

DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION ENVIRONNEMENTALE AU TITRE DES INSTALLATIONS CLASSÉES (ICPE)

**PROJET DE PLATEFORME DE LOGISTIQUE URBAINE MULTIMODALE
SUR LE PORT DE GENNEVILLIERS (92)**

PROJET GREEN DOCK

PARTIE 4

Pièce 4.2 / DDAE n°49. B

Annexes de l'étude de dangers

Cahier 8/8

Annexes 10 à 13

Sommaire

1. Annexe 10 / Étude d'ingénierie de sécurité incendie en matière de désenfumage relative aux cellules A3/B3/C3/D3
2. Annexe 11 / Tierce expertise de l'étude des flux thermiques du projet Green Dock
3. Annexe 12 / Complément à l'étude de flux thermiques
4. Annexe 13 / Analyse critique d'une étude ISI

Sécurité incendie

Projet Green Dock

Etude d'ingénierie de sécurité incendie en matière de désenfumage relative aux cellules A3/B3/C3/D3

ADRESSE DE L'AFFAIRE

PORT AUTONOME DE GENNEVILLIERS, ROUTE DU BASSIN N°6 – 92230 GENNEVILLIERS

OBJET DU DOCUMENT

RAPPORT D'ETUDE

REDACTEURS

B. MOREAU, E. BLANCHARD

VERIFICATEUR

U. MATTEÏ

APPROBATEUR

C. GERINTE

DATE : 17 JANVIER 2025

REVISION : D



Immeuble Le Valmy
18, avenue Léon Gaumont - 75020 Paris

T. +33 (0)1 44 73 14 61
www.lisi-ingenierie.fr



1 rue des Longs Réages
CS 10010
28233 EPERNON CEDEX

Tél. : +33 (0)2 37 18 62 02
www.labo-promethee.fr

D	17/01/25	LISI	Intégration des observations de la BSPP/Bprev [13]
C	08/01/24	LISI	Modifications mineures
B	13/11/23	LISI	Modifications mineures
A	16/10/23	LISI	1ère diffusion
INDICE	DATE	EMETTEUR	MODIFICATION

Sommaire

1. - CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE	5
2. - PRESENTATION DU BATIMENT INDUSTRIEL	6
2.1. - Géométrie et dimensions	6
2.2. - Charge combustible	7
2.3. - Dispositions constructives	7
2.4. - Dégagement du personnel	9
2.5. - Désenfumage des cellules	9
2.6. - Autres mesures de sécurité incendie	11
3. - OBJECTIFS DE SECURITE ET CRITERES DE PERFORMANCE ASSOCIES	12
3.1. - Objectifs de sécurité.....	12
3.2. - Critères de performance.....	12
4. - ANALYSE DE LA PERFORMANCE	13
5. - SCENARIO D'INCENDIE	14
5.1. - Choix de la cellule	14
5.2. - Foyers d'étude	14
5.2.1. - Départ de feu et propagation de l'incendie	14
5.2.2. - Mise en œuvre du désenfumage	18
5.2.3. - Synthèse des scénarios retenus	18
6. - MODELE NUMERIQUE ET GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES	19
6.1. - Outil de calcul utilisé	19
6.2. - Modèles numériques	19
6.3. - Grandeurs physiques exploitées	20
7. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA DETECTION INCENDIE	22
8. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA MISE EN SECURITE DES TRAVAILLEURS	25
9. - ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION	27
9.1. - Propagation de l'incendie	27
9.2. - Condition d'évacuation des travailleurs	28
9.3. - Condition d'intervention des pompiers.....	29
10. - SYNTHESE ET CONCLUSION DE L'ETUDE	33

Sécurité incendie

OBJET DU DOCUMENT RAPPORT D'ETUDE

DOCUMENTS DE REFERENCE

Les données relatives au projet sont tirées des documents suivants :

- [1] Dossier PC - Notice de sécurité - Projet Greendock, Document GE-CO, daté d'octobre 2023
- [2] Dossier PC – Plan de masse, Document A26, daté d'octobre 2023
- [3] Dossier PC – Plans de niveaux RDC à R+3, Documents A26, datés d'octobre 2023
- [4] Dossier PC – Plans des coupes, Documents A26, datés d'octobre 2023
- [5] Dossier de demande d'agrément – Plan de rackage maximal, Document A26, daté de mars 2023
- [6] Tableau d'effectifs, Document A26, transmis par courriel le 18 juillet 2023
- [7] Plans de principe de désenfumage, Document EGIS, transmis par courriel le 13 octobre 2023
- [8] Note de calculs des surfaces utiles de désenfumage, Documents A26 et EGIS, daté du 26 juillet 2023
- [9] Nomenclature des grilles de désenfumage, Document A26, transmis par courriel le 12 juillet 2023
- [10] Phase APD / PRE PC - Plan des coupes montrant l'implantation des dispositifs de désenfumages des cellules de l'entrepôt en façades, Document EGIS, transmis par courriel le 12 juillet 2023
- [11] « Phase APD/PRE PC – Détail résille – calcul désenfumage », Document A26, daté de juin 2023
- [12] « Projet Green Dock – Etude de flux thermique », Document LISI, daté d'octobre 2023
- [13] Courrier de la Préfecture de police / Brigade de sapeurs-pompiers de Paris / Bureau prévention adressé à la DRIEE Île-de-France concernant le projet Green Dock, Courrier daté du 13 mars 2024, référence D-2024-002946 N°GVL 597 19/01/2024 A-2024-001317

Les autres références exploitées sont les suivantes :

- [14] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- [15] Arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi que les arrêtés de prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à enregistrement sous les rubriques n° 1511, 1530, 1532, 2662 et 2663
- [16] Guide d'application de la rubrique 1510 et de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 modifié relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, Document du Ministère de la Transition Ecologique, Version 2 révisée en date du 24 septembre 2021
- [17] Arrêté du 27 mars 2014 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 1511 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- [18] Arrêté du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation », Ministère de l'écologie et du développement durable, 2005
- [19] « Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage – Etablissement recevant du public », Laboratoire Central de la Préfecture de Police, Juillet 2017
- [20] J.M. Willi, G.P. Horn and D. Madrzykowski, "Characterizing a Firefighter's Immediate Thermal Environment in Live-Fire Training Scenarios", Fire Technology, 52, 1667–1696, 2016

- [21] « FLUMilog - Description de la méthode de calcul des effets thermiques produit par un feu d'entrepôt » - Modules 1 à 7, Documents INERIS, Référence 204476 - 2728180 - v0.3
- [22] « Facteurs d'influence sur la capacité d'une installation sprinkleur à fonctionner correctement », Document CNPP, daté d'avril 2012

1. - CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

La présente étude est réalisée dans le cadre du projet de construction d'une plateforme logistique urbaine multimodale sur le site du port Autonome de Gennevilliers, sis Route du Bassin n°6. Le projet de construction comprend un bâtiment industriel à usage d'entrepôt et de distribution multimodale à niveaux, un parc de stationnement en infrastructure et des zones de bureaux liées à l'activité d'entrepôt (cf. Figure 1).

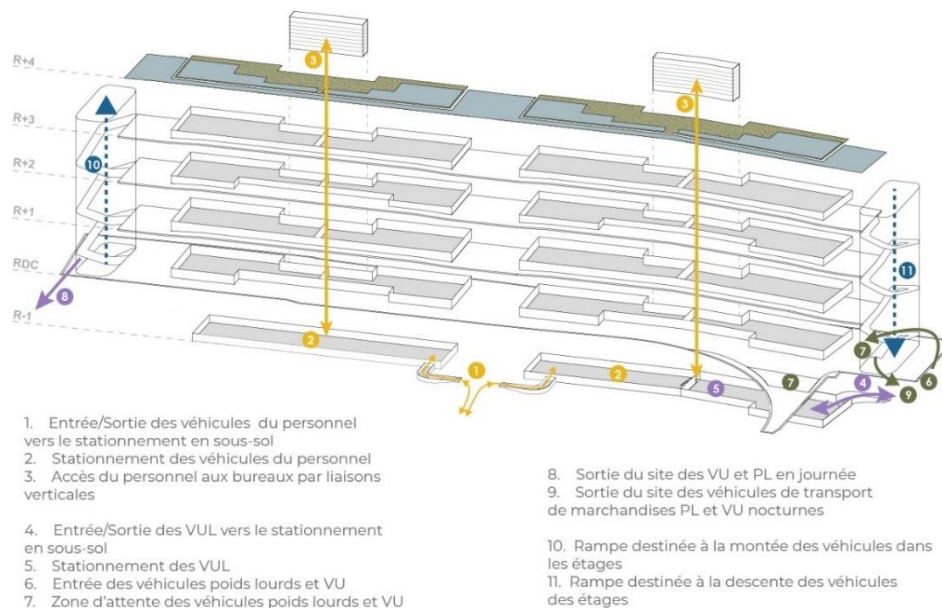


Figure 1 : Programme du projet

Le bâtiment industriel à usage d'entrepôt et de distribution multimodale relève de la rubrique 1510-2b (entrepôt de matière combustible) sous le régime de l'enregistrement. À titre indicatif, certaines cellules de l'entrepôt (au RDC et au R+1 des blocs A et B) sont prévues pour être éventuellement frigorifiques d'une température inférieure à 10°C.

Le bâtiment industriel à usage d'entrepôt et de distribution multimodale est un entrepôt multiniveau. Il est composé de quatre blocs A, B, C et D. Du RDC au R+3, chaque bloc comprend une cellule. Les cellules des niveaux R+3 de chaque bloc sont prévues désenfumées suivant le même principe que les cellules des niveaux inférieurs. À savoir, elles sont désenfumées naturellement par des ouvrants disposés en façades NORD et SUD et des conduits de désenfumage. Or, cela constitue un écart à l'article 5 de l'annexe II de l'arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663. En effet, cet article n'introduit pas explicitement la possibilité pour les entrepôts multiniveaux de désenfumer les cellules des niveaux sous toiture par des ouvrants en façade plutôt que par des exutoires :

« En cas d'entrepôt à plusieurs niveaux, les niveaux autres que celui sous toiture sont désenfumés par des ouvrants en façade asservis à la détection conformément à la réglementation applicable aux établissements recevant du public. »

La présente étude est conduite en application de l'article 4 de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017. Elle a pour objet de s'assurer que cet aménagement des dispositions permet d'atteindre un niveau de sécurité au moins équivalent à celui résultant des prescriptions dudit arrêté ce, vis-à-vis des objectifs fixés à l'article 1^{er}.

Le présent rapport décrit la méthodologie développée pour répondre à cette question. Il rappelle les données de l'étude, précise les objectifs de performance à atteindre, les décline en critères, pose les hypothèses de l'étude et définit des scénarios d'incendie. Des cibles d'intérêt sont identifiées. Le présent rapport analyse les résultats. Il permet ainsi de conclure quant à l'aménagement des dispositions en matière de désenfumage concernant les cellules de l'entrepôt des niveaux R+3.

Ce projet a fait l'objet de deux réunions préalables auprès des services de la DRIEAT et du Bureau Prévention de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris en dates du 8 septembre 2021 et du 9 juin 2023.

2. - PRESENTATION DU BATIMENT INDUSTRIEL

2.1. - GEOMETRIE ET DIMENSIONS

Le bâtiment industriel à usage d'entreposage et de distribution multimodale est un bâtiment sur plusieurs niveaux accessibles aux véhicules. Il s'agit d'un entrepôt multiniveau.

Dans le cadre du fonctionnement du projet Green Dock, il est prévu un système de gestion de la circulation dynamique sur site de sorte que les voiries soient libérées en tout temps et qu'il n'y ait pas de bouchon. Cette gestion sera assurée depuis le poste de garde au RDC du projet. Les hypothèses de l'étude de trafic prévoient au maximum une quarantaine de PL par heure pour 96 portes à quai.

À quai, les camions n'ont pas vocation à stationner. Ils sont chargés ou déchargés. Aussi, les quais ne constituent pas des zones de stockage. Par ailleurs, les chauffeurs sont à proximité immédiate de leur véhicule puisqu'ils sont soit dans leur véhicule, soit dans le local chauffeurs situé juste à côté. En cas d'incendie d'un véhicule, il est donné pour consigne que les autres véhicules quittent la zone. Les cours camions et les rampes d'accès sont protégées par un système d'extinction automatique d'incendie de type sprinkler conforme aux règles NFPA.

Le bâtiment est composé de quatre blocs A, B, C et D. Du RDC au R+3, chaque bloc comprend une cellule. Au total, le bâtiment comprend 16 cellules. À chacun des niveaux, les cellules sont très similaires entre les blocs que ce soient en géométrie ou en dimensions. Les cellules du niveau RDC sont identiques à celles du niveau R+2, elles sont consacrées aux activités de messagerie, distribution. Les cellules du niveau R+1 sont identiques à celles du niveau R+3, elles sont consacrées aux activités de stockage.

Le Tableau 1 résume pour chaque cellule les surfaces au sol et les hauteurs sous plafond. Les cellules mesurent entre 105 et 120 de long et entre 25 et 50 m de profondeur. Le bâtiment s'élève sur 28 m compté depuis le plancher bas du RDC (cf. Figure 4). Certaines cellules intègrent des mezzanines. Il s'agit des cellules des blocs A à D, des niveaux R+1 et R+3.

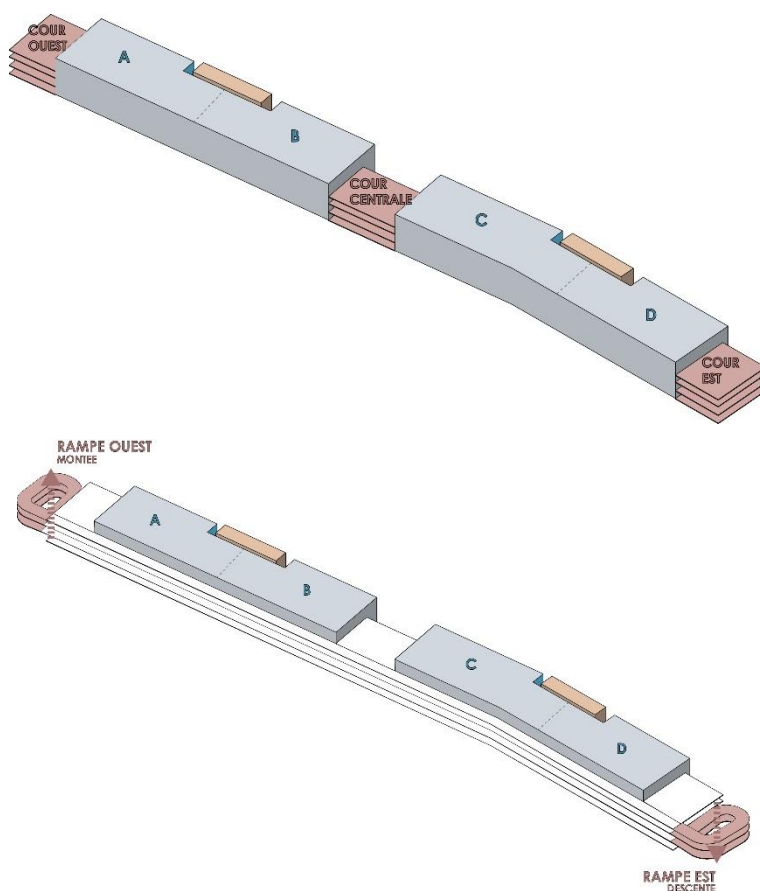


Figure 2 : Configuration du bâtiment Industriel à usage d'entreposage

	Bloc A	Bloc B	Bloc C	Bloc D	Bloc A	Bloc B	Bloc C	Bloc D
	Surface de plancher [Surface supplémentaire en mezzanine]				Hauteur sous plafond NGF du plancher bas			
R+3	4872 m ² [606 m ²]	4872 m ² [606 m ²]	5394 m ² [605 m ²]	5319 m ² [605 m ²]	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF
R+2	4155 m ²	4155 m ²	4754 m ²	4604 m ²	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF
R+1	4839 m ² [592 m ²]	4839 m ² [597 m ²]	5360 m ² [592 m ²]	5287 m ² [602 m ²]	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF
RDC	4166 m ²	4091 m ²	4687 m ²	4610 m ²	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF

Tableau 1 : Dimensions des cellules

2.2. - CHARGE COMBUSTIBLE

La charge combustible et le volume correspondant ont été estimés au regard de l'étude capacitaire en termes de nombre de palettes. Cette estimation a conduit à établir que chaque cellule comporte entre 1 196 et 3 230 tonnes de combustibles. Le Tableau 2 reprend cette estimation de la masse combustible par cellule.

BATIMENT			Nombre maximal de palettes	Masse moyenne totale palettes (en t) sur la base d'une masse moyenne de palette de 800 kg	Volume moyen total palettes (en m³) sur la base d'un volume moyen de palette de 1,728 m³
A/B	A	RDC A0	1525	1 220,0	2 635,2
		R1 A1	3492	2 793,6	6 034,2
		mezz R1 A1	32	25,6	55,3
		R2 A2	1522	1 217,6	2 630,0
		R3 A3	3486	2 788,8	6 023,8
		mezz R3 A3	32	25,6	55,3
	B	RDC B0	1496	1 196,8	2 585,1
		R1 B1	3492	2 793,6	6 034,2
		mezz R1 B1	32	25,6	55,3
		R2 B2	1522	1 217,6	2 630,0
		R3 B3	3486	2 788,8	6 023,8
		mezz R3 B3	32	25,6	55,3
C/D	C	RDC C0	1940	1 552,0	3 352,3
		R1 C1	3977	3 181,6	6 872,3
		mezz R1 C1	32	25,6	55,3
		R2 C2	1976	1 580,8	3 414,5
		R3 C3	4005	3 204,0	6 920,6
		mezz R3 C3	32	25,6	55,3
	D	RDC D0	1718	1 374,4	2 968,7
		R1 D1	3886	3 108,8	6 715,0
		mezz R1 D1	32	25,6	55,3
		R2 D2	1718	1 374,4	2 968,7
		R3 D3	3896	3 116,8	6 732,3
		mezz R3 D3	32	25,6	55,3
TOTAL			43 393	34 714 t	74 983 m³
TOTAL avec prise en compte d'un coefficient de sécurité de 10%			47 732	38 186 t	82 481 m³

Tableau 2 : Estimation de la charge calorifique et du volume correspondant par cellule

2.3. - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

La structure principale du bâtiment est en béton armé présentant une tenue au feu conventionnelle R120. . De manière plus précise, le bâtiment est prévu réalisé en béton armé et précontraint avec un système de poteaux-poutres :

- Les poteaux sont en béton armé de hauteur 4,74 m ou 6,24 m suivant les niveaux. Ces poteaux sont encastrés en pieds dans les fondations.

- Les poutres principales portent dans le sens longitudinal du bâtiment (portée de 11 m) et sont en béton précontraint.
- Le plancher des cellules de stockage est en dalle alvéolée précontrainte de portée de 12 m d'axe à axe (dans le sens transversal du bâtiment entre chaque poutre).
- Le plancher des cours camion et de la voie de circulation est en dalle TT en béton. Les poteaux communs aux cellules et à la voie de circulation portent les poutres support des dalles respectives des cellules et de la voie de circulation.

