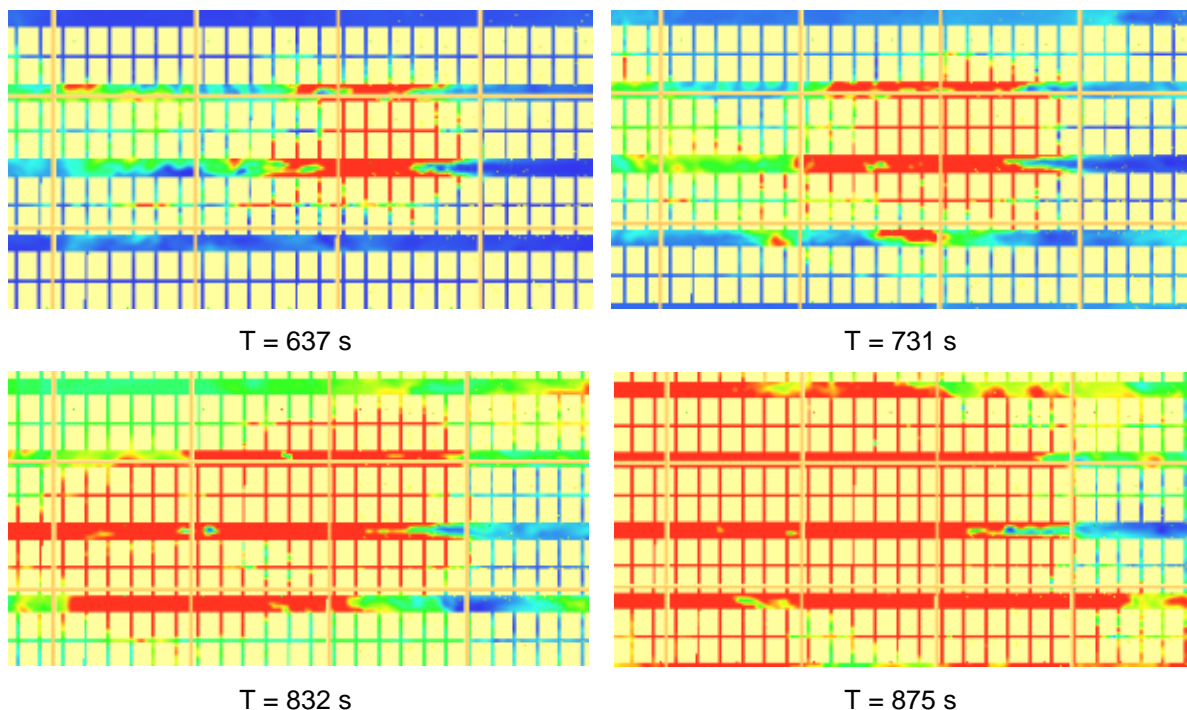


Figure 24 : Evolution de la température à hauteur d'homme

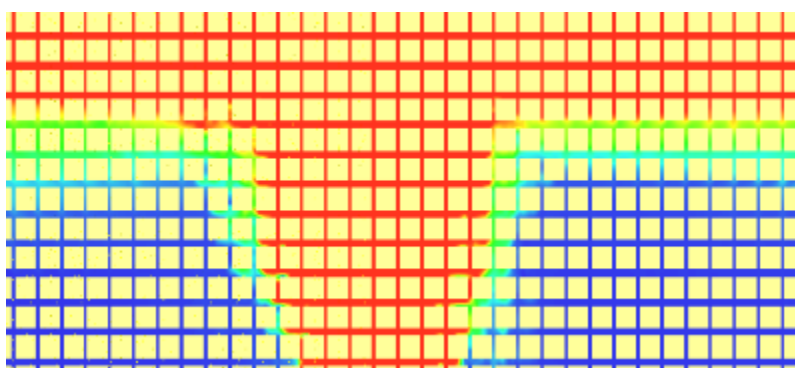


Figure 25 : Coupe verticale de toxicité à 8 min

Le déploiement du feu est tel que les températures deviennent supérieures, à hauteur d'homme, à 40°C sur une portion significative de la cellule entre la 14^e et la 15^e minute, soit bien après la fin de l'évacuation, et supérieures à 100°C, température limite d'utilisation des ARI, à un temps supérieur. Le flashover risque de se produire antérieurement, comme expliqué au paragraphe précédent. Une

attention particulière est donc à porter en cas d'intervention des services de secours dans le bâtiment, fortement déconseillée par ailleurs au vu des temps disponibles. Concernant la température à hauteur de mezzanine, celle-ci reste inférieure à 40 °C pendant un temps bien supérieur au temps d'évacuation des personnes comme constaté sur la Figure 25.

6.2.4. Conditions de toxicité

L'échelle de toxicité considérée s'étend de 0 à 220 ppm et est présentée sur la Figure 26. Il est rappelé ici que la valeur de la borne supérieure de cette échelle correspond à la valeur seuil déterminée au paragraphe 5.2.3.4.



Figure 26 : Echelle de toxicité considérée (ppm)

L'évolution de la toxicité à hauteur d'homme est présentée sur la Figure 27.

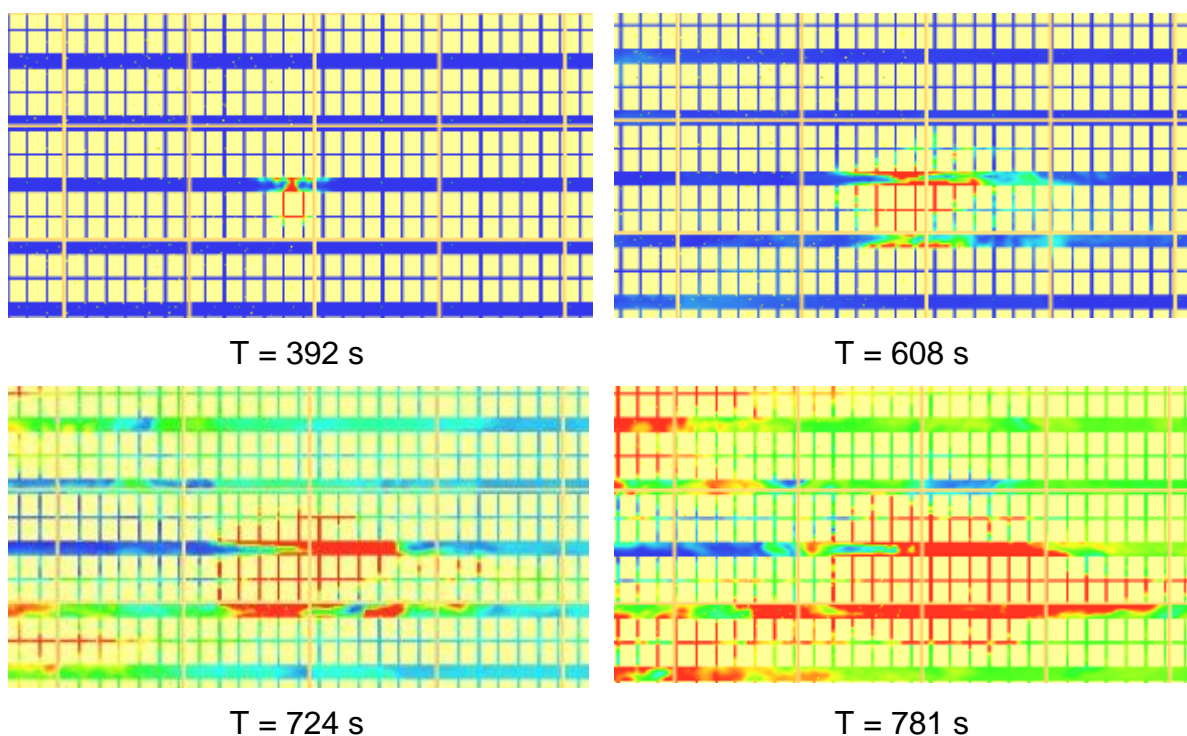


Figure 27 : Evolution de la toxicité à hauteur d'homme

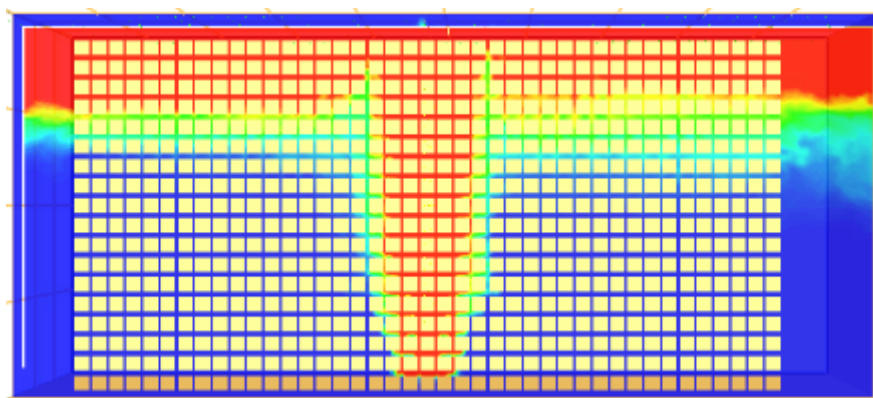


Figure 28 : Coupe verticale de toxicité à 6 min 30 s

La Figure 27 montre que la toxicité devient supérieure à la valeur seuil à hauteur d'homme entre la 12^e minute et la 13^e minute, soit, de nouveau, bien après la fin de l'évacuation. A noter qu'au niveau de la mezzanine, la conclusion est identique, comme le montre la Figure 28 qui représente une coupe verticale de concentration en CO à 6 min 30 s : les personnes ne sont pas inquiétées à hauteur de mezzanine.

6.3. Synthèse des résultats de calcul de développement d'incendie

Le facteur limitant pour l'évacuation des personnes est le déclenchement du flashover à partir de la 11^e minute. Ce temps est à comparer au temps d'évacuation d'un opérateur en phase de maintenance.

Le Tableau 4 présente un résumé des résultats obtenus dans ce chapitre.

Critère étudié	Température à hauteur d'homme	Toxicité à hauteur d'homme	Visibilité à hauteur d'homme	Flashover
Temps calculé	14 min	12 min	12 min	11 min

Tableau 4 : Temps calculé pour chaque critère en cas de départ de feu au centre de la cellule EGHA

Le temps nécessaire pour l'évacuation d'un opérateur en situation de maintenance est évalué à 6 minutes 30 s, temps estimé en considérant le temps nécessaire à la descente des échelles pour les personnes présentes en hauteur lors du départ de feu et sans réduction de visibilité du fait des fumées. Les temps disponibles calculés dans le présent chapitre sont donc compatibles avec l'évacuation.