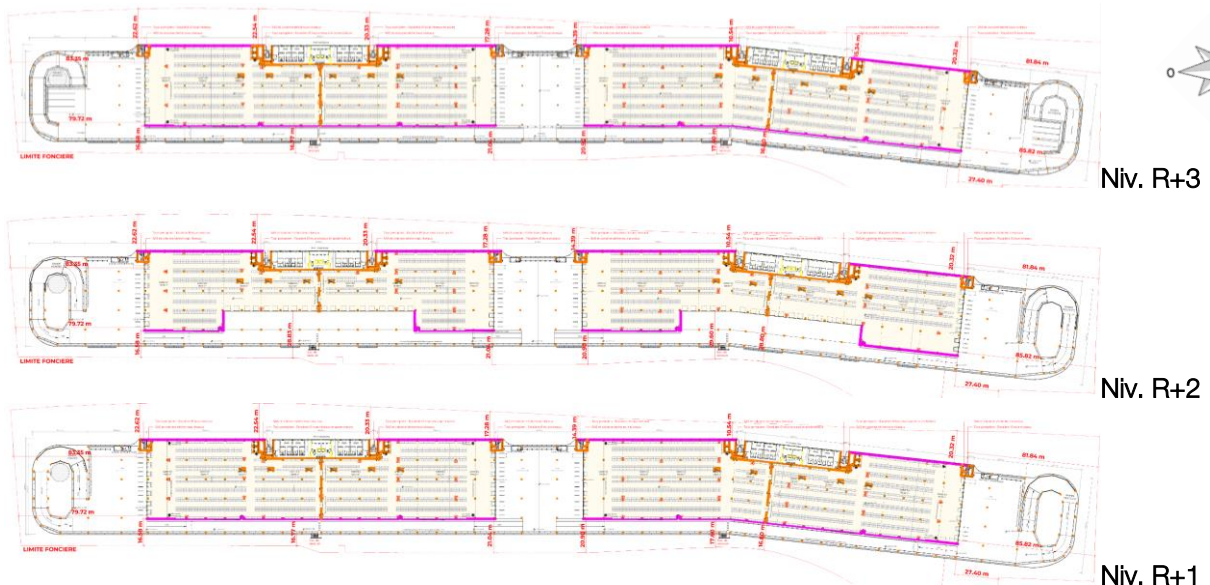
Le degré de résistance renseigné, en l'occurrence REI 120, s'applique à tout le plancher (haut ou bas).

Chaque cellule est isolée des cellules adjacentes par des parois séparatives et des planchers en béton de degré REI120 (cf. Figure 3 et Figure 4). Le plancher bas des cellules du RDC tout comme le plancher haut des cellules du R+3 sont en béton de degré REI120.

Les dispositifs de fermeture au droit des ouvertures entre cellules présentent un classement EI120C. Leur fermeture est assurée de manière automatique en cas de feu. De manière plus précise, chaque cellule est surveillée par une détection automatique d'incendie. Des détecteurs optiques ou multi-ponctuels par aspiration sont positionnés sous la dalle, leur couverture répond aux exigences de la norme NF S 61-970. Cette surveillance assure une détection précoce du feu. Les dispositifs de fermeture des cellules sont constitués par des éléments DAS normalisés CF 2h, leur asservissement est sans temporisation à la détection incendie. Autrement formulé, la sensibilisation d'un détecteur conduit à la fermeture sans temporisation des dispositifs de fermeture entre cellules. La libération de la ventouse DAS permet la fermeture de la porte par gravité sur un rail guide en pente jusqu'à la butée une fois l'effacement latéral ayant assuré l'obturation de la baie.

En ce qui concerne les monte-charges mettant en relation directement les cellules du RDC avec celles du premier étage et les cellules du deuxième étage avec celles du troisième étage, ils sont équipés d'un dispositif CF Conformément aux dispositions réglementaires. Il s'agit soit de la porte du monte-charge elle-même, soit d'un dispositif DAS complémentaire.

Les façades extérieures sont en panneau sandwich double peau repris par la structure porteuse. En façades NORD et SUD, les façades forment un écran thermique EI120 sur une partie ou sur la totalité de leur linéaire (cf. Figure 3 et Figure 4). Ce niveau de protection est assuré pour un feu intérieur. Une particularité concerne la cellule D0 où la façade EST présente une tenue au feu REI120. Les cellules sont isolées des bâtiments de bureaux par des murs REI120 (cf. Figure 3). Les ouvrants en façade NORD sont disposés de telle sorte de limiter le risque de propagation de l'incendie par la façade à la cellule superposée : Le C+D est entre 4,08 m et 7,45 m en fonction des étages. À noter que ces valeurs sont très supérieures aux dispositions qui sont appliquées aux ERP (l'article art. CO21 impose au maximum $C + D > 1,3$ m).



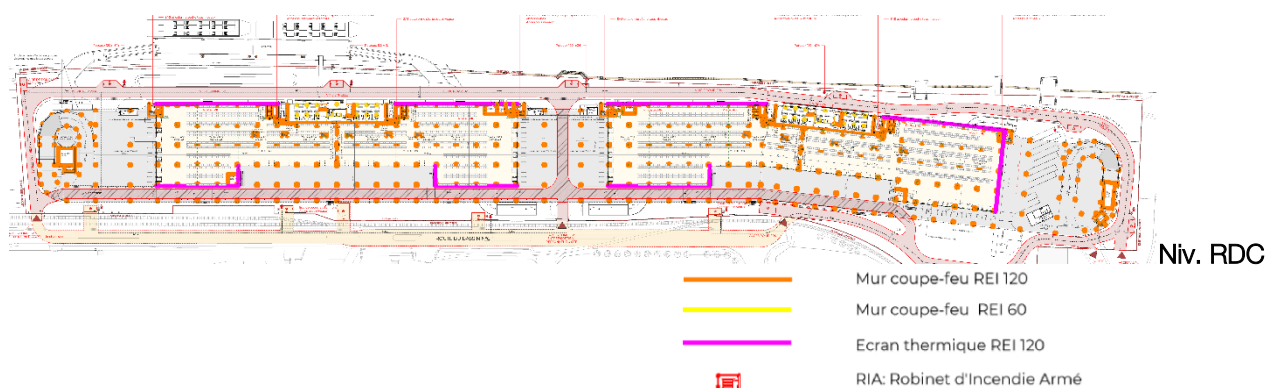


Figure 3 : Vues en plan des niveaux RDC à R+3 – Tenue au feu des parois et façades



Figure 4 : Vue en coupe transversale – Tenue au feu des planchers et façades

2.4. - DEGAGEMENT DU PERSONNEL

Chaque cellule est destinée à accueillir au plus 33 personnes au titre du personnel. Les dégagements des cellules sont conformes aux dispositions de l'annexe II de l'arrêté du 24 septembre 2020. En particulier, les dégagements sont conçus pour permettre que tout point de l'entrepôt ne soit pas distant de plus de 75 mètres effectifs (parcours d'une personne dans les allées) d'un espace protégé, et 25 mètres dans les parties de l'entrepôt formant cul-de-sac. Deux issues au moins, vers l'extérieur de l'entrepôt ou sur un espace protégé, dans deux directions opposées, sont prévues dans chaque cellule de stockage

2.5. - DESENFUMAGE DES CELLULES

Le désenfumage des cellules est assuré naturellement. Chaque cellule est découpée en quatre ou cinq cantons, d'une superficie maximale de 1650 m² et de longueur inférieure à 60 m. Les cantons sont séparés par des écrans de cantonnement SF 1/4h de hauteur minimale 1 m.

Toutes les cellules sont de profondeur inférieure à 60 m. Conformément aux dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié [14] [15] et en respect des préconisations du guide d'application de la rubrique 1510 [16], le désenfumage des cellules des niveaux RDC à R+2 est assuré par des ouvrants disposés en façade NORD et SUD, complétés de conduits de désenfumage avec en toiture des édicules équipés de grilles (cf. Figure 5). Les ouvrants situés sur la façade NORD sont positionnés de sorte de limiter les risques de transmission de l'incendie entre niveau par la façade.

Les ouvrants sont positionnés en partie haute de chaque cellule. L'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée totalisent une surface utile de 2% de la surface du canton. Les dispositifs d'évacuation de fumée sont ouverts automatiquement et asservis à la détection automatique incendie. L'amenée d'air neuf est assurée par ouverture manuelle des portes sectionnelles positionnées sur les cours camion et, pour la cellule D0, des volets positionnés en partie basse sur la façade EST. La surface des amenées d'air est équivalente à la surface utile de l'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée présents dans le plus grand canton.

Remarque : Les cellules aux niveaux RDC et R+1 des blocs A et B ne seront pas désenfumées au titre de l'article 27.2 puisqu'elles sont frigorifiques.

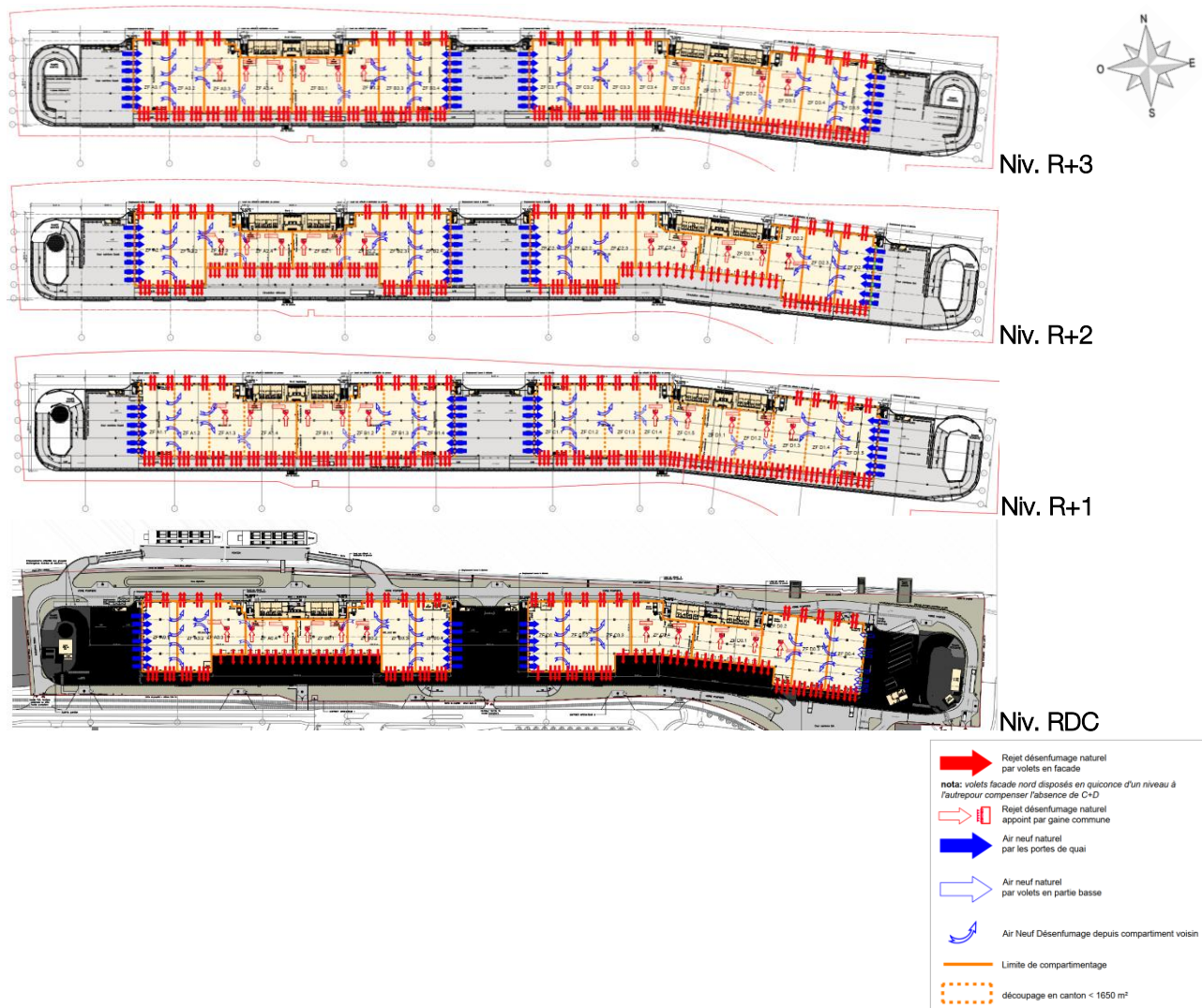


Figure 5 : Vues en plan des niveaux RDC à R+3 – Désenfumage des cellules

Le désenfumage des cellules du niveau R+3 est réalisé suivant le même principe. Les ouvrants de désenfumage sont positionnés en partie haute des façades NORD et SUD. Leur point haut se trouve à 90 cm du plafond de la cellule (cf. Figure 6). Une résille enveloppe la totalité des façades de l'établissement, elle est située entre 0,4 m et 2 m de distance par rapport à la face extérieure. Elle est ajourée et justifie de passages d'air au droit des dispositifs de désenfumage.

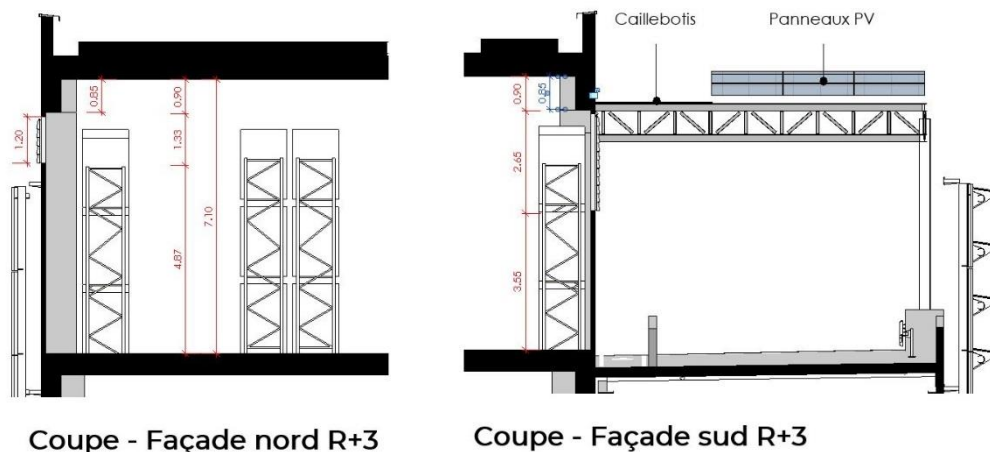


Figure 6 : Vues en coupe en façades NORD et SUD d'une cellule du R+3 – Position des ouvrants en façades

2.6. - AUTRES MESURES DE SECURITE INCENDIE

Chaque cellule est équipée d'un système d'extinction automatique d'incendie de type sprinkler conforme aux règles NFPA, y compris au niveau du parc de stationnement, des cours camions et des rampes d'accès (classe de l'entrepôt considéré à risque élevé - HHS (high hazard storage)).

Le site est équipé d'un SSI de catégorie A associé à un équipement d'alarme de type 1. Chaque cellule est surveillée par une DAI. La détection dans une cellule induit la fermeture sans temporisation des dispositifs de compartimentage et l'arrêt de la ventilation de confort. Le désenfumage est mis en œuvre manuellement depuis l'UCMC du CMSI. Le déclenchement du désenfumage (dispositifs d'évacuation de fumée) est prévu automatiquement suite à la sollicitation d'un détecteur automatique d'incendie.

Le site est surveillé en permanence par un service de sécurité H24 au poste de garde. À ce stade, il est prévu la présence permanente d'un SSIAP 2 complété par 1 SSIAP 1 (la constitution du service de sécurité sera évoquée avec les services de secours).

3. - OBJECTIFS DE SECURITE ET CRITERES DE PERFORMANCE ASSOCIES

3.1. - OBJECTIFS DE SECURITE

L'arrêté ministériel du 11 avril 2017 modifié par l'arrêté du 24 septembre 2020 fixe dans son article 1^{er} les objectifs de sécurité pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à la rubrique 1510 :

« Cet arrêté a pour objectif d'assurer la mise en sécurité des personnes présentes à l'intérieur des entrepôts, de protéger l'environnement, d'assurer la maîtrise des effets létaux ou irréversibles sur les tiers, de prévenir les incendies et leur propagation à l'intégralité des bâtiments ou aux bâtiments voisins, et de permettre la sécurité et les bonnes conditions d'intervention des services de secours. »

L'étude ayant pour objet le désenfumage de certaines cellules de l'entrepôt, les cibles auxquelles nous nous intéressons sont :

- **Les travailleurs** : ils connaissent les lieux. Ils sont sensibilisés à la sécurité incendie par la conduite d'exercices d'évacuation, aux moyens et procédures mis en œuvre en cas de départ de feu et connaissent *a priori* tous les chemins d'évacuation.
- **Les pompiers lors de leur intervention**. Ils sont formés à la lutte contre le feu. Ils sont de plus équipés de matériel permettant une intervention dans des conditions thermiques et toxiques bien supérieures à celles du public.

3.2. - CRITERES DE PERFORMANCE

Pour les travailleurs, le chapitre 8 de l'Instruction Technique n°246 propose des conditions d'atteinte du premier objectif de sécurité : *« Les cheminements sont considérés comme praticables par exemple lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :*

- *la hauteur libre de fumée est suffisante (cette hauteur est au moins égale à la moitié de la hauteur de référence ; elle est toujours plus haute que le linteau des portes et jamais inférieure à 1,80 m),*
- *le flux de chaleur reçu par les personnes est supportable ».*

La performance de la solution de désenfumage est évaluée à partir des critères quantitatifs suivants qui servent de repères à la criticité des conditions d'évacuation pour des personnes dénuées d'équipement de protection. Ils sont repris du chapitre 8 de l'IT 246 et de la référence [19] exploitée pour les Etablissements Recevant du Public :

- S'il existe une couche de fumée, alors la hauteur libre de fumée doit être supérieure à 1,80 m [IT246] et le flux de chaleur reçu par les personnes circulant sous cette couche de fumée inférieure à 2 kW/m² [19]. Si la hauteur libre est inférieure et le flux de chaleur reçu par les personnes est supérieur alors les conditions deviennent contraignantes.
- Si de la fumée est présente à hauteur d'homme, alors une température de 40°C et une valeur du coefficient d'extinction de la lumière au travers de la fumée de 0,4 m⁻¹ constituent un seuil de criticité [19].

Pour les pompiers, on retient les repères de criticité qui figurent dans les références [19] et [20] :

- S'il existe une couche de fumée, alors le flux de chaleur reçu par les pompiers circulant sous la couche de fumée doit être inférieur à 5,0 kW/m².
- Si la température à hauteur d'homme est inférieure à 100°C, les conditions sont acceptables. Si elle est supérieure, alors les conditions d'intervention des pompiers deviennent contraignantes.

4. - ANALYSE DE LA PERFORMANCE

Selon l'article 4 de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié, la présente étude a pour objet « d'assurer, dans le respect des objectifs fixés à l'article 1er, un niveau de sécurité au moins équivalent à celui résultant des prescriptions du présent arrêté, notamment en matière de risque incendie ».

La méthode d'analyse adoptée est donc « relative ». Il s'agit de s'assurer que la performance du désenfumage par la solution aménagée est conservée en comparaison à une solution de référence. Cette solution de référence est définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage. Plus en détails, cette solution de référence conserve le découpage en cantons, la surface d'évacuation de fumée calculée ainsi que la quantité et les dispositifs d'amenée d'air neuf. Elle diffère de par les dispositifs d'évacuation de fumée : ces dispositifs sont de type exutoires et disposés suivant les règles suivantes :

- Il faut prévoir au moins quatre exutoires pour 1 000 mètres carrés de superficie de toiture.
- La surface utile d'un exutoire n'est pas inférieure à 0,5 mètre carré ni supérieure à 6 mètres carrés.
- Les dispositifs d'évacuation ne sont pas implantés sur la toiture à moins de 7 mètres des murs coupe-feu séparant les cellules de stockage.

La Figure 7 représente l'implantation en toiture des exutoires établie pour la solution dite « de référence » suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié.

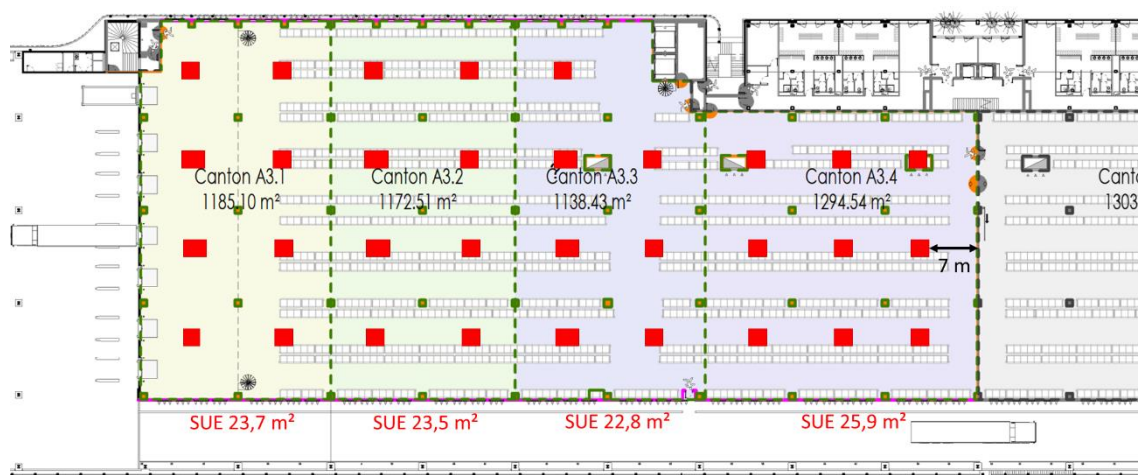


Figure 7 : Position des exutoires dans la solution de désenfumage dite « de référence »

On examine les conditions d'enfumage et les conditions thermiques pendant 2 h. Cette durée est bien supérieure à l'évacuation des travailleurs et couvrent également le début de l'intervention des pompiers.

L'étude établit la mise en sécurité des travailleurs à partir des conditions à hauteur d'homme au R+3. En particulier, la notion de mezzanine (plancher partiel ouvert sur le reste du volume) et le positionnement des escaliers aux deux extrémités permettent de considérer un éloignement du danger pour les travailleurs présents sur la mezzanine et ainsi rejoindre le R+3.

5. - SCENARIO D'INCENDIE

Il convient de souligner que la présente étude concerne spécifiquement le désenfumage des cellules du niveau R+3 de l'entrepôt. Les hypothèses prises en compte dans le cadre de cette étude peuvent donc être différentes de celles retenues pour les autres études, à savoir celle portant sur l'évaluation des flux thermiques et celle relative aux modes de ruine. Les hypothèses détaillées ci-après sont choisies de sorte d'être les plus pénalisantes vis-à-vis du désenfumage (problématique traitée). On pourra prendre pour exemple la ruine des façades. Ces façades sont considérées intègres dans la présente étude pour contraindre l'enfumage de la cellule alors que dans l'étude de flux thermiques, celles sans tenue au feu pourront être ruinées au cours de l'incendie pour maximiser les flux rayonnés sur les cibles à proximité de la cellule incendiée. On pourra aussi prendre pour exemple le délai d'ouverture des ouvrants et des portes de quais. Dans la présente étude, ceux-ci sont initialement fermés puis ouverts après un délai lié à la détection incendie. Dans l'étude de flux thermique, ceux-ci sont ouverts dès le début du feu. En conséquence, les résultats obtenus dans la présente étude ne peuvent être exploités pour évaluer l'atteinte des objectifs d'autres études, quand bien même concernant le projet Green Dock.

5.1. - CHOIX DE LA CELLULE

Les cellules des niveaux R+3 A3/B3/C3/D3 sont très similaires, de par leur géométrie, leurs dimensions, la présence d'une mezzanine, le mode de stockage en rack. Aussi, le désenfumage de ces cellules est dimensionné suivant les mêmes principes et les mêmes règles. Le désenfumage des cellules est prévu par les mêmes dispositifs, à savoir les portes pour l'amenée d'air neuf et les ouvrants en façade complétés de conduits de désenfumage pour l'évacuation de fumée. Au regard de ces similarités, il est retenu une cellule du R+3 pour réaliser les simulations numériques de développement du feu et du mouvement de la fumée. Les résultats établis sur la base de ces calculs concernent en revanche les quatre cellules du R+3. **De façon arbitraire, on retient la cellule A3 située la plus à l'OUEST.**

5.2. - FOYERS D'ETUDE

La cellule est protégée par une installation sprinkler. **On ne retient pas dans la définition du scénario la limitation de l'activité du foyer par le sprinkler ainsi que l'effet de l'aspersion d'eau sur l'activité du foyer ou sur les fumées.**

5.2.1. - DEPART DE FEU ET PROPAGATION DE L'INCENDIE

Le scénario de départ et de développement du feu est défini en exploitant la référence [21] décrivant les hypothèses de la méthode FLUMilog pour les études de flux thermiques dans les ICPE.

Le scénario retient un départ de feu au centre de la cellule de sorte de privilégier la performance de la solution de désenfumage de référence impliquant une répartition uniforme des exutoires en toiture (cf. Figure 8). Cette position est très défavorable au désenfumage proposé par le projet dans la mesure où le foyer est alors distant des évacua-



Figure 8 : Position du départ de feu

-tions de fumée en façade. Le départ de feu est positionné sur le canton A3.3 au milieu d'un rack double, en pied de rack (cf. Figure 8). La position est favorable à la solution de désenfumage de référence : le feu démarre sous un exutoire de fumée.

Le départ de feu est appliqué sur la surface de deux palettes en vis-à-vis. La source au démarrage du feu libère environ 180 kW.

La propagation du feu aux autres palettes stockées est ensuite modélisée à partir d'une température d'inflammation. **La propagation du feu aux autres palettes stockées est donc calculée par le code de calcul et non prescrite.** La température d'inflammation est prise dans la référence [21]. La valeur de 250 °C est retenue car « cela constitue une des températures d'inflammation les plus basses identifiées parmi les produits susceptibles d'être stocké [dans un entrepôt relevant de la rubrique n° 1510] ». La propagation du feu aux racks voisins est pilotée par le rayonnement thermique de la flamme et également au contact des fumées chaudes, ce par les transferts de chaleur combinés par convection et par rayonnement.

Le modèle numérique comprend des palettes sur trois niveaux, jusqu'à 6,25 m de stockage. Leurs dimensions sont définies de façon à se rapprocher de celles d'une palette type 1510 (1,25 m*0,80 m*1,50 m) tout en rattachant à la discrétisation spatiale du modèle numérique (25 cm * 25 cm * 25 cm). En reprenant les valeurs de la référence [21], la chaleur dégagée par chaque palette est prise égale à 1525 kW, sa durée de combustion est de 45 min. La chaleur dégagée par chaque palette est modélisée par un débit de chaleur surfacique d'environ 170 kW/m² de sur chaque face de la palette. La palette-type correspondant à la rubrique 1510 étant composée de matières cellulosique et plastique, le dégagement de chaleur surfacique est fixé à 300 kW/m², l'enthalpie de combustion à 25 MJ/kg et le taux de production de suie à 5%.

La référence [21] décrit les premières grandes phases de la propagation du feu. Les voici ci-après décrites en établissant la capacité du code de calcul à les prédire numériquement.

LA PHASE DE CROISSANCE ASCENDANTE.

Le feu démarrant au pied d'un rack de stockage, le feu se propage verticalement au cœur du rack, sur la hauteur de stockage (cf. Figure 9). Le mode de stockage en rack crée un effet cheminée qui favorise une montée rapide de la flamme jusqu'en partie haute du stockage. La Figure 9 présente à 5 min, la surface de palette en pyrolyse avec la solution de désenfumage proposée par le projet. La solution de référence définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié conduit à des résultats similaires. La surface en pyrolyse affiche cette forme caractéristique en V au-dessus du point d'allumage. Cette image montre que, dans les premières minutes, la propagation du feu par l'effet cheminée est bien reproduite par le code de calcul.

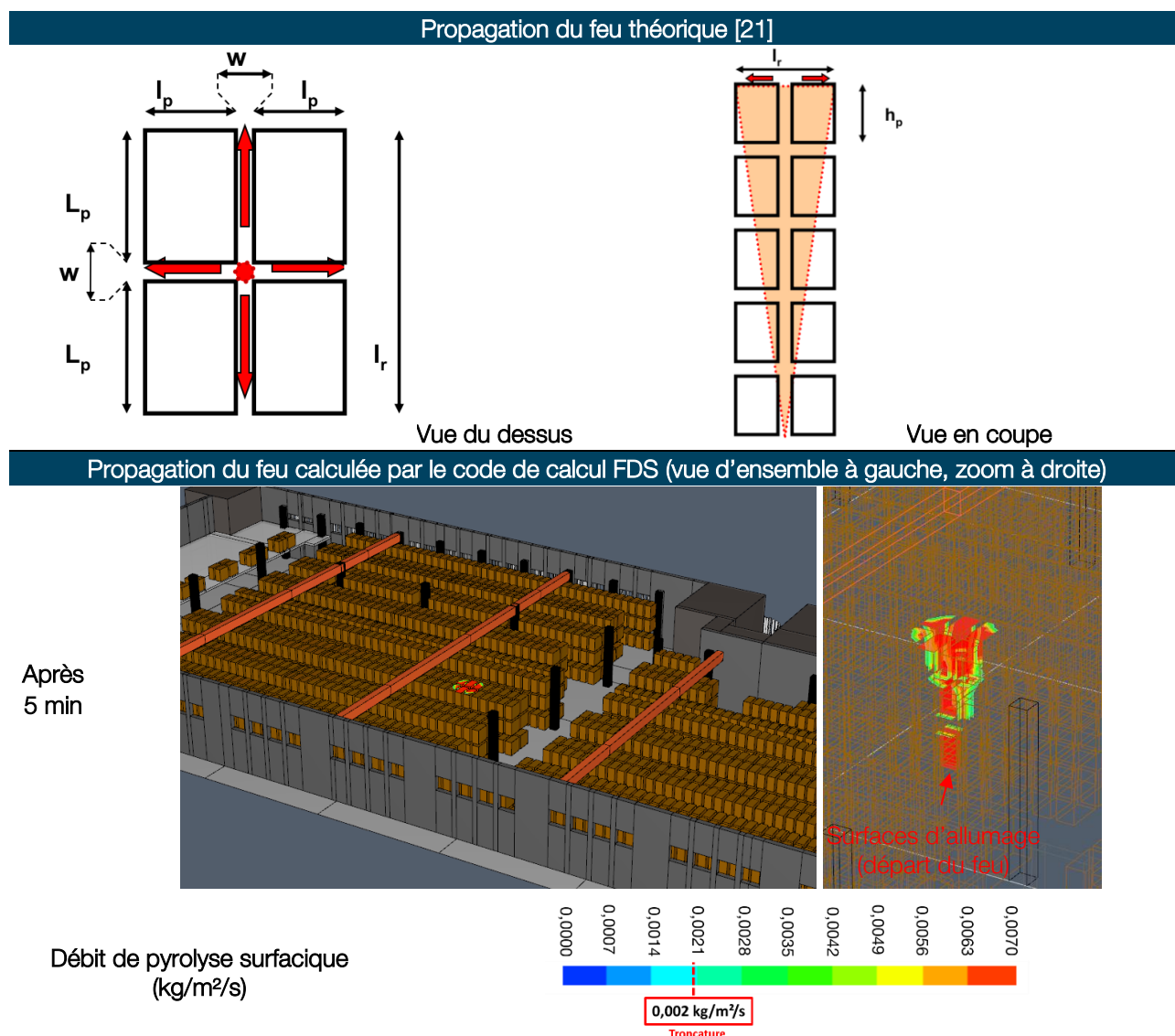


Figure 9 : Propagation du feu après le départ de feu jusqu'en partie haute du stockage [21]. La simulation numérique renvoie à la solution de désenfumage proposée par le projet. La solution de référence définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié conduit à des résultats similaires.

LA PHASE DE PROPAGATION HORIZONTALE.

Lorsque le feu atteint le sommet du rack, il entre dans une phase de propagation horizontale qui commence par le niveau le plus haut du rack (cf. Figure 10 à 9 min). La Figure 10 montre que (1) la surface en pyrolyse conserve cette forme en V et que (2) la partie supérieure du stockage qui participe au feu s'étend horizontalement de proche en proche, d'une palette à une autre.

LA PHASE DE PROPAGATION DESCENDANTE.

La surface en feu progresse ensuite vers le bas du stockage ce, depuis la partie la plus haute (cf. Figure 10 à 15 min). La Figure 10 illustre la propagation horizontale qui se poursuit et le début de la propagation descendante avec les surfaces latérales du rack qui se colorent. Aussi, cette figure montre la propagation du feu par rayonnement au rack voisin.

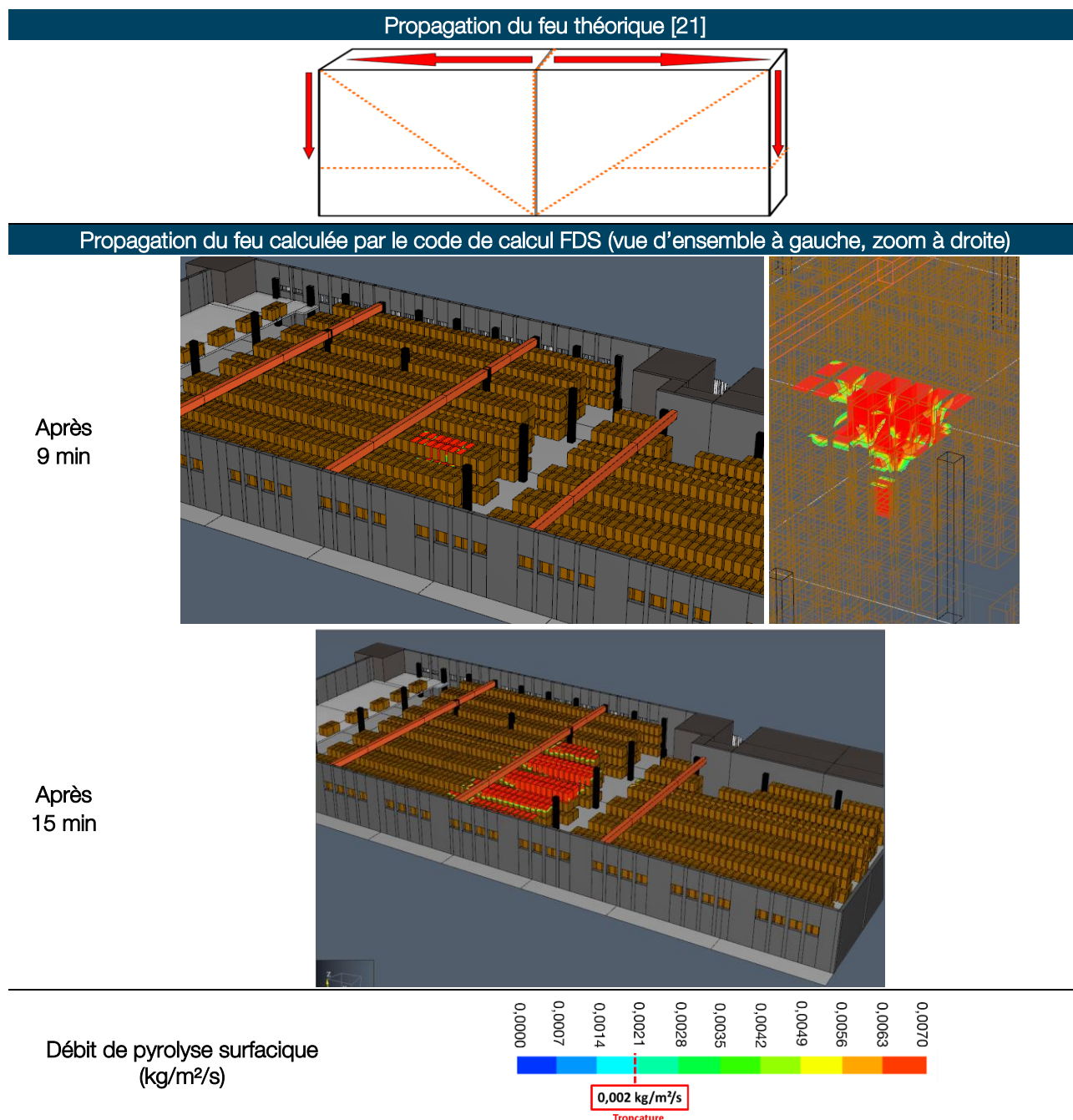
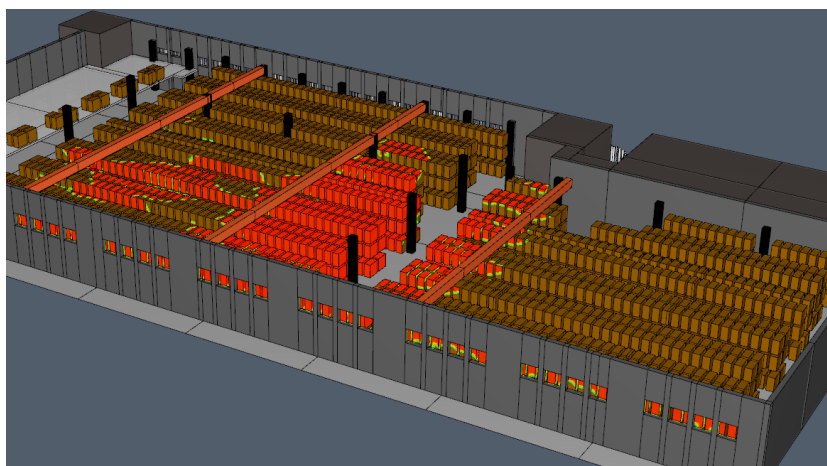


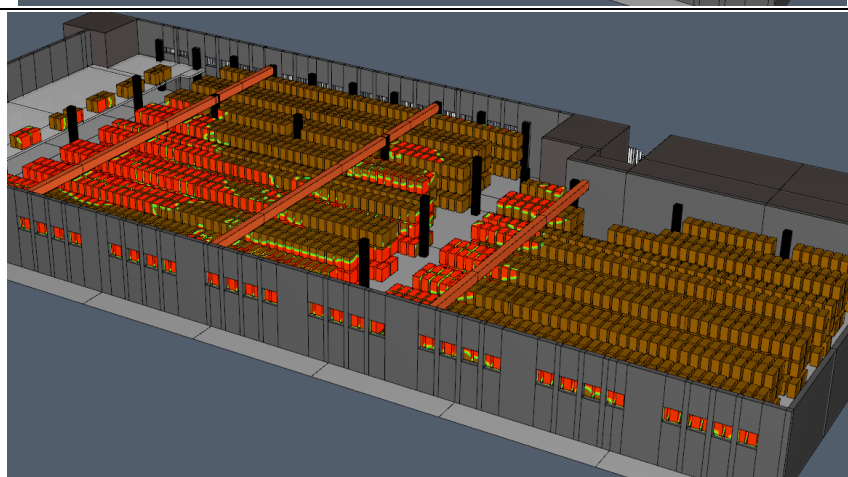
Figure 10 : Propagation du feu dans les phases de propagations horizontale et verticale [21]. La simulation numérique renvoie à la solution de désenfumage proposée par le projet. La solution de référence définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié conduit à des résultats similaires.