Concernant l'intervention des services de secours, il est important de noter que la température à hauteur d'homme atteint 100°C sur une portion significative de la cellule après un temps supérieur à 14 minutes. Le phénomène de flashover peut se produire antérieurement, 11 minutes environ après le départ de feu.

7. MODELISATION DE LA REPONSE DE LA STRUCTURE A L'INCENDIE

Ce chapitre présente la réponse de la structure à l'incendie. Plus précisément, il s'agit de s'assurer que, au cours de la ruine des racks métalliques autoportants des cellules EGHA, aucune ruine vers l'extérieur ni ruine en chaîne n'est à prévoir. La ruine devra ainsi être dirigée vers l'intérieur du bâtiment et la flèche maximale des éléments structurel métalliques périphériques ne devra pas dépasser la distance minimale entre bâtiments EGHA (moins l'épaisseur des panneaux sandwich), soit environ 4m.

7.1. Modèle d'échauffement des structures métalliques

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 sur la base des résultats obtenus avec l'outil FDS. Ce point a fait l'objet du chapitre 1. Ensuite, l'échauffement des différents éléments de la structure de stockage est calculé en tenant compte des phénomènes de convection et de rayonnement.

7.2. Présentation de la structure modélisée et des scénarios d'incendie

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 résultant des charges appliquées.

Lors de l'incendie, les éléments constituant la structure de stockage sont soumis à un phénomène de dilatation sous l'effet de la chaleur. Ce phénomène génère des niveaux de contraintes de compression importants.

La configuration géométrique des bâtiments de type transstockeur présente un axe de faiblesse structurelle privilégié dans la direction transversale, comme constaté par l'INERIS sur des motifs similaires modélisés en 3D par le passé.

Ceci peut notamment s'expliquer par le fait que la structure peut être considérée comme une section transversale répétée un grand nombre de fois dans la direction longitudinale, c'est-à-dire dans la longueur du bâtiment. Dans cette direction longitudinale, les sections sont tenues entre elles par une multitude de lisses de sorte que, à partir de la zone de départ de feu, les efforts de dilatation ne sont pas transmis suffisamment loin pour entraîner un effondrement du bâtiment dans la direction longitudinale. Dans la direction transversale, en revanche, seule une poutre lie les montants en tête. Ce faisant, la ruine s'effectue préférentiellement dans la direction transversale.

Dans la présente étude, les deux types suivants de modélisations suivants sont étudiés :

- un premier calcul sur un motif 2D constitué d'un unique portique transversal ; Ceci permet d'évaluer le sens de ruine et une estimation du temps de ruine de la structure.
- un motif 3D comprenant un quart de bâtiment comme présenté sur la Figure 29 permettant le cas échéant d'affiner le début de ruine et d'apprécier la dynamique de propagation de la ruine entre portique avec la prise en compte des éléments structuraux secondaires (de type lisse notamment), ce qui ne peut être réalisé sur un calcul avec un motif 2D au regard des hypothèses associées.

Il est à noter cependant que le temps de modélisation et de calcul sur la base d'un motif en 3D est considérablement plus élevé. Aussi, cette modélisation n'est pas systématiquement mise en œuvre, en particulier pour quantifier le sens de ruine, pour lequel un calcul 2D suffit.

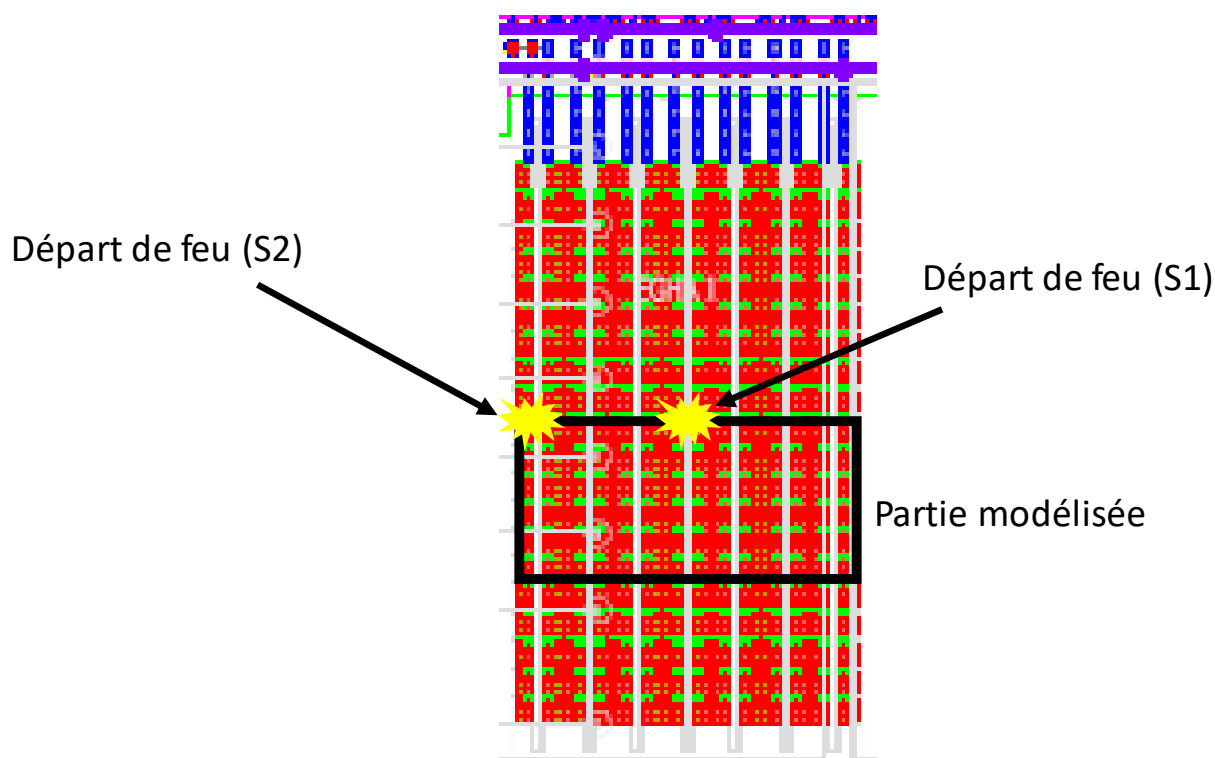


Figure 29 : Position du motif 3D modélisé et des départs de feu

L'enjeu principal de cette analyse thermomécanique sera de s'assurer de l'absence de ruine en chaîne et de ruine vers l'extérieur de la structure métallique autoportante en racks. 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 ainsi 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.

Pour prendre en compte le développement du feu et son impact sur la structure, les conditions de température issues du calcul FDS ont été appliquées sur chacun des éléments de structure. Le calcul a été réalisé au moyen du logiciel LSDyna. Il s'agit d'un progiciel de calcul aux éléments finis de dynamique transitoire développé par Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Son solveur explicite permet 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>)

Les conditions aux limites pour les calculs sont des encastremements au sol et, pour les calculs 3D, une condition de symétrie en bord du motif. On rappelle à ce titre que la direction de ruine principale à étudier est la direction transversale.

7.3. Résultats des calculs d'effondrement

7.3.1. Départ de feu au centre (scénario S1)

7.3.1.1. Calcul 2D

La Figure 30 présente l'évolution dans le temps de la ruine pour un départ de feu au centre de la cellule et un motif structural en 2D.

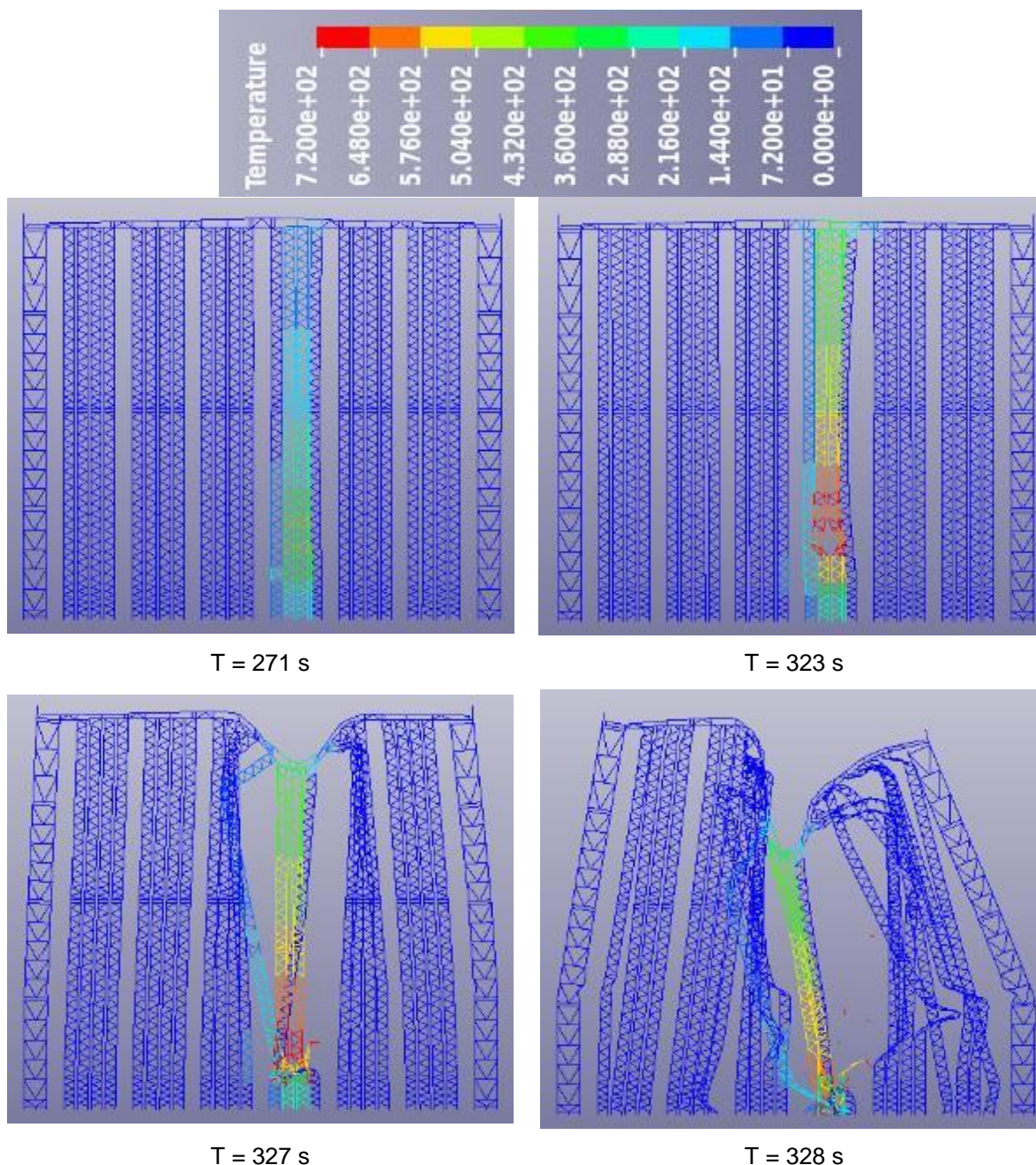


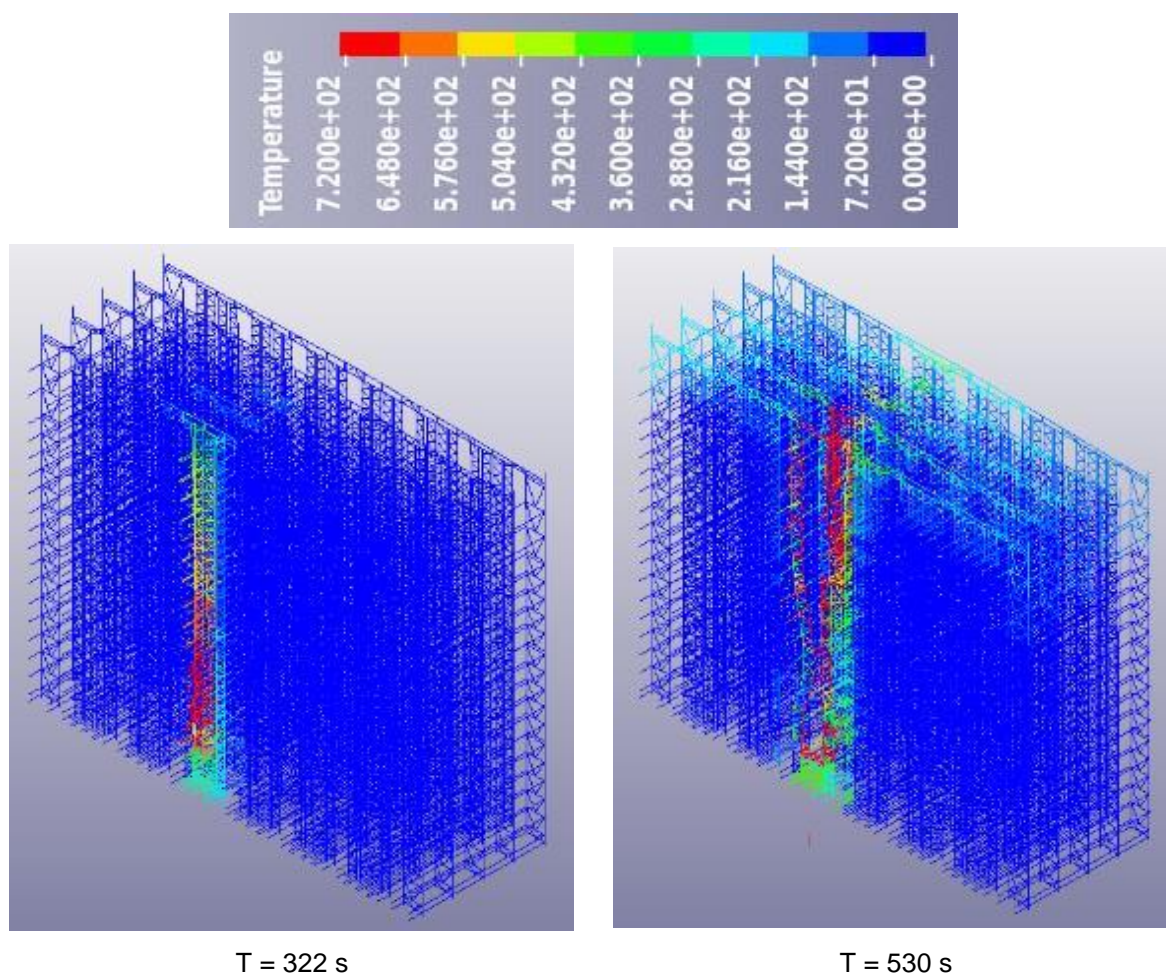
Figure 30 : Effondrement structurel du motif 2D pour un départ de feu au centre de la cellule

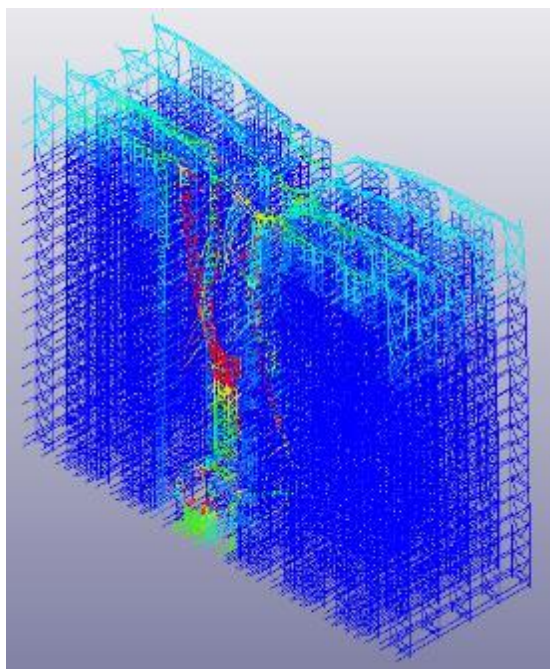
Comme présenté sur la Figure 30, après 5 min 20 s, le portique ruine complètement en 10 s. Il s'avère que ce temps est inférieur au temps d'évacuation du personnel.

Aussi, un calcul 3D, prenant en compte un motif correspondant à un quart de la structure pour des raisons de modélisation (voir paragraphe 7.2), est réalisé. Pour rappel, avec ce type de motif, la tenue des portiques entre eux via les lisses dans le sens longitudinal est prise en compte. Il permet d'affiner le début de ruine et d'apprécier la dynamique de propagation de ruine entre les différents portiques, et d'estimer plus précisément les temps de ruine locale et globale de la structure.

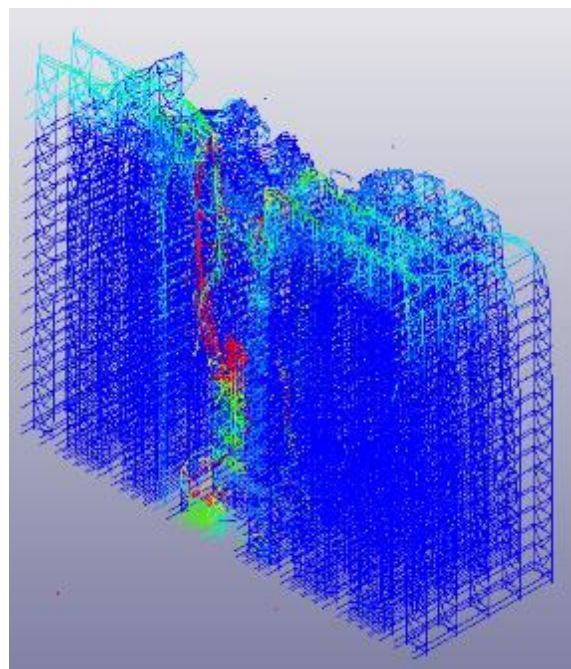
7.3.1.2. Calcul 3D

Sur la Figure 31, la ruine globale de la structure en fonction du temps est illustrée.





T = 576 s



T = 579 s

Figure 31 : Effondrement structurel du motif 3D pour un départ de feu au centre de la cellule

La Figure 31 montre qu'au bout de 322 s, une ruine locale de l'échelle centrale du portique de départ de feu apparaît, mais elle n'entraîne pas la ruine complète du portique de départ de feu. La ruine globale se manifeste à partir de 9 min 30 s. Elle se caractérise par la mise en mouvement simultanée du quart de la structure modélisée jusqu'à leur périphérie. Pour mieux illustrer ce phénomène, le déplacement transversal en tête de montants pour les points numérotés 1 à 5 est tracé sur la Figure 32.