Il est à noter que pour les deux solutions de désenfumage, les simulations ne conduisent jamais à une propagation instantanée de la totalité de la face supérieure des racks, ni à un embrasement complet des racks au même instant. La propagation de l'incendie est évolutive, le feu s'éteint sur certaines palettes alors même que d'autres palettes plus éloignées ne sont pas encore enflammées (cf. Figure 11). Le développement du feu est certainement contraint dans le cas présent par le fait que les façades sont considérées intègres pendant la durée de l'incendie.

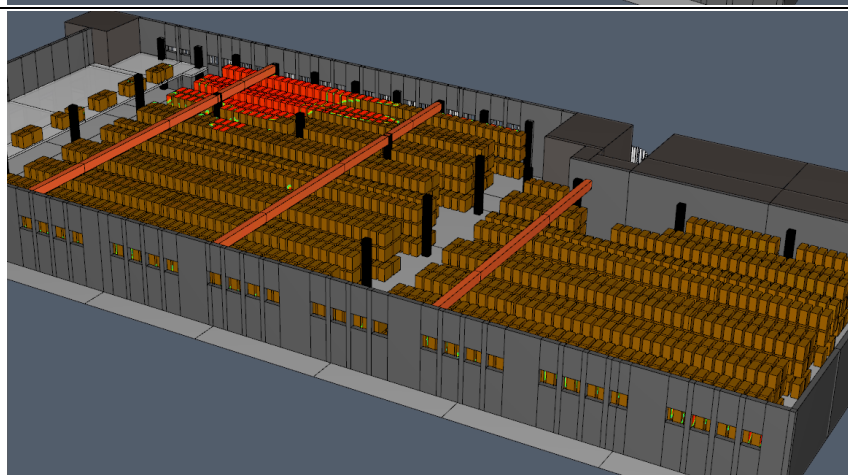
Après 30 min



Après 1h



Après 1h30



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

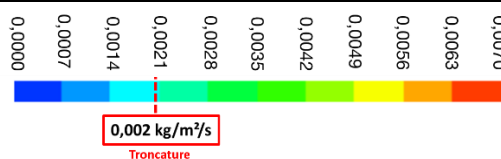


Figure 11 : Propagation du feu après 30 min, 1h et 1h30. La simulation numérique renvoie à la solution de désenfumage proposée par le projet. La solution de référence définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié conduit à des résultats similaires.

5.2.2. - MISE EN ŒUVRE DU DESENFUMAGE

Le délai de détection t_d par la DAI est estimé inférieur à la minute dans le canton sinistré A3.3, inférieur à 2 min dans les deux cantons adjacents A3.2 et A3.4 et inférieur à 4 ou 6 min dans le canton A3.1 le plus éloigné du départ de feu (cf. Chapitre 7).

Pour la mise en œuvre des dispositifs d'évacuation de fumée, s'agissant de dispositifs asservis à la détection incendie, ils sont mis en œuvre à 1 min dans le canton sinistré A3.3, à 2 min dans les deux cantons adjacents A3.2 et A3.4 et à 4 ou 6 min dans le canton A3.1 le plus éloigné du départ de feu.

Pour les portes donnant sur l'extérieur assurant l'amenée d'air neuf, on retient un délai pessimiste intégrant le délai de détection automatique d'incendie t_d (<1 min, cf. Chapitre 7.-) puis un délai pour ouvrir ces portes à pied d'œuvre (6 min). Les dispositifs de désenfumage sont donc mis en œuvre 7 min après le début du feu (cf. Chapitre 7.-).

Remarque : La méthode d'analyse adoptée dans l'étude est « relative ». Cette méthode relative (ou comparative) permet d'évaluer dans des conditions similaires (outils de modélisation, maillage, hypothèses de cinétique de développement du feu, etc.) le niveau de performance de la solution aménagée vis-à-vis d'une solution de référence. Cette solution de référence a été définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage. L'étude s'est attachée à vérifier que la performance du désenfumage par la solution aménagée est conservée en comparaison à une solution de référence. La méthode relative permet de s'affranchir des incertitudes sur les hypothèses d'étude. **Les conclusions ne sont ainsi pas tributaires de l'hypothèse d'ouverture des amenées d'air.** Par ailleurs, il convient de rappeler que les amenées d'air sont assurées par les portes sectionnelles positionnées sur les cours camion pour les cellules (hormis pour la cellule D0). Ces portes ne présentent aucune tenue au feu conventionnelle. »

5.2.3. - SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS RETENUS

Deux scénarios de feu d'étude sont retenus pour l'évaluation de la solution de désenfumage proposée par le projet. Le tableau ci-dessous précise les caractéristiques de chaque scénario.

Scénario de départ de feu et de propagation de l'incendie	Prise en compte du sprinkler	Solution de désenfumage	Mise en œuvre du désenfumage
Départ de feu : en pied d'un rack, sur le canton A3.3 au milieu d'un rack double Propagation de l'incendie aux racks voisins : Température d'inflammation de 250 °C	Non	Solution de référence	Canton A3.1 : 6 min Canton A3.2 : 2 min Canton A3.3 : 1 min Canton A3.4 : 2 min Porte de quais : 7 min
		Solution proposée par le projet	Canton A3.1 : 4 min Canton A3.2 : 2 min Canton A3.3 : 1 min Canton A3.4 : 2 min Porte de quais : 7 min

Pour tous les scénarios, la température ambiante est identique à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, elle est égale à 20°C. Les effets de vent ne sont pas pris en compte dans ces simulations.

On examine les conditions d'enfumage et les conditions thermiques pendant 2h, soit une durée bien supérieure à l'évacuation des travailleurs et couvrant également le début de l'intervention des pompiers.

6. - MODELE NUMERIQUE ET GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES

6.1. - OUTIL DE CALCUL UTILISE

Le logiciel FDS (*Fire Dynamics Simulator*) développé aux États-Unis par le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) est utilisé dans sa version 6.7 pour simuler de manière tridimensionnelle le mouvement de la fumée à l'intérieur du volume d'étude. Il repose sur un modèle de champ qui résout les équations de la mécanique des fluides par la méthode des volumes finis en s'appuyant sur un maillage spatial cartésien. Il permet la détermination fine au cours du temps de grandeurs locales (température, vitesse, composition chimique, etc.) à l'intérieur du volume d'étude au prix de temps de calculs élevés.

6.2. - MODELES NUMERIQUES

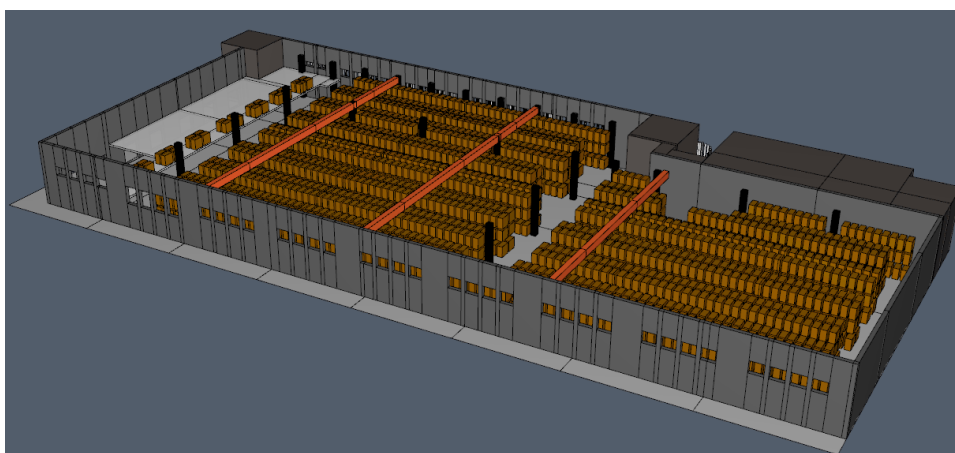
Deux modèles numériques sont construits. Ils résultent du compromis entre les possibilités du logiciel FDS, la géométrie, les dimensions de l'ouvrage et la performance des ordinateurs. Il est composé de mailles élémentaires parallélépipédiques de largeur 25 cm, de longueur 25 cm et de hauteur 25 cm. Cela conduit à près de 4 300 000 mailles.

Les deux modèles numériques représentent la cellule A3. Un aperçu des modèles est donné sur la Figure 12 pour les deux solutions de désenfumage, celle proposée par le projet avec les ouvrants en façades ainsi que deux conduits et celle respectant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié en impliquant une évacuation de fumée par des exutoires. Pour la seconde solution de désenfumage, la résille située devant les ouvrants en façade NORD est modélisée (cf. Figure 12).

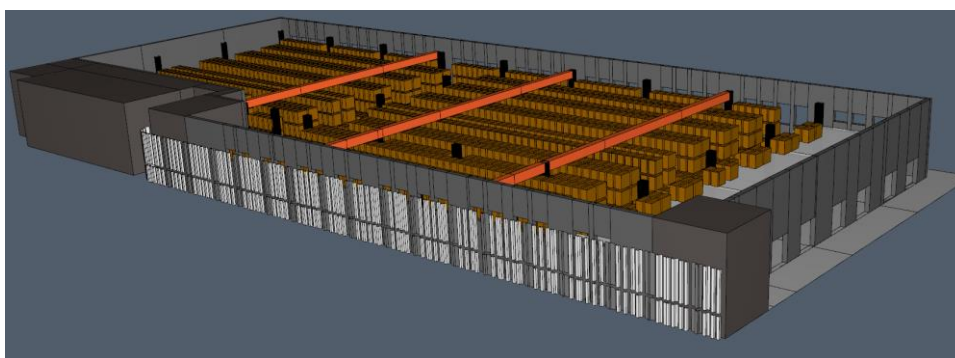
À l'intérieur de la cellule, les modèles intègrent le stockage en racks des palettes (cf. Figure 13), sur le plancher du R+3 ainsi que sur la mezzanine.

Concernant la nature des parois, le sol, les parois verticales et le plafond (non isolés) sont considérées isothermes et sont maintenues à température ambiante (20°C).

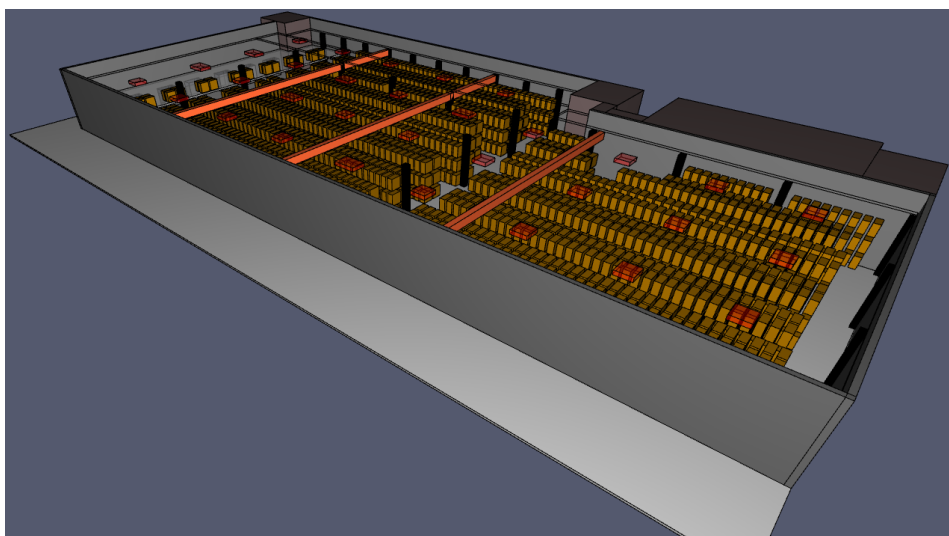
Avec la solution de désenfumage proposée par le projet



Depuis le SUD EST



Depuis le NORD OUEST



Depuis le SUD EST

Figure 12 : Aperçu des modèles numériques

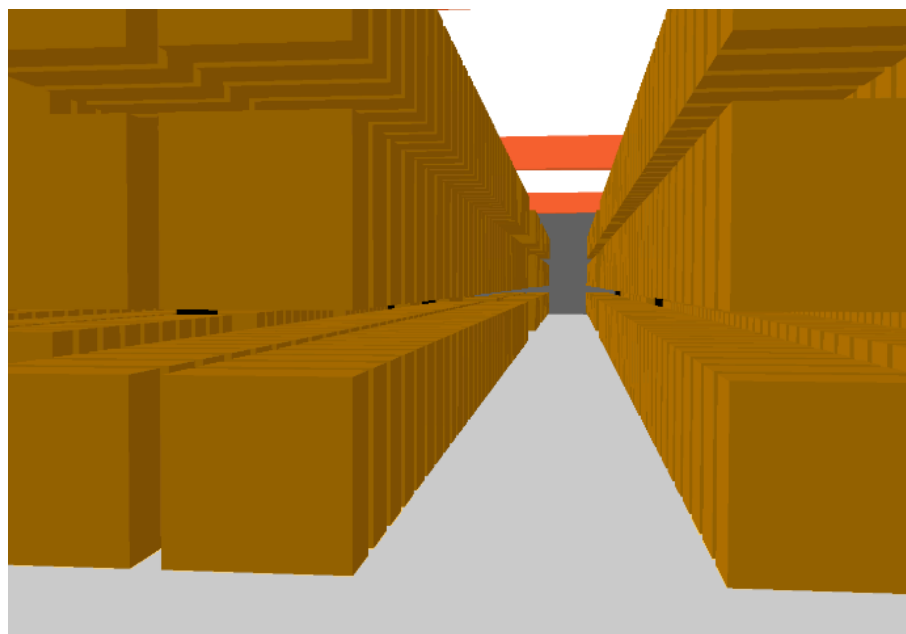


Figure 13 : Stockage en rack modélisé

6.3. - GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES

La performance de la solution de désenfumage est évaluée en exploitant les grandeurs physiques associées aux critères quantitatifs. Ces grandeurs caractérisent l'enfumage et les conditions thermiques. Elles sont calculées par le logiciel FDS dans sa version 6.6 :

- **Le champ horizontal du coefficient d'extinction** à 1 et 2 m du sol (hauteur d'homme). Cette grandeur caractérise l'enfumage. Une valeur nulle du coefficient d'extinction indique un espace libre de fumée.
- **Le champ horizontal de la température de gaz** à 1 et 2 m du sol (hauteur d'homme). Plus la température à hauteur d'homme reste proche de la valeur de la température initiale, meilleures sont les conditions.
- **Les champs verticaux de la température de gaz** pour estimer la température de la couche de fumée. Ces champs sont donnés sur les coupes identifiées sur la Figure 14.

Note : Pour estimer l'éclairement énergétique émis par les fumées (la source) et reçu par une cible (pompier), on adopte les hypothèses pénalisantes suivantes :

- Le flux surfacique reçu par la cible est égal au flux surfacique émis par la source. Autrement formulé, on fait l'hypothèse forte de négliger le facteur de forme entre la source et la cible.
- La source est assimilée à un corps noir. Le flux surfacique émis par la source est alors calculé par la relation de Stefan-Boltzmann en considérant une émissivité égale à 1 ($\phi = \sigma T^4$).

En posant ces hypothèses, le flux de chaleur de 2 kW/m² renvoie à une température de corps noir de 160 °C et le flux de chaleur de 5 kW/m² renvoie à une température de corps noir de 270 °C.



Figure 14 : Positions des champs verticaux exploités

7. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA DETECTION INCENDIE

Le délai nécessaire à la détection incendie est évalué en analysant les conditions d'enfumage et les conditions thermiques pour le scénario retenu dans les premiers instants du feu. La cellule est surveillée par des détecteurs multi-pontuels par aspiration. Ils sont positionnés sous dalle. Leur couverture répond aux exigences de la norme NF S 61-970. À ce stade de la conception, le projet n'a pas arrêté le modèle de détecteurs.

Suivant la norme NF S 61-970, un orifice de prélèvement couvrira une surface maximale de 35 m² et tout point du plafond se situera au plus à 5,9 m d'un orifice de prélèvement. Pour déterminer le seuil de sensibilité des détecteurs multi-pontuels par aspiration, plusieurs fiches techniques sont analysées. Il apparaît que 0,1 /m correspond à la valeur plus pénalisante i.e. celle qui conduit au délai de détection le plus tardif :

- La fiche technique des modèles Phénix 2A-1V/Phénix 2A-2V/Phénix 2C-1V/Phénix 2C-2V de la marque DEF indique une sensibilité comprise entre 0,0002 m⁻¹ et 0,1 m⁻¹,
- La fiche technique des modèles Titanus ProSens et TopSens de la marque SIEMENS indique une sensibilité comprise entre 0,00015 m⁻¹ et 0,01 m⁻¹,
- La fiche technique du modèle FFAST de la marque ESSER indique une sensibilité comprise entre 0,0007 et 0,0066 m⁻¹.