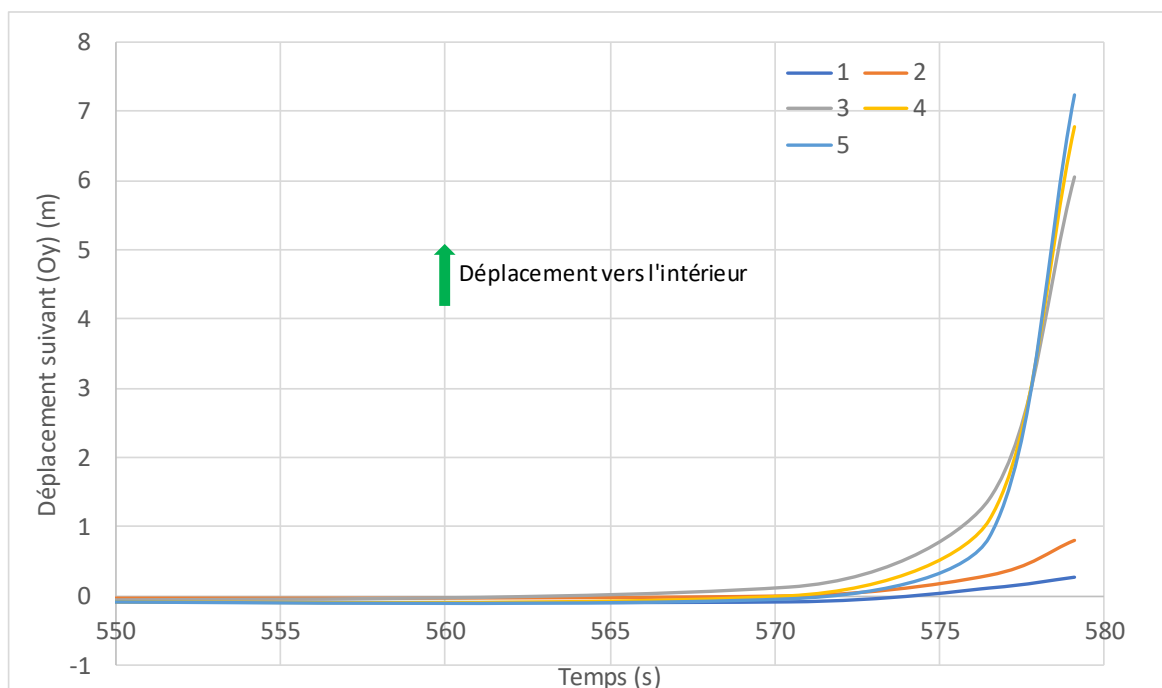
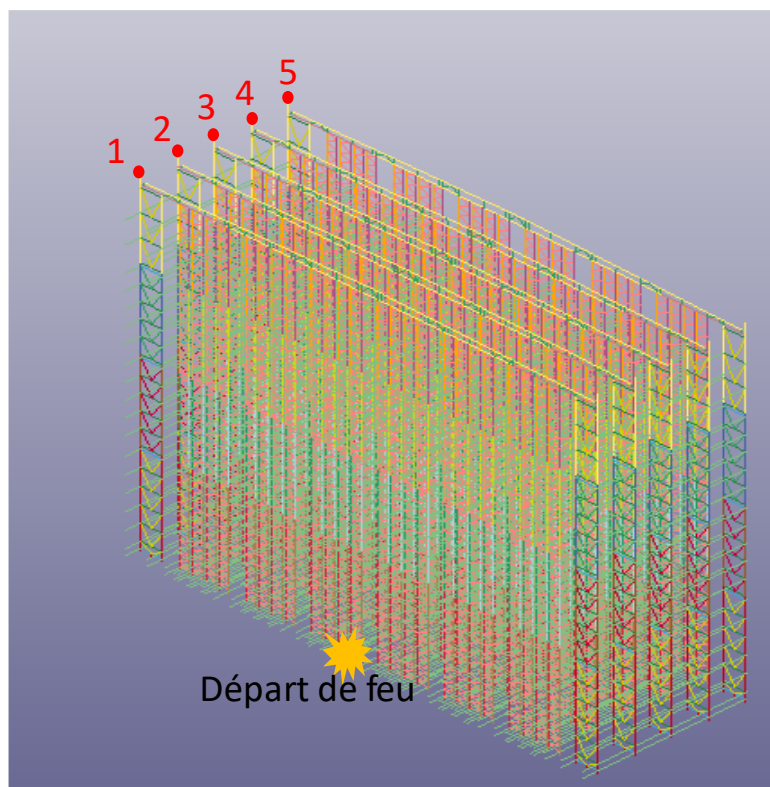


Figure 32 : Déplacement transversal des têtes de montants au cours de la ruine globale

Comme présenté sur la Figure 32, les échelles numérotés 1 à 5 se situent initialement à une distance respectivement croissante du départ de feu. Les points 1 et 2 sont les plus proches et présentent les déplacements les moins élevés au cours du feu. En effet, l'augmentation forte de température dans la zone de départ de feu entraîne la rupture de nombreux éléments dans cette zone, désolidarisant ainsi les échelles périphériques des échelles de cœur : les déplacements périphériques sont alors moins marqués que ceux des échelles 3 à 5. Concernant ces dernières, la première échelle à se mettre en mouvement est l'échelle 3 qui est aussi la plus proche du départ de feu. Cependant, étant plus proche

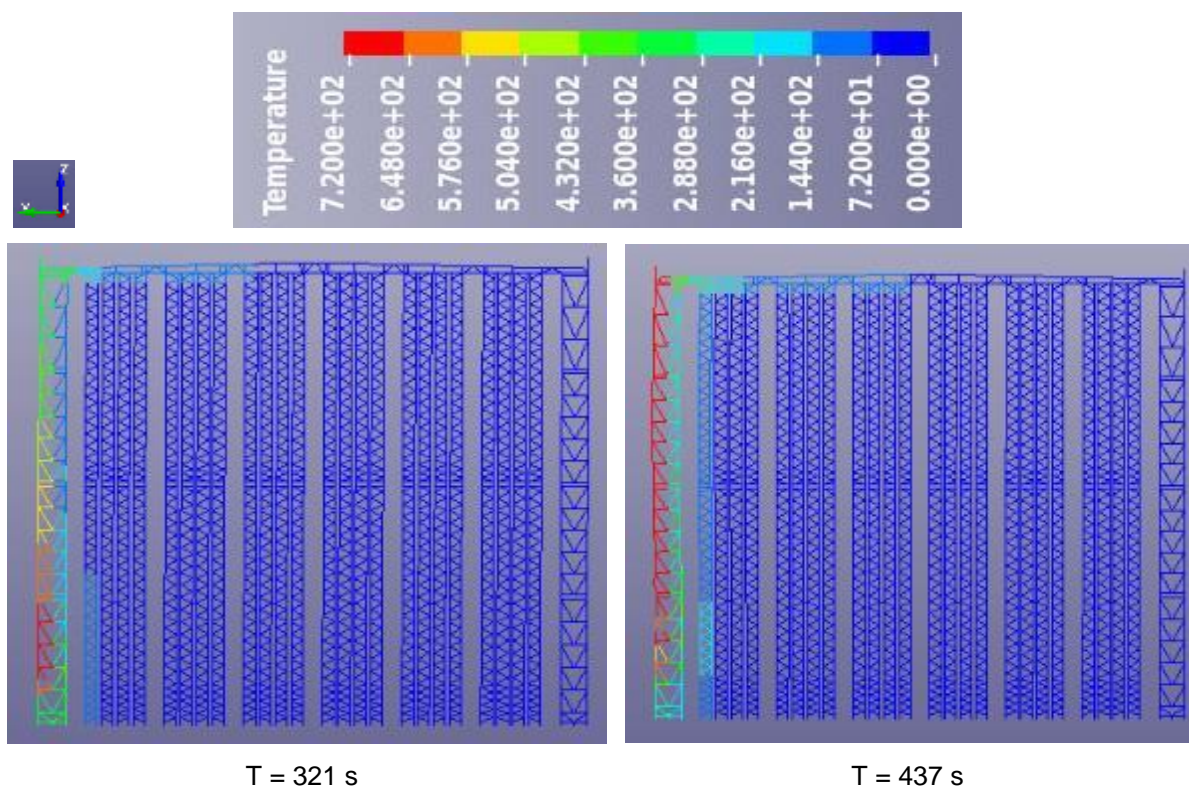
de la zone de départ de feu que les échelles 4 et 5, elle subit un déplacement moins conséquent en fin de simulation à cause du même phénomène de désolidarisation que pour les échelles 1 et 2. Au final, l'échelle 5 est celle ayant subi le déplacement le plus important, ayant été entraînée par davantage de masse froide après 9 min 30 s.

Pour mémoire et comme présenté au paragraphe 3.4, en considérant le temps de détection, de réaction et de descente complète d'un rack, le temps cumulé est égal à 4 min 02 s. Lorsque la ruine locale s'amorce à 5 min 20 s, le personnel de maintenance aura donc déjà parcouru l'équivalent d'environ une minute de marche horizontale au sol en s'éloignant de la zone de départ de feu. **Le temps de ruine globale de 9 min 30 s est quant à lui compatible avec le temps d'évacuation total de 6 min 30 s du personnel de maintenance.**

7.3.2. Départ de feu près d'une paroi (scénario S2)

7.3.2.1. Calcul 2D

La Figure 33 présente l'évolution de la ruine structurelle en 2D pour un départ de feu près de la paroi. Pour ce scénario, la ruine intervient, selon le calcul 2D, plus tardivement que pour le cas d'un départ de feu au centre de la cellule. Le cas précédent est donc bien enveloppe pour le temps de ruine, ce point n'est pas considéré pour le présent scénario.



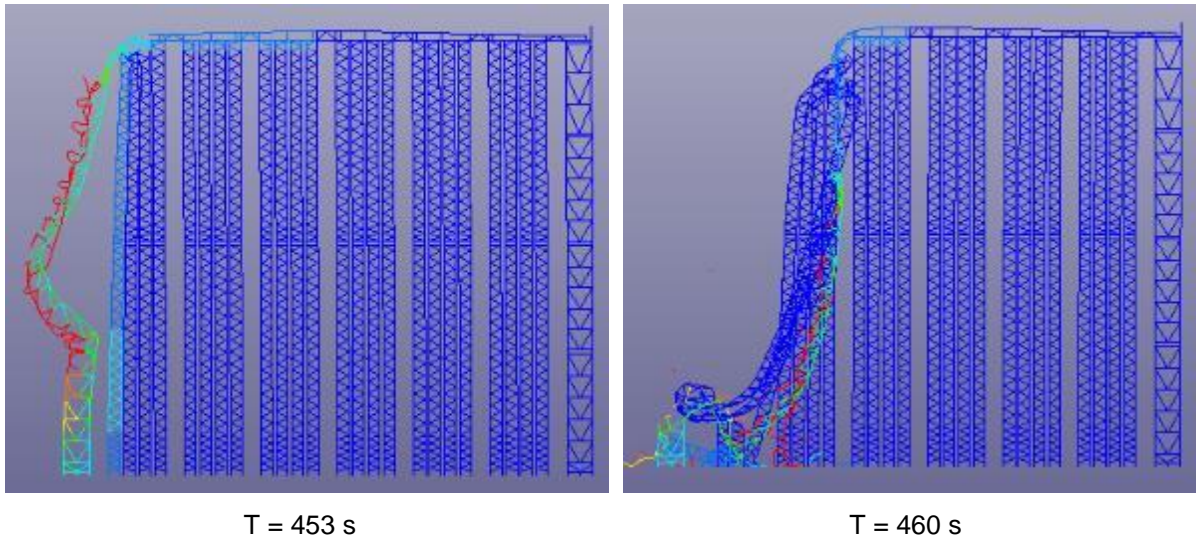


Figure 33 : Effondrement structurel du motif 2D pour un départ de feu près d'une paroi

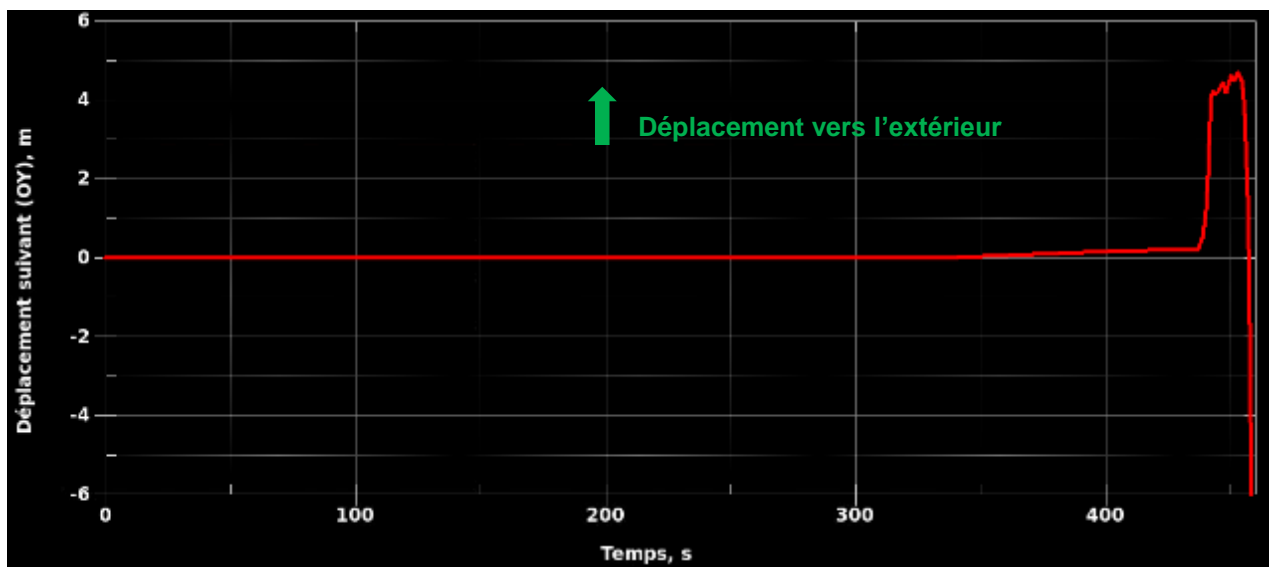
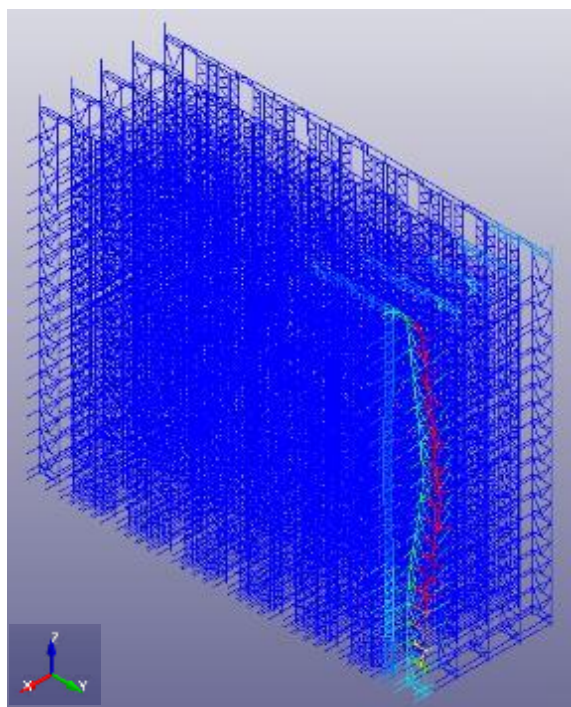
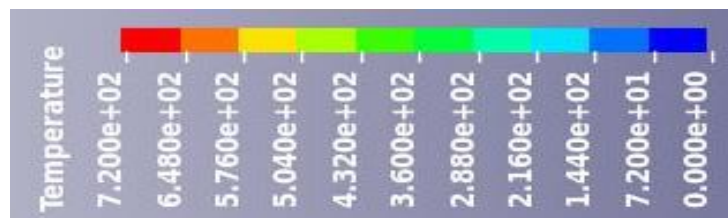


Figure 34 : Déplacement suivant (OY) du point A en fonction du temps

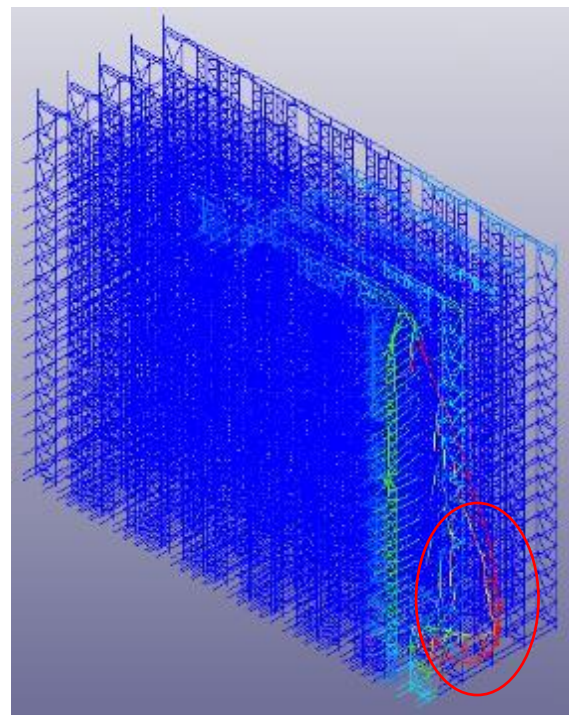
La Figure 33 met en évidence une ruine vers l'intérieur. Cependant, l'échelle extérieure qui est la plus sollicitée au feu subit un fléchissement vers l'extérieur de plus de 4 m, qui est la distance entre bâtiments EGHA. Un risque de ruine en chaîne est donc mis en évidence. Au paragraphe suivant, le calcul est repris avec un motif 3D intégrant les éléments structuraux secondaires (de type lisse) afin d'examiner la persistance ou non de ce fléchissement. Le calcul est réalisé en prenant en compte un motif correspondant à un quart de la structure pour des raisons de modélisation (voir paragraphe 7.2).

7.3.2.2. Calcul 3D

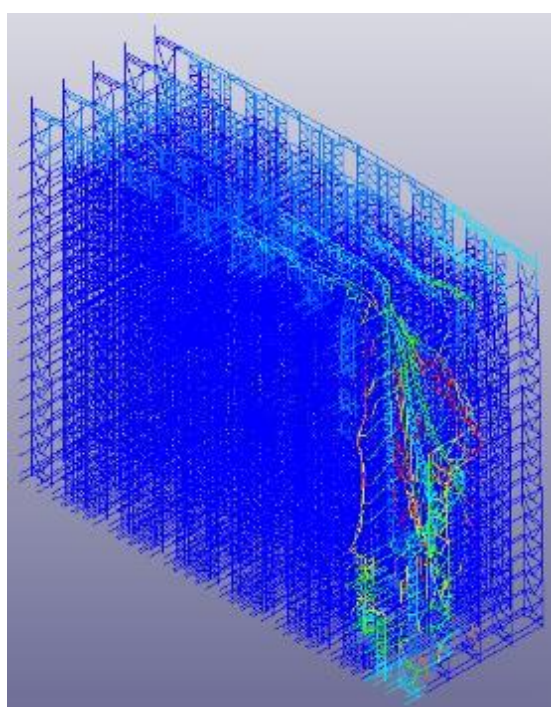
La Figure 35 présente l'effondrement structurel du motif 3D pour un départ de feu près du mur.



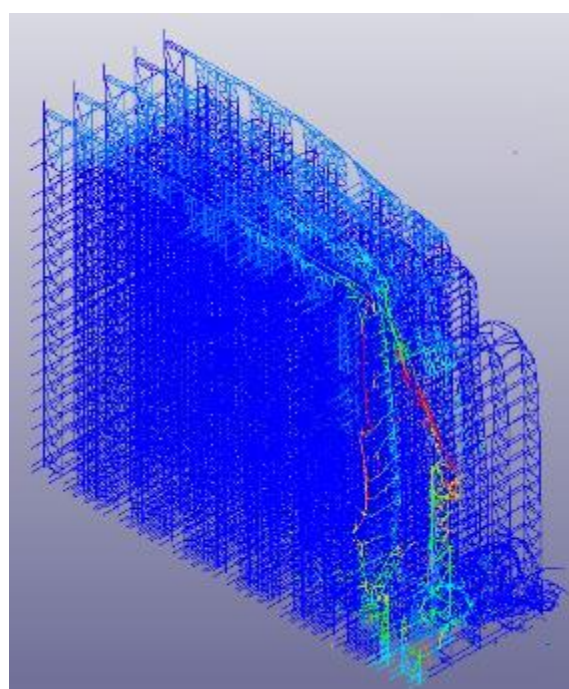
T = 441 s



T = 550 s



T = 662 s



T = 667 s

Figure 35 : Effondrement structurel du motif 3D pour un départ de feu près du mur

Comme constaté sur la Figure 35, les temps d'effondrement structurel local et global pour un départ de feu près du mur sont augmentés par rapport au départ de feu au centre, cependant, la flèche vers l'extérieur persiste en présence des lisses. L'effet du motif 3D par rapport au motif 2D est uniquement de repousser dans le temps l'instant de fléchissement maximal.

Sur la base du constat d'effondrement vers l'extérieur, de nombreuses solutions de renforcement structurel ont été étudiées par le calcul. Par changements successifs des sections des montants extérieurs, des diagonales extérieures et la poutre en tête de montants, de nombreux calculs d'optimisation ont abouti à la solution structurelle présentée au paragraphe 7.3.3 assurant la ruine vers l'intérieur et l'absence de ruine en chaîne entre cellules EGHA.

7.3.3. Départ de feu près d'une paroi (scénario S2) avec adaptations structurelles

L'effondrement vers l'extérieur constaté sur la Figure 33 et la Figure 35 est dû à l'action concomitante de la dilatation thermique et du vent aspirant la paroi vers l'extérieur. Pour éviter ce mode de ruine, la première étape a été de renforcer structurellement les poteaux périphériques comme présenté au paragraphe 7.3.3.1.

7.3.3.1. Renforcement des montants des échelles périphériques

La Figure 36 présente les sections considérées pour le renforcement des montants périphériques. Pour rappel, de nombreuses autres sections ont également été étudiées. La section HEM280 présentée est la section de plus petite taille permettant d'éviter une ruine systématique vers l'extérieur.