La Figure 15 présente les conditions d'enfumage dans la cellule A3 après 20 s puis après 40 s. À ces deux instants, l'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée sont fermés. Comme l'illustre cette figure, il ressort des résultats qu'après seulement 20 s, les conditions sont telles que la fumée aura été détectée sur huit orifices dans le canton sinistré. Autrement formulé, cette simulation montre qu'il est pertinent de faire l'hypothèse d'un délai de détection t_d dans les premiers instants du feu, **dans les trente premières secondes.**

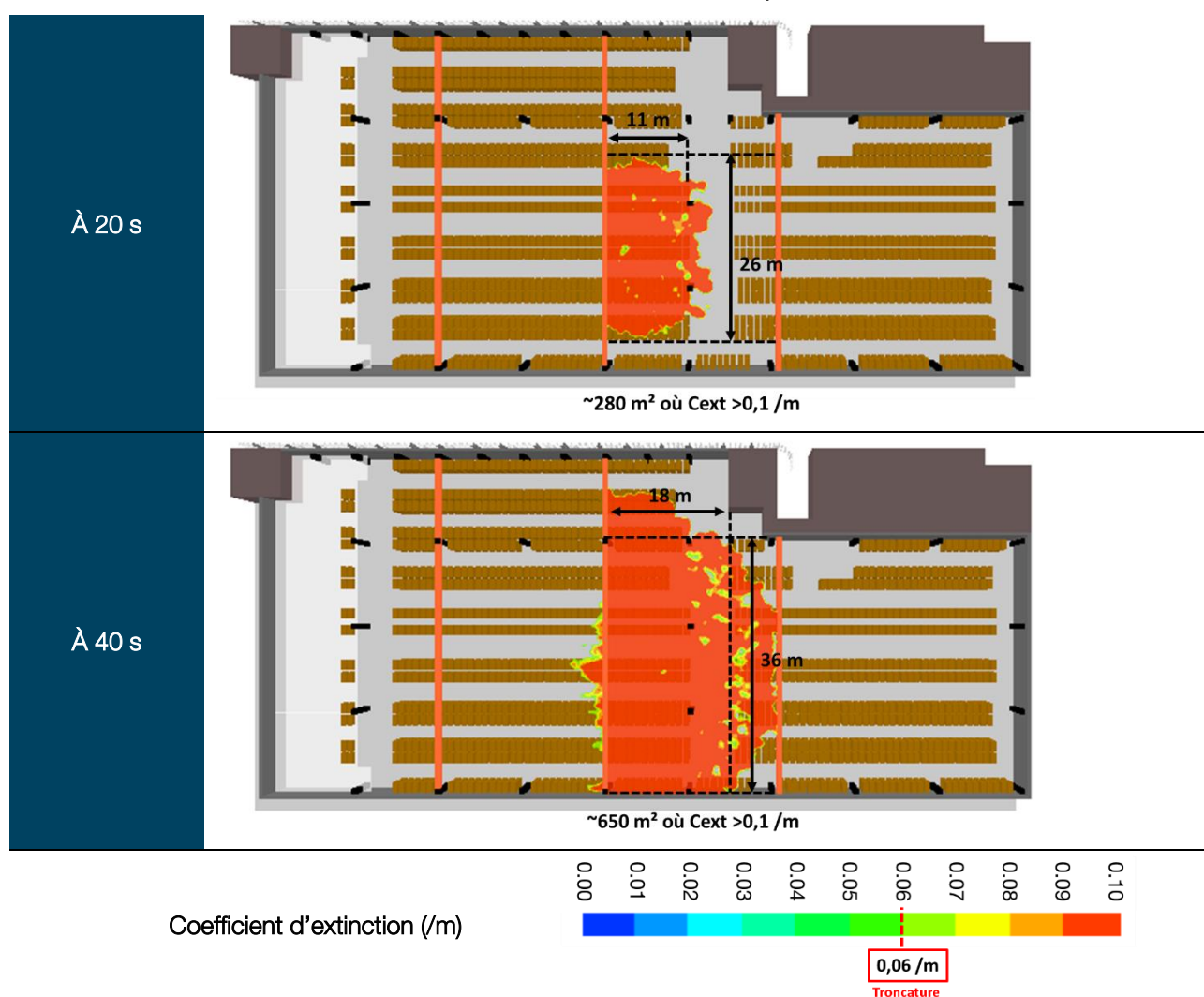
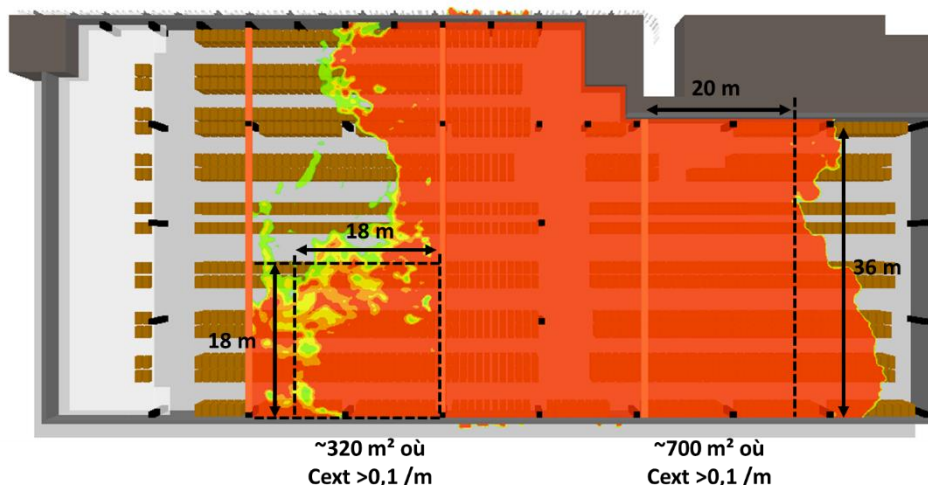


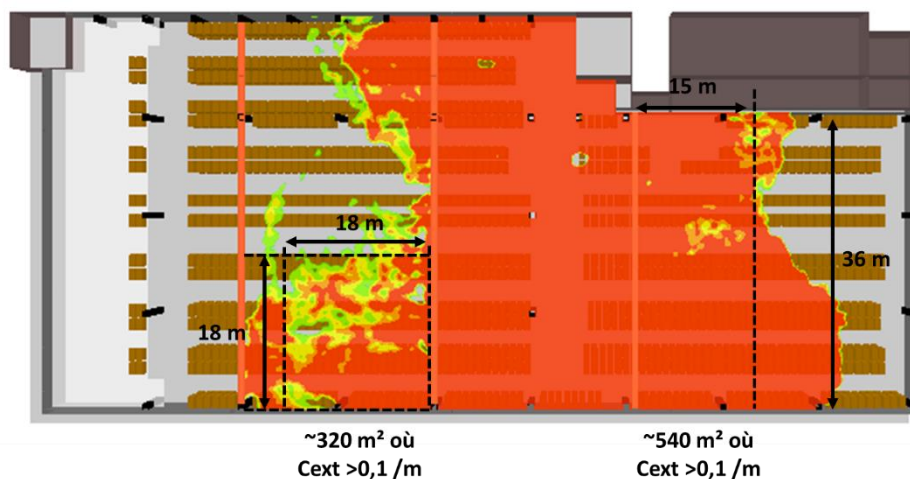
Figure 15 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 50 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 20 et 40 s

La Figure 16 présente les conditions d'enfumage dans la cellule A3 après 2 min. À cet instant, les dispositifs d'évacuation de fumée du canton sinistré A3.3 sont ouverts. Les autres dispositifs sont fermés. Comme l'illustre cette figure, il ressort des résultats qu'après 2 min, les conditions sont telles que la fumée aura été détectée sur au minimum neuf orifices dans les deux cantons adjacents au canton sinistré. **Il est retenu de façon pénalisante un délai de détection dans les 2 premières minutes dans les deux cantons adjacents au canton sinistré.**

Avec la solution de désenfumage proposée par le projet : évacuation de fumée par des ouvrants en façade complétés de conduits de désenfumage



Avec la solution de référence respectant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié : évacuation de fumée par des exutoires



Coefficient d'extinction (/m)

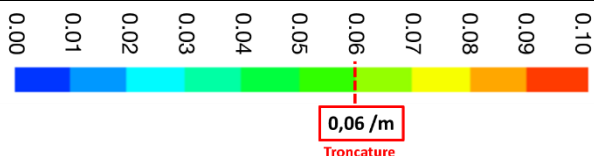
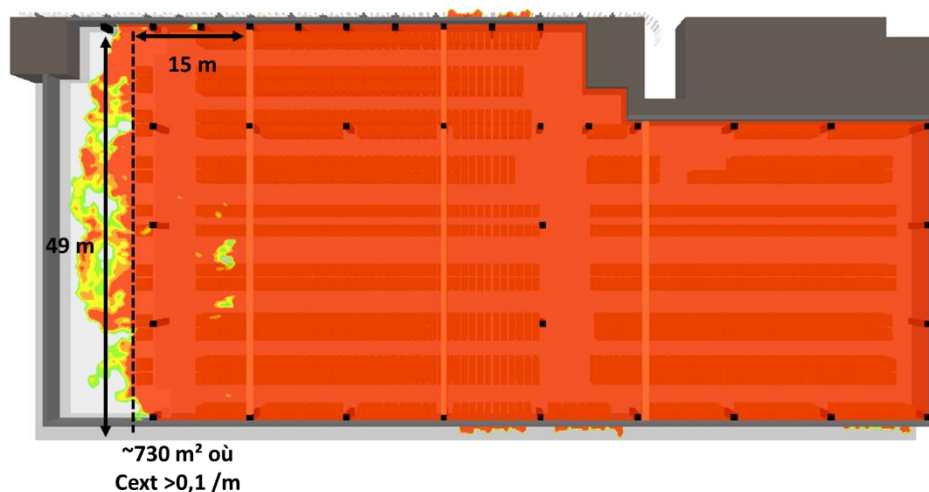


Figure 16 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 50 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 2 min

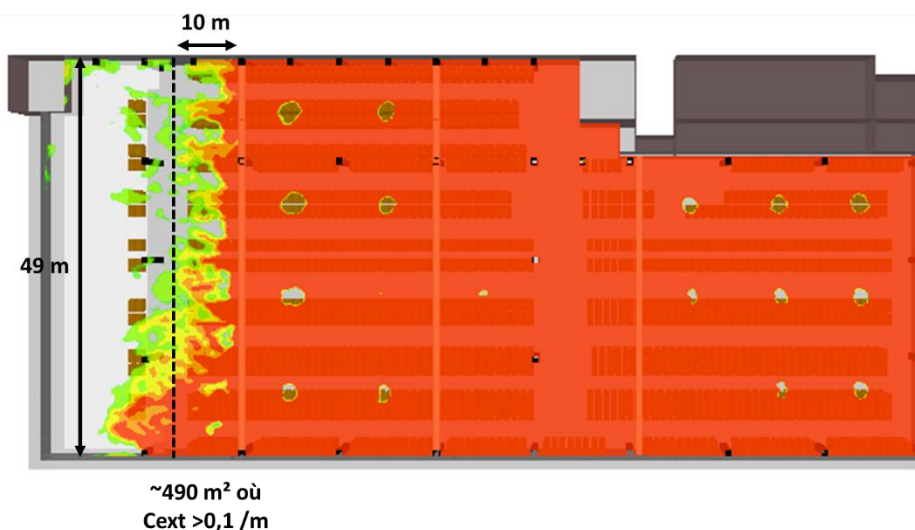
La Figure 16 présente les conditions d'enfumage dans la cellule A3 après 4 min ou 6 min. À ces deux instants, les dispositifs d'évacuation de fumée du canton sinistré A3.3 sont ouverts tout comme ceux des scénarios A3.2 et A3.4. Les dispositifs du canton A3.1 sont fermés. Comme l'illustre cette figure, il ressort des résultats qu'après 4 ou 6 min, les conditions sont telles que la fumée aura été détectée sur au minimum quatorze orifice dans le canton A3.1. Il est retenu de façon pénalisante un délai de détection t_d dans le canton A3.1 à 4 minutes pour la solution proposée par le projet et de 6 minutes pour la solution de référence.

Avec la solution de désenfumage proposée par le projet : évacuation de fumée par des ouvrants en façade complétés de conduits de désenfumage



À 4 min

Avec la solution de référence respectant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié : évacuation de fumée par des exutoires



À 6 min

Coefficient d'extinction (/m)

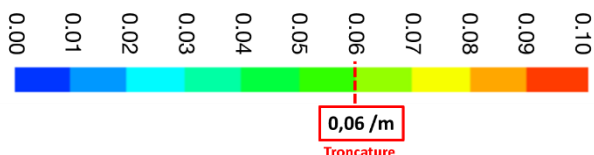


Figure 17 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 50 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 4 ou 6 min

8. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA MISE EN SECURITE DES TRAVAILLEURS

En ingénierie de la sécurité incendie, la durée nécessaire à l'évacuation ou temps de mise en sécurité des personnes est définie par la durée totale entre l'instant de départ du feu et l'instant où le dernier occupant atteint l'extérieur ou un endroit sûr, c'est-à-dire un endroit protégé des effets du feu. La durée nécessaire à l'évacuation des travailleurs peut être décomposée en trois durées qui s'additionnent et qui correspondent à des phases de l'évacuation : $t_a + t_{pm} + t_m$

- t_a = Durée écoulée entre l'instant où le feu démarre et l'instant où l'alarme est déclenchée. Cette durée comprend le délai de détection et la durée de temporisation du déclenchement de l'alarme.

- $\Delta t_{détection}$ = Compte-tenu de la détection automatique d'incendie, qui plus est assurée par des détecteurs multi-ponctuels par aspiration, cet instant est court. Il est principalement fonction de la position du départ du feu vis-à-vis du système de détection retenu. Une analyse fine des premiers instants du feu au Chapitre 7.- montre qu'il est cohérent de considérer un délai de détection inférieure à la minute. $\Delta t_{détection} = 1 \text{ min.}$

- Δt_{alarme} = Durée entre l'instant de détection du feu et l'instant où l'alarme sonore est déclenchée. C'est à cet instant au plus tard que les travailleurs présents dans les cellules ont l'information du départ du feu.

L'établissement est équipé d'un SSI de catégorie A, associé à un équipement d'alarme de type 1. Le délai de levée de doute est nul. $\Delta t_{alarme} = 0 \text{ min}$

- $\Delta t_{pré-mouvement}$ = Durée entre l'instant de déclenchement de l'alarme et l'instant de mise en mouvement des personnes pour évacuer. Le délai de pré-mouvement est estimé à 1 min compte-tenu de la formation du personnel (art. R. 4227-39 du Code du Travail). $\Delta t_{pré-mouvement} = 1 \text{ min}$

- $\Delta t_{mouvement}$ = Durée entre l'instant où le personnel se met en mouvement pour évacuer et l'instant où il est à l'extérieur du bâtiment ou à l'intérieur d'un endroit sûr. Cette durée est estimée à 1 min 15 s, cette estimation est détaillée ci-après par le biais de deux outils différents.

Le temps de mise en sécurité des travailleurs est ainsi estimé à 3 min 15 s ($\Delta t_{détection} 1 \text{ min} + \Delta t_{alarme} 0 \text{ min} + \Delta t_{pré-mouvement} 1 \text{ min} + \Delta t_{mouvement} 1 \text{ min } 15 \text{ s}$).

Remarque : Estimer la durée de mise en sécurité des travailleurs en sommant ces trois temps est très pénalisant. En effet, cette approche suppose que le personnel quitte la cellule, seulement à partir de l'instant d'émission du signal sonore de l'alarme. Or, il peut être admis que, dans la réalité, la fumée produite est rapidement visible du personnel à proximité du foyer. Ainsi, les travailleurs ont conscience d'un danger et peuvent d'évacuer avant déclenchement de l'alarme générale.

**** ESTIMATION DE LA DUREE NECESSAIRE AU DEPLACEMENT DES PERSONNES

Les portes des escaliers encoignés et des sorties/issues utilisées pour l'évacuation des travailleurs sont repérées sur la figure ci-dessous par des cercles en pointillés bleus. Les 33 personnes présentes ont la possibilité d'évacuer par quatre dégagements, de largeur 1 UP et comportant un vantail de porte.



Pour estimer la durée nécessaire au déplacement des personnes, deux méthodes de calcul sont retenues. La première méthode est analytique (il s'agit d'un calcul « à la main »), elle retient les hypothèses de l'art. GA 23 concernant la vitesse déplacement et les débits aux points de congestion. La seconde méthode utilise la simulation dynamique du déplacement des personnes.

Pour le calcul de la durée nécessaire au déplacement des personnes par la méthode analytique, en considérant que l'ensemble des personnes présentes participe à la congestion au droit d'un dégagement, le temps d'attente à ce dégagement est de 39,6 s (33 personnes pour 50 personnes/min). Or, en posant que les travailleurs sont

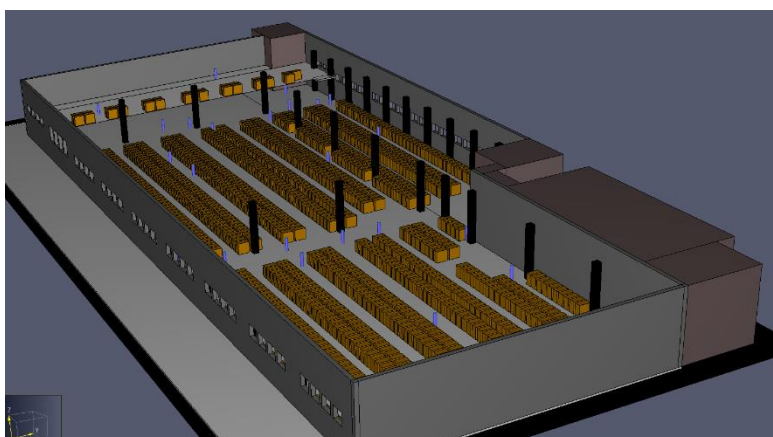
répartis uniformément dans la cellule, le parcours des personnes les plus éloignées est de 75 m, le déplacement d'une personne seule est donc au plus de 75 s.

L'effectif présent et la distance d'éloignement des travailleurs par rapport aux dégagements sont tels que le temps de mise en sécurité des travailleurs est lié au déplacement de la ou des personnes les plus éloignées sur le niveau et non au temps de congestion aux dégagements. **Les 33 personnes présentes ont donc évacué la cellule 75 s après le début de la phase de déplacement.**

Pour le calcul de la durée nécessaire au déplacement des personnes par la simulation dynamique, le logiciel Pathfinder dans sa version 2021 est exploité. Il s'agit d'un modèle Multi-Agents. L'environnement dans lequel se déplacent les individus est défini spatialement à partir d'une représentation géométrique et dimensionnelle du bâtiment/niveau. La représentation de l'espace est continue. Le déplacement suit une trajectoire continue réelle par opposition à un déplacement discret sur une grille. Le modèle de calcul « steering », utilisé dans le cadre de la présente étude, est détaillé dans l'article « Inverse steering behaviors for Autonomous Characters » de Henri Ben Amor. Le déplacement de chaque individu est suivi le long de sa trajectoire. Le modèle détermine ainsi au cours du temps la densité locale au droit de chaque individu en considérant la notion de module piéton développé par Fruin. Cette notion correspond à l'espace qu'occupe un individu auquel s'ajoute un espace individuel de confort que chaque individu cherche à préserver par rapport à ses voisins. La densité locale est exploitée pour déterminer la vitesse de déplacement de l'individu (vitesse de déplacement). L'individu se déplace vers son but en maintenant une distance avec les autres individus et en gérant les collisions avec les autres individus et d'éventuels obstacles (murs, portes).

La simulation dynamique de l'évacuation requiert de créer tous les espaces sur lesquels les individus se déplacent pour rejoindre une « zone hors sinistre » depuis leur position initiale. Cette zone de circulation est représentée en bleu sur les figures ci-dessous.

La figure ci-contre donne un aperçu du modèle numérique ; les occupants sont représentés par des cylindres. Ils sont répartis au prorata de la surface de plancher : 4 personnes pour la mezzanine et 29 personnes pour le niveau R+3. L'effectif est réparti de façon aléatoire sur le plancher de la mezzanine et sur celui du niveau R+3.



Les personnes évacuent en empruntant les dégagements répondant aux dispositions réglementaires. Les personnes ont toutes les mêmes caractéristiques et le même comportement. Il n'y a pas de comportement individuel : personne ne rebrousse chemin, les personnes empruntent les dégagements dans une seule direction. De plus, chaque personne a connaissance de la distance qui la sépare des différentes issues du niveau sur lequel elle se trouve ainsi que de leur congestion. Dans une certaine mesure, cela traduit les dispositions de l'article R143-4 du Code de la Construction et de l'Habitation : « Les bâtiments et les locaux où sont installés les établissements recevant du public doivent être construits de manière à permettre l'évacuation rapide et en bon ordre de la totalité des occupants, ou leur évacuation différée si celle-ci est rendue nécessaire. »

Les résultats de la simulation montrent l'absence de congestion dans la cellule au droit des dégagements. Dans cette simulation dynamique, **les 33 personnes présentes ont évacué la cellule 59 s après le début de la phase de déplacement. Ce temps est cohérent avec la méthode analytique. Il est retenu, de façon pénalisante, un temps de déplacement de 1 min 15 s dans la durée de mise en sécurité des personnes.**

Pour les personnes présentes sur la mezzanine, les résultats de la simulation montrent également l'absence de congestion au droit des escaliers. Dans cette simulation dynamique, les 4 personnes ont évacué la mezzanine 35 s après le début de la phase de déplacement.

9. - ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION

9.1. - PROPAGATION DE L'INCENDIE

Pour rappel, la propagation de l'incendie aux autres palettes stockées est calculée par le code de calcul et non prescrite. Chaque solution de désenfumage impactant les conditions thermiques dans une cellule, la propagation de l'incendie diffère donc potentiellement suivant la solution de désenfumage, de référence (définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage – évacuation de fumée par exutoires) ou proposée par le projet (évacuation de fumée par ouvrants en façade complétés de conduits de désenfumage).

La figure ci-dessous présente l'évolution de la puissance libérée par le feu pour les deux solutions de désenfumage. Cette figure montre que le développement de l'incendie dans la cellule est très similaire avec les deux solutions de désenfumage sur les deux premières heures. Le feu s'étend sur le rack initial et également sur les racks voisins suivant les principales phases de la propagation du feu définies dans la référence [21]. La vitesse de propagation de l'incendie est sensiblement plus rapide avec la solution proposée par le projet dans les trente premières minutes qu'avec la solution de référence définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage (solution avec exutoires en toiture). Ensuite, après 30 minutes, la puissance du feu évolue peu et sa valeur maximale est du même ordre de grandeur quelle que soit la solution de désenfumage. A noter qu'elle est sensiblement plus élevée avec la solution de référence.

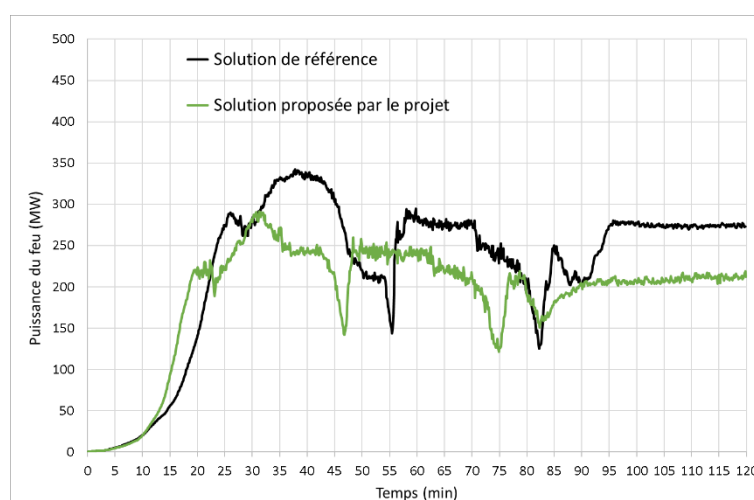


Figure 18 : Evolution temporelle de la puissance libérée par l'incendie sur 2 h. Cette puissance est calculée par le code de calcul pour chacune des deux solutions de désenfumage

La figure ci-après zoom sur l'évolution de la puissance libérée par le feu pendant les 10 premières minutes. Également sur cette figure, est représentée une cinétique de développement dite « rapide » et une autre dite « moyenne » au sens de la terminologie SFPE. Cette figure montre que la vitesse de propagation de l'incendie est semblable entre les deux solutions de désenfumage pendant les dix premières minutes et la courbe de débit calorifique se rapproche de la cinétique théorique « rapide ».

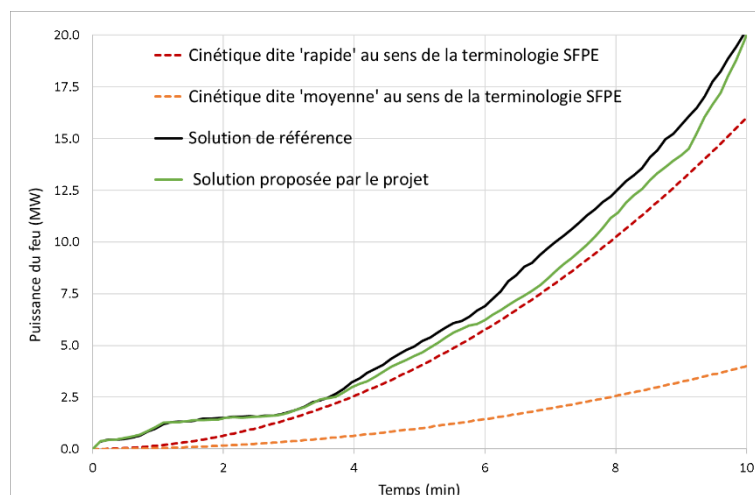


Figure 19 : Zoom sur l'évolution temporelle de la puissance libérée par l'incendie sur les 10 premières minutes. Cette puissance est calculée par le code de calcul pour chacune des deux solutions de désenfumage

9.2. - CONDITION D'EVACUATION DES TRAVAILLEURS

Pour rappel, le temps de mise en sécurité des travailleurs est estimé à 3 min 15 s ($\Delta t_{détection}$ 1 min + Δt_{alarme} 0 min + $\Delta t_{pré-mouvement}$ 1 min + $\Delta t_{mouvement}$ 1 min 15 s). Sur les 9 premières minutes de l'incendie (soit quasiment trois fois le temps pour mettre en sécurité les travailleurs), l'analyse des résultats permet d'établir que :

- Quelle que soit la solution de désenfumage, les écrans de cantonnement ne permettent pas de cantonner la fumée au canton sinistré. Après seulement 2 minutes, de la fumée est présente sous plafond dans les deux cantons voisins (cf. Figure 16). Après 6 min, de la fumée est présente sous le plafond sur l'ensemble des cantons de la cellule (cf. Figure 17).
- Les conditions d'enfumage à hauteur d'homme du R+3 sont telles que le R+3 reste libre de fumée (cf. Figure 20). Aussi, la température à 2 m du sol reste proche de la valeur ambiante (cf. Figure 21). Les conditions d'enfumage et les conditions thermiques à hauteur d'homme restent donc compatibles avec une mise en sécurité des travailleurs sur le niveau R+3.

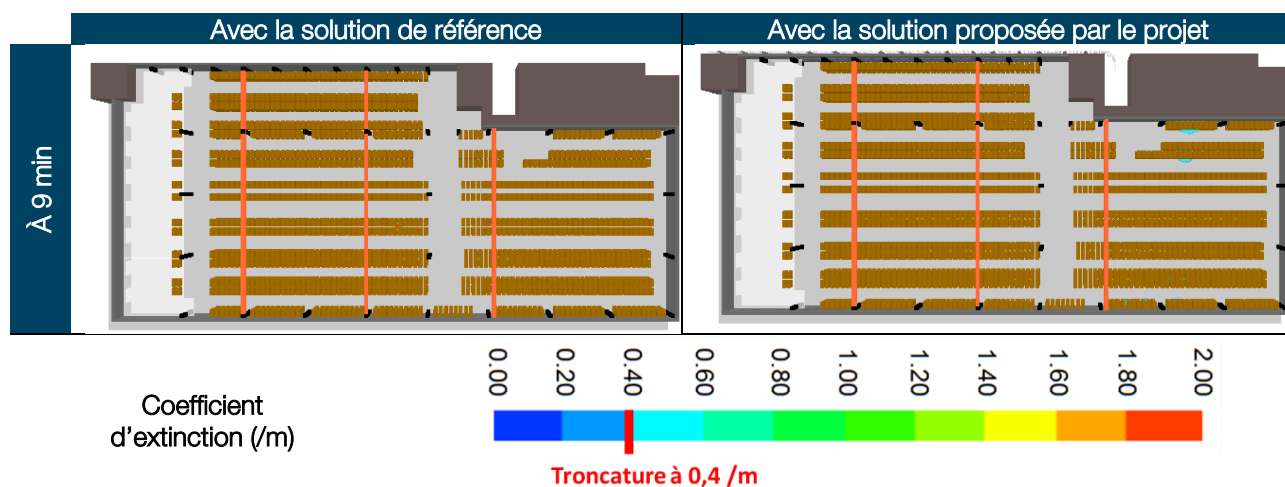


Figure 20 : Vue en plan du R+3 à 9 min à 2 m du sol – Conditions d'enfumage à hauteur d'homme

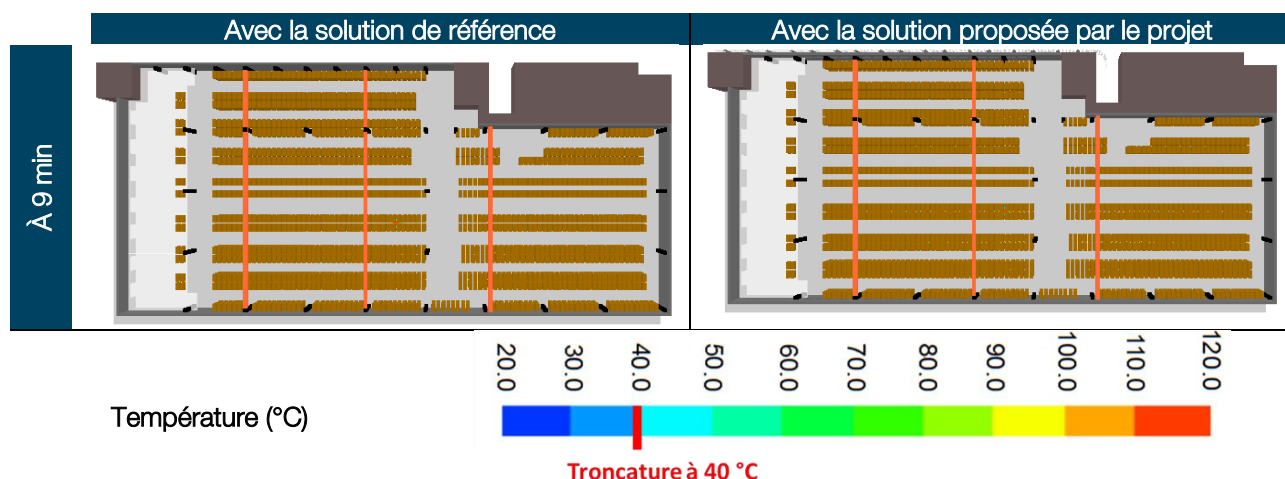
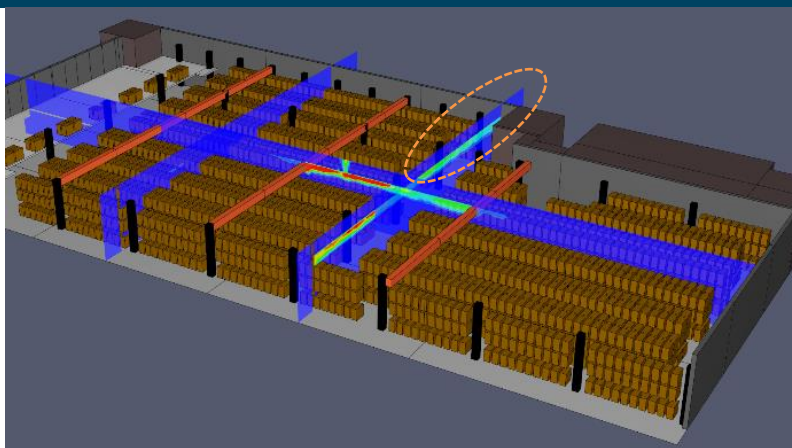


Figure 21 : Vue en plan du R+3 à 9 min à 2 m du sol – Conditions thermiques à hauteur d'homme

- La température de la couche de fumée est relativement faible au regard du rayonnement thermique vis-à-vis des travailleurs amenés à évacuer. Excepté au-dessus des palettes en feu, la température de la couche de fumée est restée inférieure à 160°C dans le canton sinistré A3.3 (cf. partie entourée par un pointillés orange sur la Figure 22). Dans les autres cantons A3.1, A3.2 et A3.4, la température de la couche de fumée est au maximum de 40 à 60°C (cf. coupes plus éloignées sur la Figure 22).

À 9 min - Avec la solution de référence



À 9 min - Avec la solution proposée par le projet

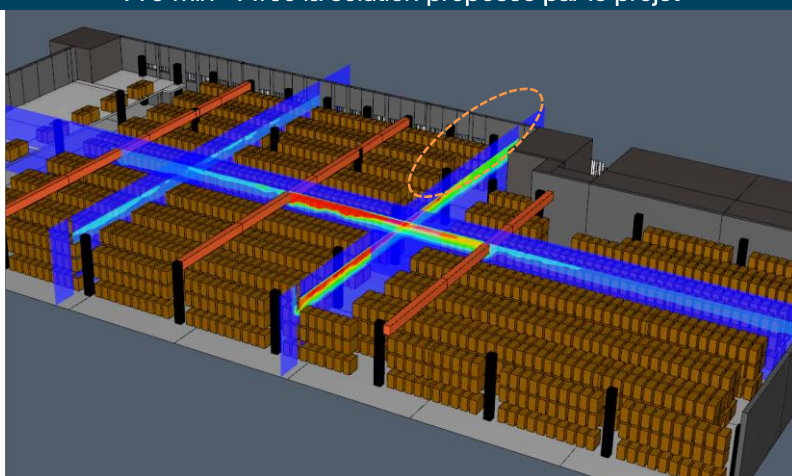


Figure 22 : Vues en coupe – Conditions thermiques à 9 min. Pour aider à la visualisation des conditions dans la cellule, la façade NORD n'est pas représentée.

Au R+3, les valeurs seuils caractérisant la praticabilité des cheminements ne sont donc jamais dépassées pendant la durée de mise en sécurité des travailleurs. En particulier, ils ne sont pas dépassés au droit des sorties et au niveau des accès aux escaliers protégés. En conséquence, l'analyse des résultats conduit à établir que la solution proposée par le projet permet d'atteindre des résultats au moins équivalents à ceux de la solution de référence à laquelle elle se substitue.

9.3. - CONDITION D'INTERVENTION DES POMPIERS

Les conditions d'intervention des pompiers sont évaluées à quatre instants : lorsque la puissance du feu est maximale (35 min pour la solution proposée par le projet et 40 min pour la solution de référence), 1h, 1h30 et 2h après le début du feu. L'analyse des résultats permet d'établir que :

- Lorsque la puissance du feu libérée dans la cellule est maximale i.e. une trentaine de minutes après le départ de feu, la température à 1 m du sol est contraignante pour les pompiers, elle excède 100°C ou tout du moins avoisine 100°C, sur la quasi-totalité de la surface de la cellule (cf. Figure 23).
- La température de la couche de fumée est élevée au regard du rayonnement thermique vis-à-vis des pompiers. Elle peut excéder 320 °C sur une surface correspondant à deux cantons (cf. Figure 24).

En résumé, pour les deux solutions de désenfumage, les conditions d'intervention sont rapidement contraignantes dans la cellule, tant par la température de la fumée au contact des pompiers (à 1 m du sol) que du rayonnement thermique des fumées. Aussi, une partie des gaz de pyrolyse est brûlée à l'extérieur de la cellule, ce qui conduit à un risque lors de la pénétration des pompiers dans la cellule.

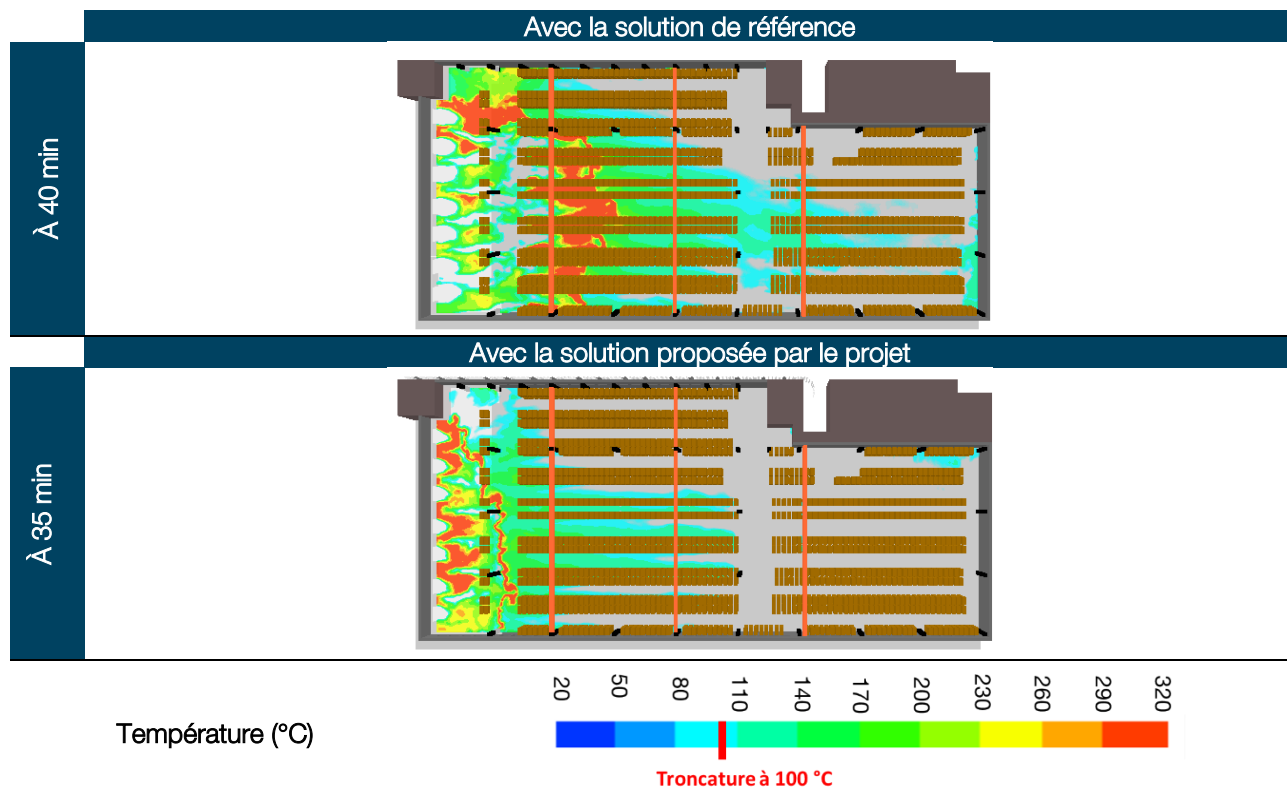
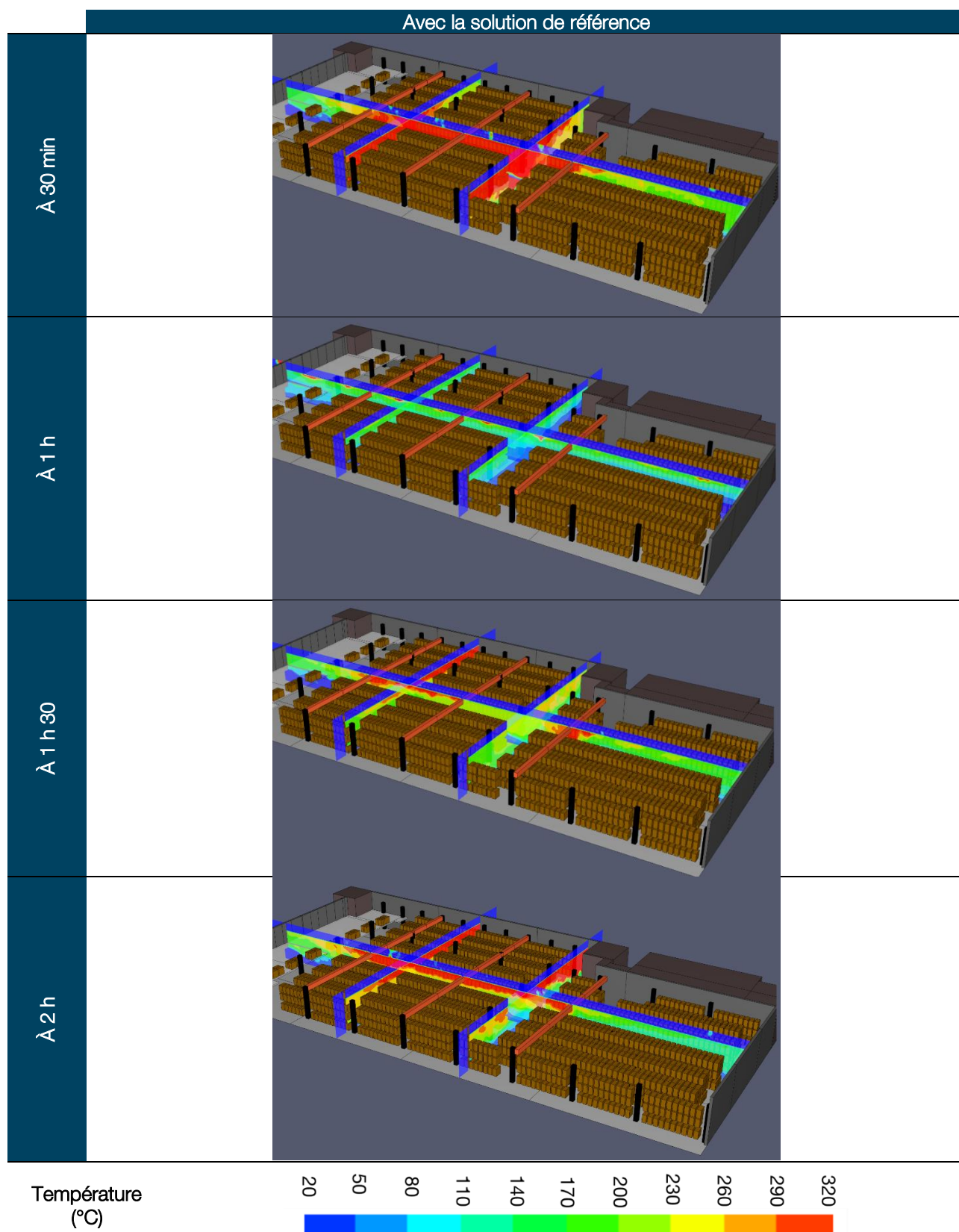