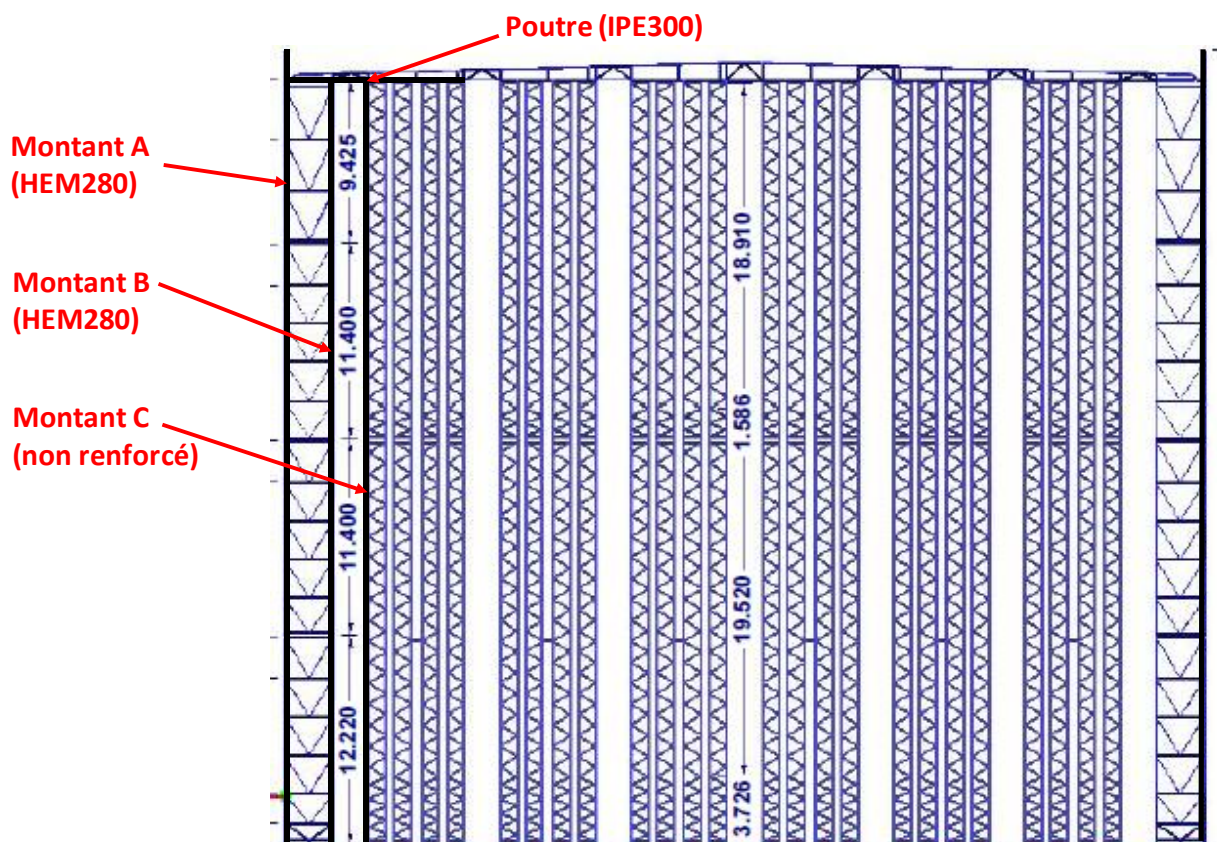


Figure 36 : Renforcement des montants périphériques

Sur la base d'une section HEM280, la ruine du montant externe, noté A, n'est plus dirigée vers l'extérieur. Cependant, comme présenté sur la chronologie en Figure 37, le montant B présente toujours

un flambement vers l'extérieur d'amplitude trop importante. Se focalisant uniquement sur le sens de ruine, seule la chronologie sans les temps de ruine est présentée.

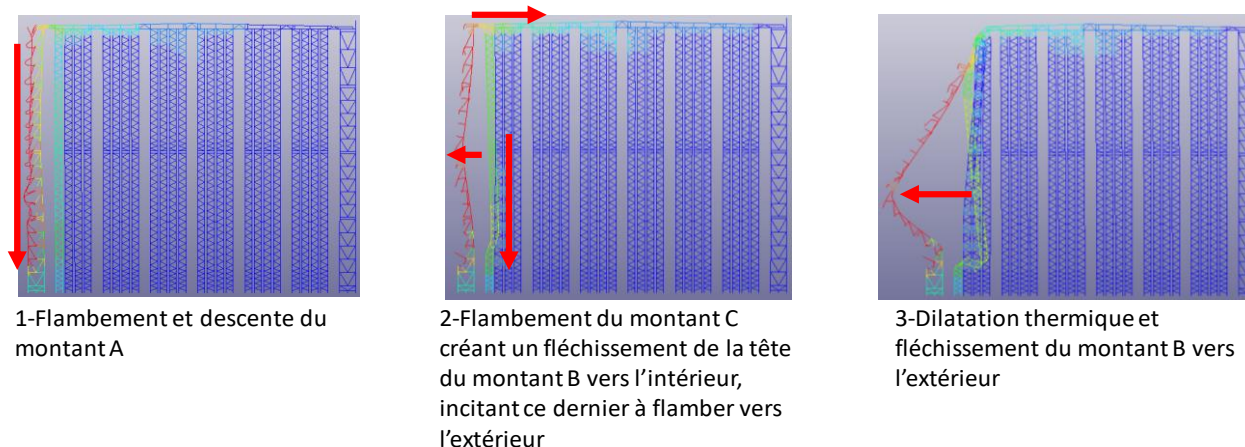


Figure 37 : Chronologie du flambement vers l'extérieur du montant B

La chronologie présentée en Figure 37 met en évidence les principales étapes menant au flambement vers l'extérieur du montant B :

- 1 : le renforcement des montants sous la forme d'une section de type HEM280 permet d'éviter un flambement immédiatement vers l'extérieur du montant externe A ;
- 2 : le montant intérieur C flambe et attire la tête du montant B vers l'intérieur. Le montant B flambe vers l'extérieur ;
- 3 : le montant B se dilate et le flambement et son fléchissement se poursuit vers l'extérieur, entraînant une ruine vers l'extérieur de l'échelle périphérique

Une étape supplémentaire a donc été nécessaire pour guider complètement la ruine vers l'intérieur. L'analyse exposée permet de constater que la ruine vers l'extérieur de B est de fait le résultat d'un jeu cinétique entre le flambement de B, la dilatation de la poutre et le flambement de C. Pour guider la ruine vers l'intérieur, il est nécessaire de laisser la poutre se dilater sans que C ne flambe et crée le fléchissement vers l'intérieur de la tête de B. En effet, cette dernière étape est celle menant ultimement à la ruine de B vers l'extérieur.

Sur la base de ce constat, il a été décidé non pas de renforcer, mais de fragiliser la poutre près des échelles périphériques par rapport à la section initiale en IPE300. En effet, une poutre plus fragile permet une meilleure dilatation du montant C, évitant ainsi que cette dernière ne flambe trop tôt et crée ainsi les conditions du flambement du montant B vers l'extérieur.

7.3.3.2. Modification de la poutre en tête de montants

La modification apportée à la section de la poutre à sa périphérie est présentée sur la Figure 38.

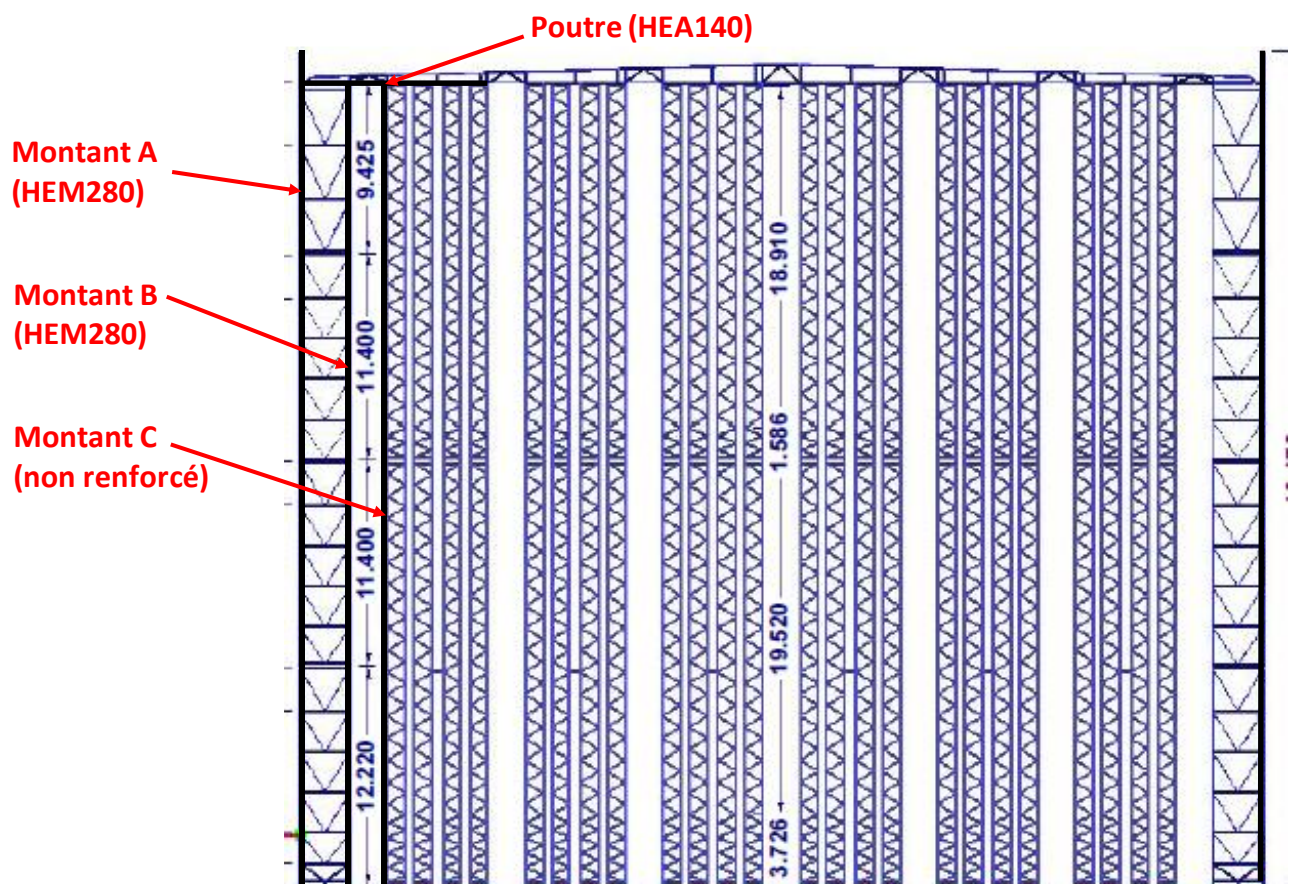


Figure 38 : Renforcements retenus

La section de poutre considérée est donc HEA140 à la place de IPE300. De la même manière que précédemment, la chronologie de la ruine sur la base de ce renforcement est analysée sur la Figure 39