Figure 23 : Vue en plan du R+3 à 1 m du sol – Conditions thermiques à hauteur d'homme



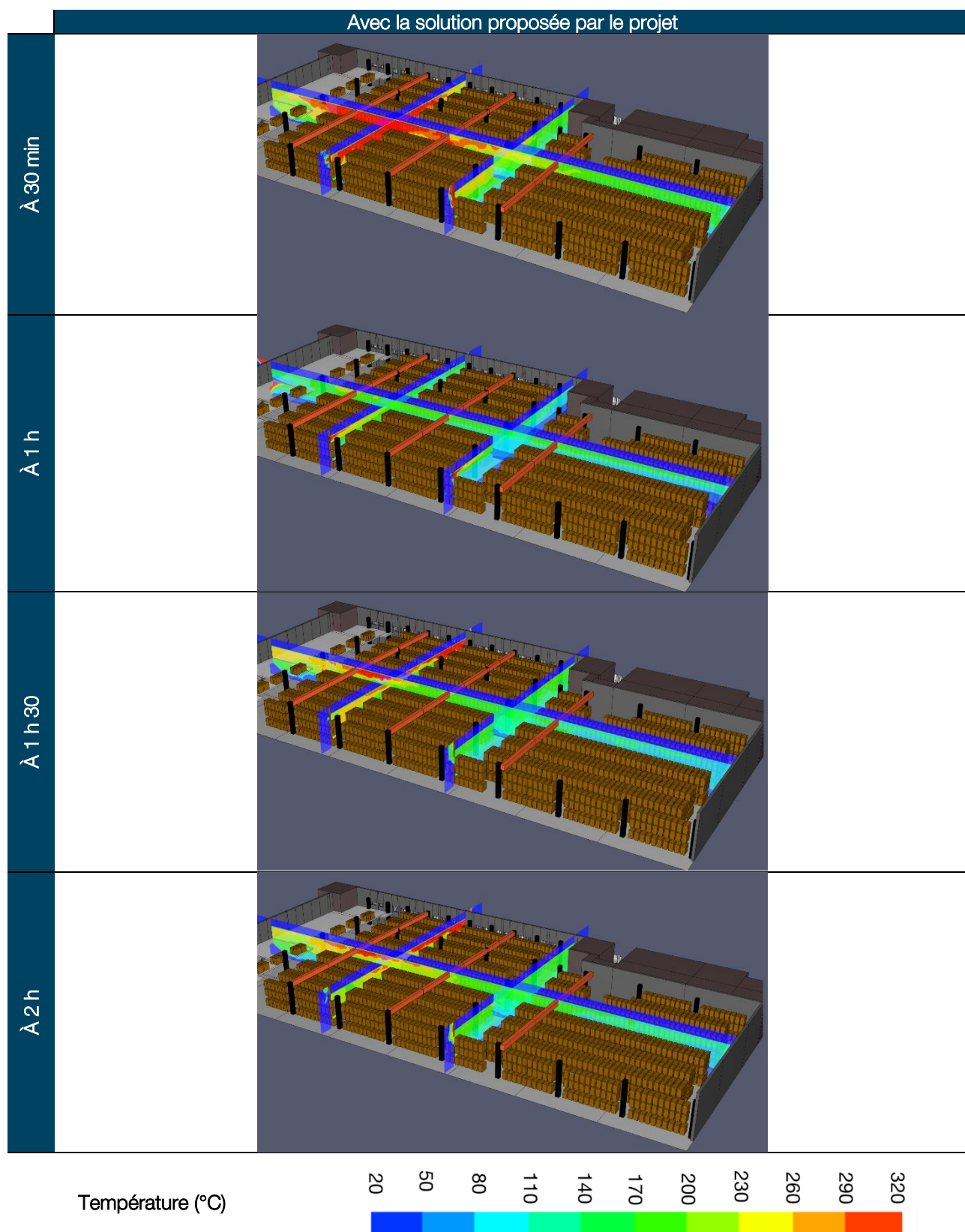


Figure 24 : Vues en coupe – Conditions thermiques. Pour aider à la visualisation des conditions dans la cellule, la façade NORD n'est pas représentée

10. - SYNTHÈSE ET CONCLUSION DE L'ÉTUDE

La présente étude d'ingénierie incendie est réalisée dans le cadre du projet de construction d'une plateforme logistique urbaine multimodale sur le site du port Autonome de Gennevilliers, sis Route du Bassin n°6. Le projet de construction comprend un bâtiment industriel à usage d'entrepôt à niveau, un parc de stationnement en infrastructure et des zones de bureaux liées à l'activité d'entrepôt.

Le bâtiment industriel à usage d'entrepôt relève de la rubrique 1510-2b (entrepôt de matière combustible) sous le régime de l'enregistrement. À titre indicatif, certaines cellules de l'entrepôt (au RDC et au R+1 des blocs A et B) sont prévues pour être éventuellement frigorifiques d'une température inférieure à 10°C.

La présente étude est conduite en application de l'article 4 de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017. Elle concerne le désenfumage des cellules du niveau R+3, sous toiture. Ces cellules sont prévues désenfumées suivant le même principe que les cellules des niveaux inférieurs. À savoir, elles sont désenfumées naturellement par des ouvrants disposés en façades NORD et SUD et des conduits de désenfumage. Or, cela constitue un écart à l'article 5 de l'annexe II de l'arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017. En effet, cet article n'introduit pas explicitement la possibilité pour les entrepôts multiniveaux de désenfumer les cellules des niveaux sous toiture par des ouvrants en façade plutôt que par des exutoires.

La méthode d'analyse adoptée dans l'étude est « relative ». Cette méthode relative (ou comparative) permet d'évaluer dans des conditions similaires (outils de modélisation, maillage, hypothèses de cinétique de développement du feu, etc.) le niveau de performance de la solution aménagée vis-à-vis d'une solution de référence. Cette solution de référence a été définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage. L'étude s'est attachée à vérifier que la performance du désenfumage par la solution aménagée est conservée en comparaison à une solution de référence. La méthode relative permet de s'affranchir des incertitudes sur les hypothèses d'étude. Les conclusions ne sont ainsi pas tributaires de certaines hypothèses, dont notamment la date d'ouverture des amenées d'air.

La présente étude permet d'établir que

- La solution de désenfumage proposée par le projet permet d'assurer des conditions compatibles avec la mise en sécurité des travailleurs présents dans la cellule.
- En cas de défaillance de l'extinction automatique à eau sprinkler, en considérant les façades intègres (non ruinées), les conditions d'intervention des pompiers sont rapidement contraignantes dans la cellule, tant par la température de la fumée au contact des pompiers (à 1 m du sol) que du rayonnement thermique des fumées. Les conditions d'intervention des pompiers sont donc contraignantes dans la cellule. Aussi, une partie des gaz de pyrolyse est brûlée à l'extérieur de la cellule, ce qui conduit à un risque lors de la pénétration des pompiers dans la cellule. Les conditions d'intervention des pompiers sont contraignantes à la fois avec la solution de désenfumage proposée par le projet (solution aménagée) et également avec une solution de référence répondant définie suivant les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié relatives au désenfumage.

En conséquence, la présente étude établit que l'aménagement des dispositions permet d'atteindre un niveau de sécurité au moins équivalent à celui résultant des prescriptions dudit arrêté ce, vis-à-vis des objectifs fixés à l'article 1^{er} de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017.



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 227315 - 2787068 - v2.0

20/03/2024

Tierce expertise de l'étude des flux thermiques du projet Green Dock

LABORATOIRE D'INGENIERIE DE LA SECURITE INCENDIE

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 toute autre modification qui y serait apportée. 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 : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : GENTILHOMME Olivier - LEROY GUILLAUME

Vérification : TRUCHOT BENJAMIN

Approbation : Document approuvé le 20/03/2024 par BOUET REMY

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Contexte de l'étude	5
1.2	Eléments contractuels	5
1.3	Objectif de l'étude	6
2	Remarques préliminaires	7
3	Retour de l'Ineris	8
3.1	Contexte et objectif de l'étude	8
3.2	Présentation du projet	8
3.3	Critère d'évaluation des effets thermiques	11
3.4	Méthodologie, outil de calcul et hypothèses retenues	12
3.4.1	Prise en compte du caractère multi-niveaux de l'entrepôt	12
3.4.2	Hypothèses retenues	13
3.5	Résultats de calcul	17
4	Synthèse	18

Pour citer ce document :

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Tierce expertise de l'étude des flux thermiques du projet Green Dock, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227315 - 2787068 - v2.0, 20/03/2024.

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Le port autonome de Gennevilliers (92) envisage la construction d'une plateforme logistique urbaine multimodale, dit « projet Green Dock ».

Cette plateforme comprend un bâtiment industriel à plusieurs niveaux à usage d'entrepôt et de distribution multimode, un parc de stationnement en infrastructure, des zones de bureaux liés à l'activité d'entrepôt et un ouvrage de ponton flottant dédié aux opérations de logistique fluviale du dernier kilomètre (cf. Figure 1).

La société LISI INGENIERIE a réalisé l'étude de flux thermique de cette plateforme logistique urbaine multimodale. Cette étude a fait l'objet de plusieurs versions d'un rapport intitulé « Projet Green Dock – Etude de flux thermique – Sécurité incendie » :

- Version du 18 août 2023¹ ;
- Version du 15 novembre 2023².

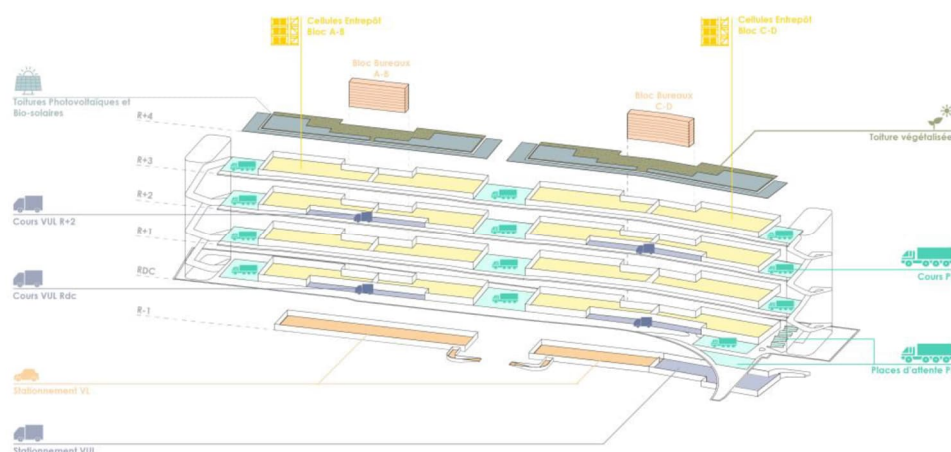


Figure 1. Vue sur le projet de construction

1.2 Eléments contractuels

Cette prestation fait suite :

- A l'envoi de l'offre Ineris, réf. Ineris-227315-2782432-V1.0, et datée du 12/10/23 ;
- A votre commande reçue par mail du 26/10/23.

¹ LISI INGENIERIE, « Projet Green Dock – Etude de flux thermique – Sécurité incendie », LISI_REF_DOCUMENT_L233_189 – [INDICE A], 18/08/23.

² LISI INGENIERIE, « Projet Green Dock – Etude de flux thermique – Sécurité incendie », LISI_REF_DOCUMENT_L233_189 – [INDICE B], 15/11/23.

1.3 Objectif de l'étude

Dans le cadre de cette prestation, l'Ineris émet d'abord un avis critique sur le document rédigé par LISI INGENIERIE dans sa version du 15 novembre 2023. Dans toute la suite, on fera référence à ce document comme étant l'« Etude ». A noter que l'Ineris n'a pas demandé à avoir accès aux comptes-rendus des deux réunions organisées avec les services de la DRIEAT et du Bureau Prévention de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris les 8 septembre 2021 et 9 juin 2023. En outre, l'avis de l'Ineris porte exclusivement sur l'utilisation du logiciel Flumilog pour le calcul des flux thermiques. Les autres aspects, tels que la résistance au feu des éléments structurels ou l'efficacité du désenfumage, ne sont pas dans le champ de la présente étude. Une première version du rapport a été envoyée à LISI INGENIERIE en date du 5 janvier 2024.

Le 26 janvier 2024, LISI INGENIERIE a envoyé son droit de réponse à l'Ineris. Celui-ci s'est focalisé sur les remarques les plus importantes de l'avis critique. Certains points de ce droit de réponse méritaient encore quelques clarifications. Celles-ci ont été apportées lors d'une visioconférence organisée entre LISI INGENIERIE et l'Ineris en date du 9 février 2024. Ces nouveaux éléments ont été intégrés dans la version actuelle du rapport.

2 Remarques préliminaires

Le retour de l'Ineris suit l'ordre de la structure de l'Etude.

Pour un chapitre donné, l'Ineris émet son avis selon la structure suivante :

- *Présentation des éléments de réflexion sur le contenu d'un paragraphe donné du chapitre analysé ;*
- **Synthèse générale sur le contenu du paragraphe.**

Et, le cas échéant :

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Inventaire des remarques de fond ;• Inventaire des remarques de forme. |
|---|

La réponse apportée par LISI INGENIERIE à chacune des remarques de fond apparaît en violet dans le présent document.

Les réponses de l'Ineris sont apportées en rouge.

3 Retour de l'Ineris

3.1 Contexte et objectif de l'étude

Cette partie ne suscite pas de remarques de la part de l'Ineris.

Remarque A1 : le rapport pourrait intégrer un glossaire des acronymes utilisés dans l'Etude.

3.2 Présentation du projet

La description du projet est relativement claire et convenablement étayée (hormis les quelques points faisant l'objet des remarques de fond).

Le désenfumage de la plateforme logistique est purement naturel et se fait à l'aide d'ouvrants positionnés en partie haute de chaque cellule (cf. remarque B3), dont l'ouverture (automatique) est asservie à la détection (elle-aussi automatique) de l'incendie. La surface utile de l'ensemble de ces ouvrants correspond à 2% de la surface du canton. Pour les étages allant du RDC à R+2, les rejets se font soit dans un puit de désenfumage (façade Nord), soit sous la dalle REI 120 servant de voie de circulation pour les véhicules (façade Sud). Pour l'étage R+2, les rejets se font directement à l'air libre. Les amenées d'air neuf se font en ouvrant manuellement les portes sectionnelles au niveau des cours camion et, pour la cellule D0, des volets en partie basse de la façade Est.

Remarque B1 (page 7/46) : il est indiqué que la fermeture des ouvertures entre les cellules est assurée de manière automatique en cas de feu. Comme les conclusions de cette étude reposent sur des résultats de modélisations faisant l'hypothèse principale que les parois séparatives entre les cellules sont REI 120, il est important de mieux décrire les éléments constituant la chaîne de sécurité « Détection de l'incendie → Traitement de l'information → Fermeture des ouvertures » pour que le lecteur puisse s'assurer de la performance de cette barrière de sécurité. Il faudrait expliquer comment l'incendie est détecté dans la cellule, comment la porte se ferme (par gravité ?) ...

Réponse de LISI INGENIERIE : « (...) De manière plus précise, chaque cellule est surveillée par une détection automatique d'incendie. Des détecteurs optiques ou multi-ponctuels par aspiration sont positionnés sous la dalle, leur couverture répond aux exigences de la norme NF S 61-970. Cette surveillance assure une détection précoce du feu.

Les dispositifs de fermeture des cellules sont constituées par des éléments DAS normalisés CF 2 h, leur asservissement est sans temporisation à la détection incendie. Autrement formulé, la sensibilisation d'un détecteur conduit à la fermeture sans temporisation des dispositifs de fermeture entre cellules. La libération de la ventouse DAS permet la fermeture de la porte par gravité sur un rail guide en pente jusqu'à la butée une fois l'effacement latéral ayant assuré l'obturation de la baie ».

Réponse de l'Ineris : la porte CF 2 h se ferme par gravité sur détection de l'incendie par les détecteurs présents dans la cellule et/ou par l'élément DAS équipant la porte. Il s'agit de techniques usuellement rencontrées dans les entrepôts permettant de garantir au plus vite une résistance au feu EI 120 de l'ensemble séparatif. Cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque B2 (page 7/46) : il faudrait détailler la conception des dalles pour s'assurer que le degré de résistance renseigné, en l'occurrence REI 120, s'applique à tout le plancher (haut ou bas) et non seulement au bord par exemple.

Remarque B3 (page 8/46) : selon la Figure 6, toute la façade extérieure de la plateforme constitue un écran thermique de type REI 120, hormis les zones de quais de déchargement. Il faudrait préciser si ce niveau de protection est assuré que le feu soit interne ou externe. A noter que c'est habituellement le cas avec les matériaux usuellement utilisés.