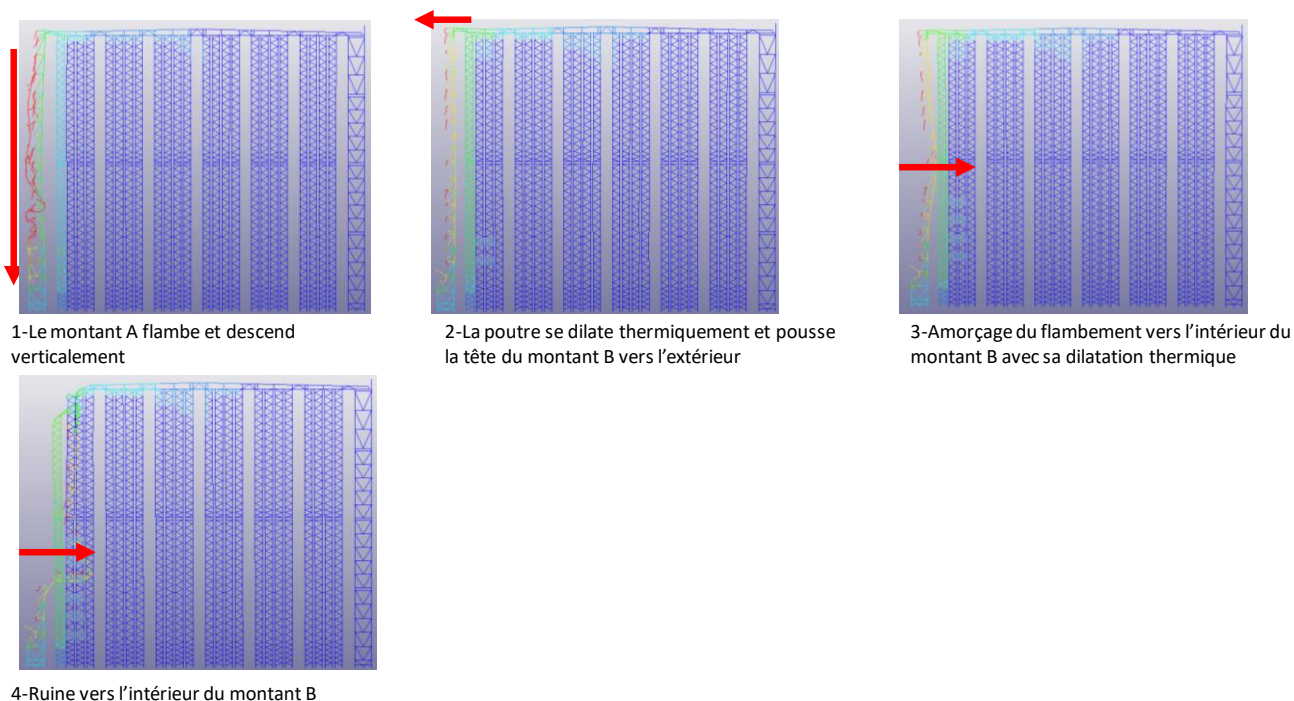


Figure 39 : Chronologie du flambement vers l'intérieur

La Figure 39 met cette fois-ci en évidence les événements suivants :

- 1 : descente verticale du montant 1 grâce au renforcement de section
- 2 : **dilatation thermique de la poutre avant flambement du montant C**, ce qui pousse légèrement la tête du montant B vers l'extérieur, créant ainsi les conditions de son flambement ultérieur vers l'intérieur
- 3 : dilatation thermique du montant B et amorçage du flambement vers l'intérieur
- 4 : ruine vers l'intérieur

Sur cette chronologie, la différence avec celle de la Figure 37 est la création de conditions de fléchissement léger de la tête du montant B vers l'extérieur, et non pas vers l'intérieur, avant le flambement de ce montant.

Ainsi, les renforcements retenus sont ceux présentés sur la Figure 38, à savoir :

- montants périphériques A et B en section HEM280 sur toute leur hauteur et des deux côtés du portique ;
- tronçon périphérique de poutre en HEA140 des deux côtés du portique.

Toutes les autres sections conservent les mêmes profilés que ceux présentés au paragraphe 2.4.3. il est important de noter que tout changement structurel par rapport à la configuration proposée devra faire l'objet d'une nouvelle validation.

Les paragraphes 7.3.3.3 et 7.3.3.4 présentent le calcul du comportement de la structure sur la base des adaptations proposées pour respectivement le scénario S2 et le scénario S1.

7.3.3.3. Calculs 2D avec adaptations structurelles : départ de feu près du mur (scénario S2)

La Figure 40 présente l'évolution dans le temps de la ruine structurelle avec le motif renforcé pour un départ de feu près de la paroi.

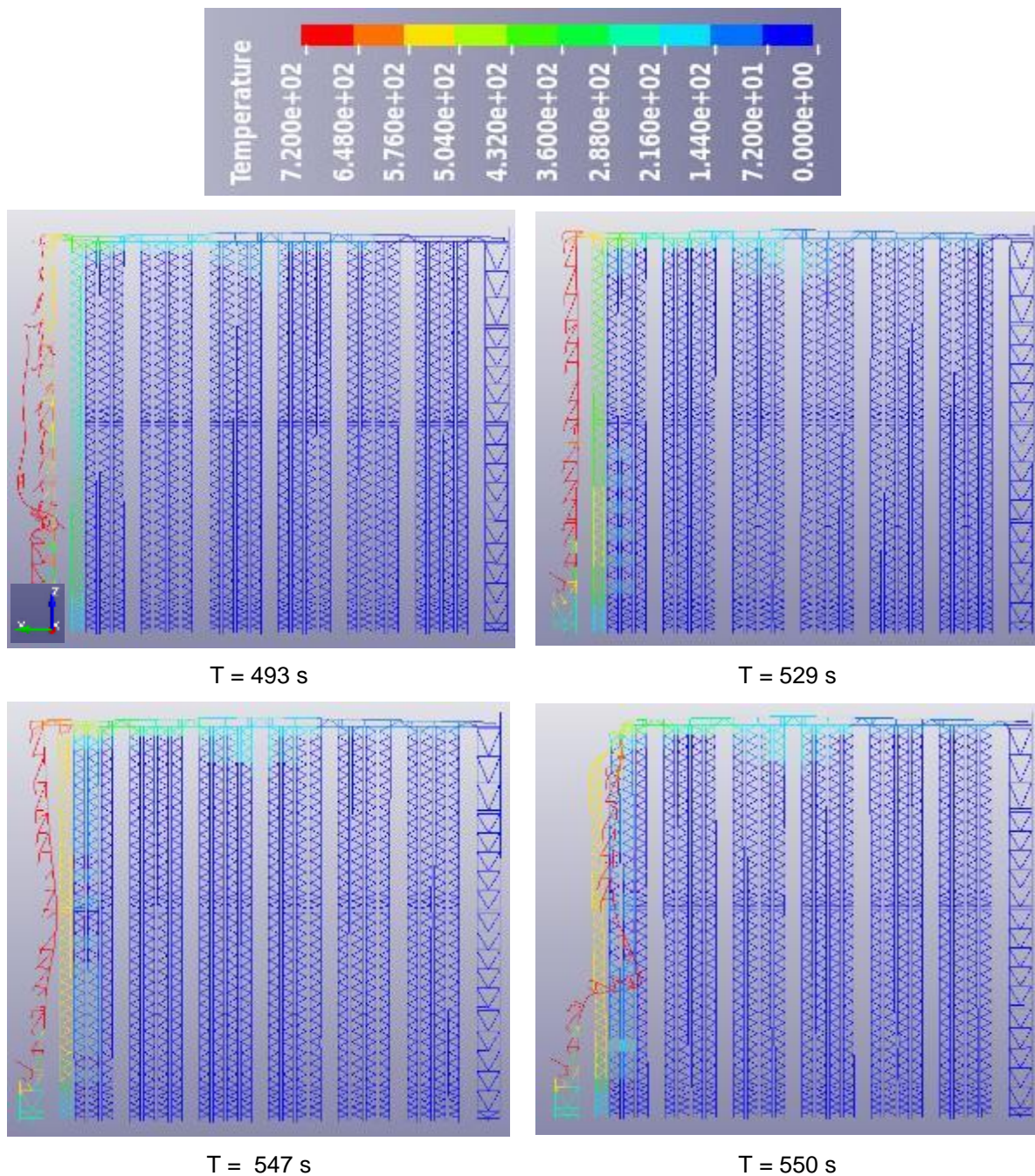


Figure 40 : Effondrement structurel du motif 2D avec adaptations structurelles pour un départ de feu près de la paroi

Comme constaté sur la Figure 40 par comparaison avec la Figure 33, la ruine s'effectue vers l'intérieur et est retardé de plus d'une minute grâce au renforcement structurel. Sur la Figure 41, le déplacement du point A présentant la flèche maximale au cours du flambement est tracé en fonction du temps.

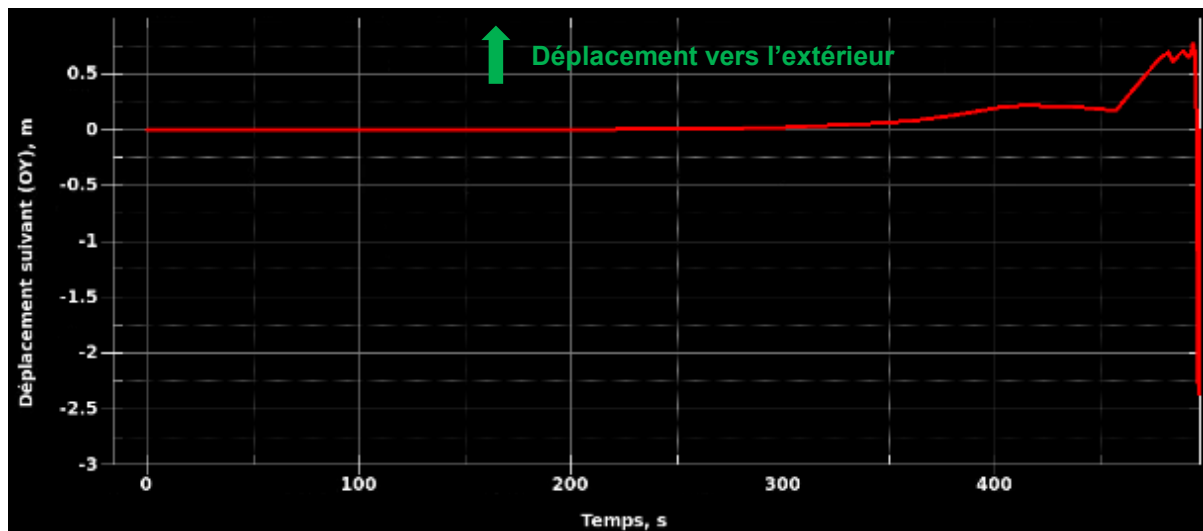


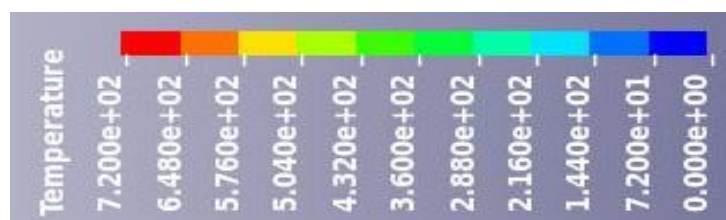
Figure 41 : Déplacement suivant (OY) du point A en fonction du temps

Comme constaté sur la Figure 41, le déplacement maximal vers l'extérieur est inférieur à 1 m. Pour mémoire, la distance séparant deux bâtiments EGHA est de 4 m. Aucune ruine en chaîne n'est donc possible. Le calcul 3D n'est pas nécessaire à ce stade pour deux raisons :

- Comme présenté au paragraphe 7.3.2.2, le sens de ruine demeure inchangé lors du passage en 3D ;
- Comme présenté dans le même paragraphe, le temps de ruine en 3D est compatible avec l'évacuation des personnes. Or, les renforcements structurels proposés ne font qu'augmenter le temps de tenue de la structure.

7.3.3.4. Calculs 2D avec adaptations structurelles : départ de feu au centre (scénario S1)

La Figure 42 présente l'évolution dans le temps de la ruine structurelle en 2D avec les adaptations structurelles proposées au paragraphe 7.3.3.2 pour un départ de feu au centre de la cellule.



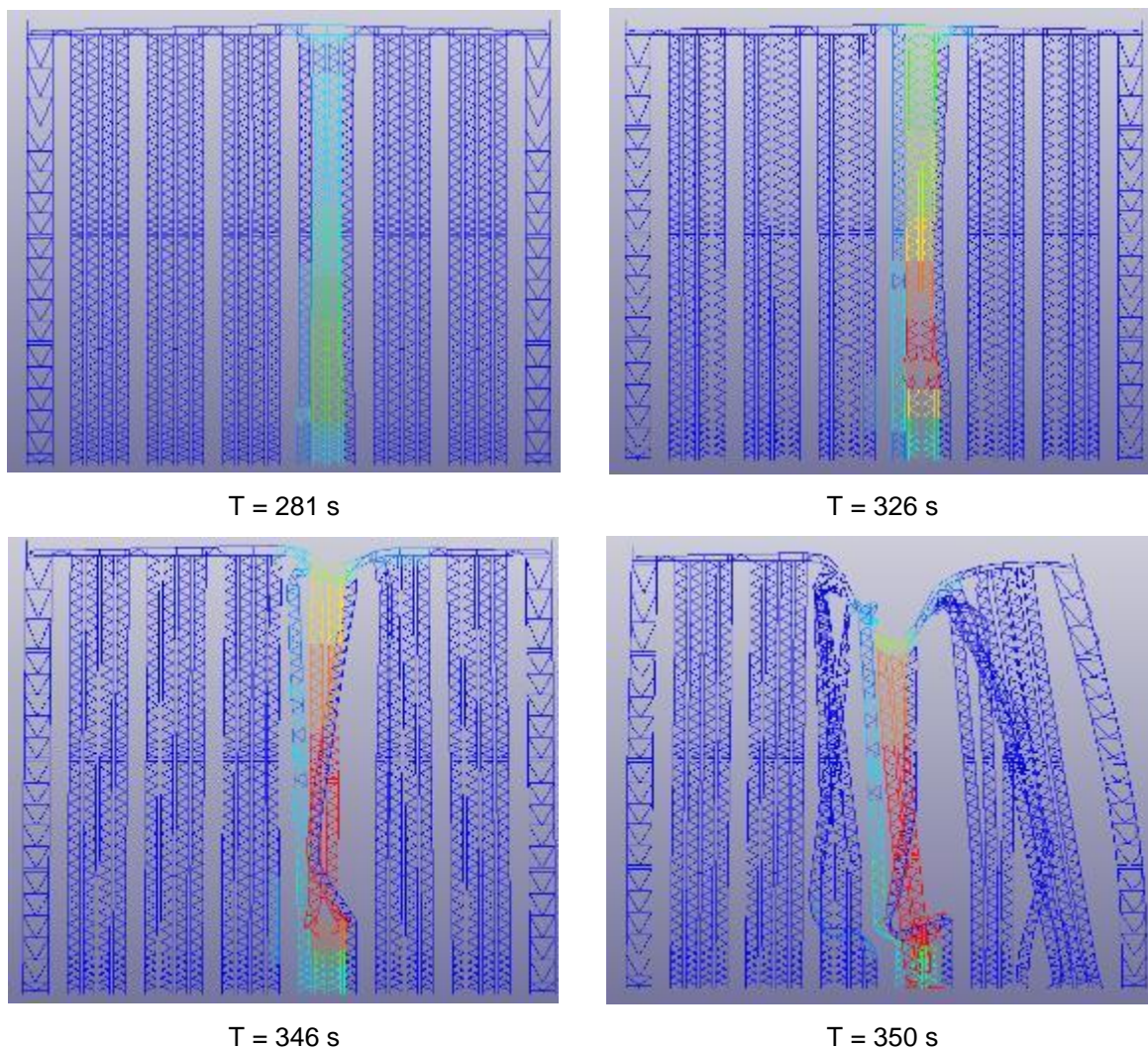


Figure 42 : Effondrement structurel du motif 2D avec structure renforcée pour un départ de feu au centre de la cellule

Comme constaté sur la Figure 42 par comparaison avec la Figure 30, la ruine s'effectue vers l'intérieur et est retardé d'environ 30 secondes grâce au renforcement structurel. Le calcul 3D n'est pas nécessaire à ce stade pour deux raisons :

- Comme présenté au paragraphe 7.3.1.2, le sens de ruine demeure inchangé lors du passage en 3D et est dirigé vers l'intérieur ;
- Comme présenté dans le même paragraphe, le temps de ruine en 3D est compatible avec l'évacuation des personnes. Or, les renforcements structurels proposés ne font qu'augmenter le temps de tenue de la structure.

8. CONCLUSION

L'étude spécifique d'ingénierie incendie concerne la cellule EGHA de grande hauteur du site de la société JJA sur la commune de Mouflers (80). Au sens de l'Arrêté du 11 Avril 2017, il est nécessaire de vérifier :

- la compatibilité entre, d'une part, la cinétique de l'incendie et de ruine de la structure, et d'autre part, l'évacuation des opérateurs en charge de la maintenance et l'intervention des services de secours ;
- la non ruine en chaîne et la non ruine vers l'extérieur de la structure de la cellule.

Le temps nécessaire pour l'évacuation des opérateurs de maintenance a été calculé à 6 minutes 30 s.

Le temps disponible avant que les conditions de tenabilité soient compromises, limité dans la présente étude par l'apparition du phénomène de flashover, a été calculé, de manière prudente à 11 minutes. La compatibilité entre la cinétique de l'incendie et l'évacuation des opérateurs en situation de maintenance a donc été prouvée.

Concernant la cinétique de la ruine, celle-ci débute localement avant la sortie des opérateurs de maintenance. Toutefois, la ruine devient globale, c'est-à-dire affecte la structure autoportante des racks sur le quart du bâtiment dans sa longueur, soit 5 portiques, au bout de 9 min 30 s, un temps supérieur au temps d'évacuation du personnel de maintenance. La compatibilité entre la cinétique de la ruine et l'évacuation des personnes est donc assurée. En outre, il a été prouvé que la ruine est dirigée vers l'intérieur de la cellule et n'entraîne pas de ruine en chaîne sur la base des adaptations structurelles retenues au paragraphe 7.3.3.2 à savoir :

- montants périphériques A et B en section HEM280 sur toute leur hauteur et des deux côtés du portique ;
- tronçon périphérique de poutre en HEA140 des deux côtés du portique.

Concernant l'intervention des services de secours, celle-ci est fortement déconseillée au-delà du temps d'apparition du phénomène de flashover, c'est-à-dire 11 minutes après le départ de feu.

Enfin, il est à noter que, afin d'assurer une détection d'incendie même en situation d'échec du système de sprinkler, l'INERIS préconise l'utilisation de détecteurs portatifs de CO par les opérateurs en intervention de maintenance. Alternativement, un système de détection fixe (optique, ponctuel/linéaire, par aspiration de fumées) indépendant du sprinkler pourra être mis en place. On notera finalement que le site sera gardienné en permanence 7 jours sur 7, 24h sur 24, et que l'intervention de maintenance s'effectue en binômes qui sont en contact visuel permanent visuel et/ou en communication.

9. REFERENCE

- [1] ISO 13571 : « Composants dangereux du feu - Lignes directrices pour l'estimation du temps disponible avant que les conditions de tenabilité ne soient compromises » Novembre 2012
- [2] Fire Dynamics Simulator (Version 5) – User's Guide – Kevin Mc Grattan, Randall Mc Dermott - 2010
- [3] G.W. Mulholland and C. Croarkin, Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. Fire and Materials, 24 :227-230, 2000.
- [4] Drysdale, An introduction to fire dynamics. – New-York : Wiley, 1999.
- [5] Flumilog, Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt – Partie A – DRA-09-90977-14553A Version 2