Réponse de LISI INGENIERIE : « *Les façades extérieures sont en panneau sandwich repris par la structure porteuse. En façades NORD et SUD, les façades forment un écran thermique EI 120 sur une partie ou sur la totalité de leur linéaire (...). Ce niveau de protection est assuré pour un feu intérieur.* ». Lors de la visioconférence du 9 février 2024, il a été précisé que cette différence de protection entre les agressions interne et externe est liée aux accroches des panneaux.

Réponse de l'Ineris : Le fait que le niveau de protection de l'écran thermique EI 120 soit uniquement assuré pour un feu intérieur rend encore plus prégnant la nécessité d'écarter de façon certaine le risque d'avoir un incendie depuis l'extérieur des cellules (cf. remarque B7).

Remarque B4 (page 8/46) : il est écrit que « (...) le désenfumage des cellules des niveaux RDC à R+2 est assuré par des ouvrants disposés en façade NORD et SUD, complétés de puits de désenfumage avec en toiture des édicules équipés de grilles ». Selon la compréhension de l'Ineris, les évacuations des ouvrants sont récupérées par les puits et chaque ouvrant n'est pas canalisé par un puit. Il faudrait bien clarifier ce point.

Réponse de LISI INGENIERIE : « *L'évacuation de fumée est assurée par des ouvrants disposés en façade NORD et SUD, complétés de puits de désenfumage avec en toiture des édicules équipés de grilles. Il s'agit de dispositifs distincts.* »

Réponse de l'Ineris : cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque B5 (page 9/48) : il est écrit que « Les ouvrants sont positionnés en partie haute de chaque cellule ». Pourtant, selon la Figure 7, ces ouvrants semblent positionnés en partie basse des cantons. Outre le fait que cela n'est pas conforme avec l'article 5 de l'Annexe 2 de l'Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510 (« Les cantons de désenfumage sont équipés en partie haute de dispositifs d'évacuation des fumées (...) »), cette disposition ne permet pas de limiter l'épaisseur des fumées et des gaz chauds à l'intérieur des cantons et, sauf si l'élément sensible de la détection incendie est délocalisé de l'ouvrant et se situe en partie haute des cantons, ne tend pas à l'ouverture rapide de ces dispositifs en cas d'incendie. Il convient de clarifier ce point. En effet, l'outil Flumilog considère que les ouvrants sont en toiture et tout autre localisation pourrait entraîner une propagation plus rapide de l'incendie dans la cellule.

Réponse de LISI INGENIERIE : « *Les évacuations de fumée et plus particulièrement les ouvrants en façade sont bien situés en partie haute des cellules. La figure ci-dessous montrent l'implantation des dispositifs sur une coupe transversale aux cellules B0 à B3* ».

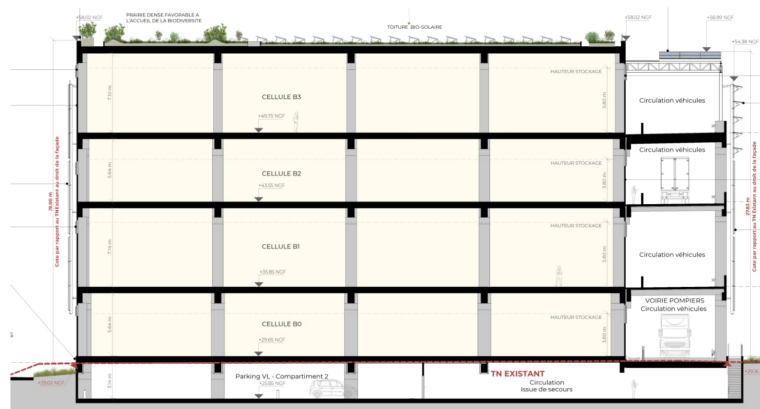


Figure 2. Implantation des ouvrants sur une coupe transversale aux cellules B0 à B3

Réponse de l'Ineris : la Figure 2 montre que les ouvrants sont situés, certes, en partie haute des cellules mais aussi, et surtout, sous la partie basse des cantons. Du coup, ce dispositif en tant que tel ne permet pas vraiment de limiter l'épaisseur des fumées et des gaz chauds puisque celle-ci sera a minima égale à la hauteur du cantonnement. En revanche, l'action de ces ouvrants sur le désenfumage est complétée par des puits de désenfumage (cf. remarque B4) qui, selon la compréhension de l'Ineris, sont actifs depuis le plafond des cellules mais dont la surface utile ne représente que 0,34% au maximum de la superficie de la cellule

Remarque B6 (page 9/48) : les amenées d'air neuf se font en ouvrant manuellement les portes sectionnelles au niveau des cours camion et, pour la cellule D0, des volets en partie basse de la façade Est. Est-ce que ces éléments ont une résistance spécifique au feu ? En effet, si tel est le cas, l'amenée d'air frais reposant sur une action humaine, on peut douter de l'efficacité du désenfumage.

Réponse de LISI INGENIERIE : « Ces dispositifs ne présentent aucune tenue au feu conventionnelle ».

Réponse de l'Ineris : ces nouveaux éléments satisfont pleinement l'Ineris qui n'a pas de remarques supplémentaires à formuler.

Remarque B7 : il conviendrait de détailler davantage les modalités et zones de livraison des poids-lourds aux différents étages. Est-ce que plusieurs poids-lourds sont autorisés sur la même zone de livraison d'un étage donné ? Est-ce que des zones d'attentes sont prévues aux étages pour faire patienter un poids-lourd en attendant que les autres véhicules soient chargés/déchargés ? Est-ce que la zone de circulation des poids-lourds est protégée par un sprinklage ? Du point de vue de l'Ineris, ce sont des éléments qui sont nécessaires pour évaluer le risque d'avoir un incendie pouvant survenir depuis l'extérieur de la plateforme logistique.

Réponse de LISI INGENIERIE : « Dans le cadre du fonctionnement du projet Green Dock, il est prévu un système de gestion de la circulation dynamique sur site de sorte que les voiries soient libérées en tout temps et qu'il n'y ait pas de bouchon. Cette gestion sera assurée depuis le poste de garde au RDC du projet. Les hypothèses de l'étude de trafic prévoient au maximum une quarantaine de PL par heure pour 96 portes à quai.

A quai, les camions n'ont pas vocation à stationner. Ils sont chargés ou déchargés. Aussi les quais ne constituent pas des zones de stockage. Par ailleurs, les chauffeurs sont à proximité immédiate de leur véhicule puisqu'ils sont soit dans leur véhicule, soit dans le local chauffeurs situé juste à côté. En cas d'incendie d'un véhicule, il est donné pour consigne que les autres véhicules quittent la zone.

Les cours camions et les rampes d'accès sont protégées par un système d'extinction automatique d'incendie de type sprinkler conforme aux règles NFPA. ».

Réponse de l'Ineris : les éléments présentés ici vont dans le sens d'une meilleure maîtrise des risques et, pour cette raison, devraient être indiqués dans l'étude des flux thermiques. Du fait de la présence d'une zone de quai entre la zone de déchargement/chargement des camions et la zone de stockage, et dès lors que cette zone de quai ne constitue pas une zone de stockage, on peut écarter le risque de propagation :

- de la zone de stockage vers le camion en cas de départ de feu dans le stockage ;
- du camion vers la zone de stockage en cas de départ de feu sur le camion.

Le simple fait de respecter cette zone de quai, qui devront rester des zones de quai et ne pas devenir des zones de stockage, associé en outre au système de gestion de la circulation des camions, permet de considérer que le risque d'avoir un incendie depuis l'extérieur des cellules est bien maîtrisé.

Remarque B8 : l'environnement bâtiminaire du site n'est pas décrit. L'absence d'information suggère qu'il n'y a pas d'enjeu là-dessus mais, à ce stade, le lecteur ne sait pas si c'est lié à l'absence de flux thermiques au-delà des limites de site et/ou, ce qui est peu probable, à l'absence de bâtiments à proximité du site.

Réponse de LISI INGENIERIE : il a été fourni un descriptif de l'environnement proche de la plateforme logistique avec un repérage des différents enjeux possibles sur un plan. Selon LISI INGENIERIE, l'enjeu le plus sensible correspond au terrain occupé par la Société de Gestion de Produits Pétroliers (SOGEP) et une analyse plus fine des résultats de flux thermiques a été réalisée pour montrer que ceux-ci ne sont pas de nature à générer des effets domino sur ce site.

Réponse de l'Ineris : le descriptif de l'environnement proche de la plateforme logistique ainsi que le repérage sur plan sont satisfaisants. L'Etude gagnerait en complétude si ces éléments y étaient intégrés. Cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque B9 : de façon générale, la qualité des figures (notamment la Figure 6) mériterait d'être améliorée. En effet, certaines informations importantes sont peu visibles, même en zoomant de façon importante sur le pdf du rapport.

Remarque B10 (page 5/46) : le texte présente une coquille - « *l'accès principal du site est situé à l'angle Sud-Est de la parcelle en liaison avec l'impasse des petits marais.* »

Remarque B11 (page 8/46) : la Figure 7 présente une vue en coupe transversale au niveau du bloc B, passant par la voie de circulation des véhicules. Il aurait été appréciable de bénéficier aussi d'une telle coupe passant par la zone de quai de ce même bloc.

Remarque B12 (page 9/46) : le texte présente une coquille – « *L'amenée d'air neuf est assurée (...)* ».

Remarque B13 (page 9/46) : le texte présente une coquille – « *La surface des amenées d'air est équivalente à la surface utile de l'ensemble des exutoires présents dans le plus grand canton* ».

Remarque B14 (page 9/46) : le texte présente une coquille – « *Le déclenchement du désenfumage (dispositifs d'évacuation de fumées) est prévu automatiquement suite à la sollicitation d'un détecteur automatique d'incendie* ».

3.3 Critère d'évaluation des effets thermiques

Le recensement des objectifs de sécurité à atteindre sur la base de l'analyse des textes réglementaires semble exhaustif.

Remarque C1 (page 10/46) : selon la compréhension de l'Ineris, l'intitulé du §3 n'est pas tout à fait exact. Il conviendrait plutôt de parler de « Recensement de l'ensemble des objectifs de sécurité à atteindre ».

Remarque C2 (page 10/46) : la remarque fait allusion aux voies ferrées situées au sud de la parcelle. Il aurait été appréciable de mettre en exergue cette infrastructure sur la figure présentée juste au-dessus de la remarque.

Remarque C3 (page 12/46) : le tableau présente une coquille. Dans la 1^{ère} colonne du tableau, le NGF est de +43,55 (et non + 35,85) pour le R+2.

3.4 Méthodologie, outil de calcul et hypothèses retenues

3.4.1 Prise en compte du caractère multi-niveaux de l'entrepôt

L'outil Flumilog a été utilisé pour étudier les effets thermiques liés à un incendie survenant à l'intérieur de la plateforme logistique. Stricto sensu, comme indiqué sur le site Flumilog³, un tel outil ne permet pas de calculer le flux thermique généré par l'incendie de plusieurs cellules superposées les unes sur les autres, et séparées par une dalle performante au feu. Toutefois, selon les résultats présentés dans le §6 de l'Etude (mais néanmoins discutés plus loin dans ce document), le risque de propagation thermique peut être écarté et, dans ce cas, la limite imposée par l'outil Flumilog n'en constituerait pas une. En conséquence de quoi, il est tout à fait pertinent d'étudier les effets thermiques liés à l'incendie de chaque cellule, prise individuellement, et cela rentre parfaitement dans le champ d'application de l'outil de modélisation. **En résumé, dès lors que le risque de propagation d'une cellule à l'autre est totalement exclu, le choix de l'outil est pertinent. Il est toutefois fondamental, pour une telle installation, de bien justifier l'absence de risque de propagation entre les cellules, tant par la dalle que par les façades extérieures.**

Dans l'étude, la hauteur considérée pour les cibles est de 1,8 m. Les cibles couvertes sont les tiers présents au-delà des limites du site, les voies de circulation externes, les voies d'eau et les services de secours. Cela amène deux remarques de la part de l'Ineris :

- On aurait pu imaginer réduire cette hauteur pour les cibles situées sur les voies d'eau. Toutefois, en ne procédant pas à cette différenciation de traitement, l'évaluation des flux reçus au niveau de ces cibles est jugée prudente ;
- En cas de présence d'un (ou plusieurs) bâtiment(s) élevé(s) autour du site, il pourrait être nécessaire de considérer une hauteur de cible plus importante pour s'assurer que les personnes de ce(s) bâtiment(s) ne sont pas exposées à des flux thermiques trop importants. S'il s'avère que ces bâtiments sont suffisamment éloignés du site au regard des distances d'effets calculées alors cette remarque perd de sa pertinence. Ceci est en lien avec la remarque B8.

Sauf si des bâtiments sont très proches du site, l'Ineris est en phase avec la hauteur de cible considérée dans l'Etude.

Le fait que le bâtiment soit sur plusieurs niveaux a été pris en compte dans l'outil Flumilog en « corrigeant virtuellement » la hauteur des cibles. En prenant comme hauteur de référence la cellule en proie à l'incendie, la détermination des flux thermiques à l'aide de l'outil Flumilog s'effectue à une hauteur relative de 1,8 m pour les cellules du RDC, de -4,4 m pour les cellules du R+1, de -12,1 m pour les cellules de R+2 et de -18,3 m pour les cellules de R+3 (comme l'indique le Tableau 3 de l'Etude). Dans les études nécessitant l'outil Flumilog, il est assez courant d'être amené à corriger la hauteur de cible pour prendre en compte un différentiel de hauteur entre le bâtiment en proie à l'incendie et la cible étudié pour une meilleure évaluation des effets. **La correction de la hauteur de cible pour prendre en compte le fait que le bâtiment est multi-niveau est justifiée et ne pose pas de difficultés pour l'Ineris.**

Avant d'évaluer les flux thermiques, la société LISI INGENIERIE a réalisé une étude paramétrique afin de déterminer le nombre minimal et maximal de portes de quai au niveau de chaque cellule de telle sorte que la sous-ventilation induite par le nombre minimal de portes de quai ne se traduise pas par une durée de l'incendie supérieure à la durée théorique de tenue des parois séparatives et que la sur-ventilation induite par le nombre maximal de portes de quai ne se traduise pas par des distances d'effets thermiques inacceptables. L'Ineris précise que, dans le cas d'une toiture renforcée, les fumées chaudes s'accumulent plus facilement en partie supérieure du stockage et, dès lors que ces fumées ont atteint la température d'auto-inflammation, l'embrasement généralisé peut être très brutal. Par conséquent, le nombre minimal de portes de quai peut être tout aussi dimensionnant pour les effets thermiques⁴.

³ Cf. FAQ « Comment traiter le cas des bâtiments multi-étages ? »

⁴ Dans la note FAQ du site Flumilog sur la propagation thermique, s'il est possible d'écarter de façon instantanée le risque de propagation thermique pour des entrepôts 1510 dès lors que la toiture a une résistance au feu de moins de 30 min (et sous réserve que d'autres conditions soient néanmoins satisfaites), cela n'est plus le cas lorsque cette toiture devient plus résistante. Dans ce cas, il est indiqué qu'il faut comparer la durée de feu calculée par l'outil Flumilog à la durée théorique des parois séparatives.

Cette étude paramétrique a été réalisée en deux temps :

- Pour déterminer le nombre minimal de portes de quai : il est fait l'hypothèse que le stockage est constitué à 100% de palettes type 1510. Même si cela n'est pas explicité, il est supposé par l'Ineris que cette palette a été utilisée car la puissance libérée par celle-ci, en l'occurrence 1525 kW, constitue une borne minimale pour l'ensemble des produits pouvant être stockés dans la plateforme logistique ;
- Pour déterminer le nombre maximal de portes de quai : il est fait l'hypothèse que le stockage est constitué à 100% de palettes type 2662. Encore une fois, même si cela n'est pas explicité, il est supposé par l'Ineris que cette palette a été utilisée car la puissance libérée, en l'occurrence 1875 kW, constitue une borne maximale pour l'ensemble des produits pouvant être stockés dans la plateforme logistique.

Selon la compréhension de l'Ineris, cette étude paramétrique a été réalisée avec l'outil Flumilog. Il faut préciser que cet outil ne prend pas en compte l'influence du nombre de portes de quai sur la ventilation du foyer. En effet, comme indiqué dans la notice descriptive de l'outil⁵, celui-ci fait d'abord l'hypothèse d'une certaine vitesse de propagation de l'incendie dans la cellule, fixant ainsi la quantité de combustible qui brûle au cours du temps et donc, en fonction de la réaction de combustion, le débit d'air nécessaire au foyer. L'outil Flumilog suppose ensuite que le débit d'air entraîné correspond à 10 fois le débit d'air consommé par le foyer. En fonction du volume de la couche chaude, qui dépend lui-même des ouvertures de la cellule (exutoires, surface effondrée de la toiture), il est alors possible de statuer si le volume restant, donc d'air, est suffisant pour alimenter l'incendie. Si tel n'est pas le cas, un processus itératif se met en place au cours duquel la vitesse de propagation est progressivement réduite jusqu'à ce que les volumes de couche chaude et d'air nécessaire soient compatibles avec le volume de la cellule incriminée. Si les exutoires et la surface effondrée de la toiture sont bien pris en compte dans le calcul des caractéristiques de la couche chaude, cela n'est pas le cas des portes de quai. Il est juste considéré que les amenées d'air sont suffisantes pour compenser les fumées s'échappant des exutoires. Dès lors, cet outil n'est pas vraiment adapté pour étudier l'influence de ce paramètre sur la ventilation du foyer.

L'Ineris est en phase avec la démarche générale et avec la méthodologie de réalisation de l'étude préliminaire. Toutefois, l'Institut tient à préciser que l'outil Flumilog n'est pas vraiment adapté pour étudier l'influence du nombre de portes de quai sur la ventilation du foyer. Dès lors, il pourrait être opportun de réaliser une étude d'ingénierie incendie pour vérifier notamment que, en cas de sous-ventilation du foyer, la durée de l'incendie reste compatible avec la durée théorique de résistance au feu des éléments de la cellule.

3.4.2 Hypothèses retenues

3.4.2.1 Modélisation de la géométrie des cellules

Comme l'outil Flumilog ne permet pas de représenter des géométries relativement complexes de cellules, l'Etude a été amenée à les simplifier.

L'approche retenue pour simplifier les géométries de cellules est jugée satisfaisante, et suffisamment prudente, par l'Ineris.

3.4.2.2 Gestion des mezzanines

Selon la compréhension de l'Ineris, les mezzanines ont été prises en compte dans l'outil Flumilog en considérant un stockage en rack du produit stocké sur la hauteur totale des cellules concernées.

L'approche retenue pour la gestion des mezzanines est jugée satisfaisante par l'Ineris sous réserve que la remarque D1 a bien été vérifiée.

⁵ Cf module 4 (propagation de la cellule) de la notice descriptive.

3.4.2.3 Prise en compte des tenues au feu conventionnelles des parois et planchers

Selon la compréhension de l'Ineris, l'approche retenue par la société LISI INGENIERIE a été d'utiliser l'outil Flumilog pour modéliser la courbe de puissance de l'incendie en attribuant à la toiture de cette cellule un degré de résistance au feu égal à celui de la paroi la plus faible. Comme indiqué dans le texte, une telle approche a tendance à maximiser la puissance maximale libérée par l'incendie et donc les flux thermiques. Toutefois, compte tenu du fait que la toiture est bien plus résistante que celle prise en compte dans la modélisation, la puissance maximale permise par la ventilation assurée par les ouvrants a été aussi calculée à l'aide de la formule de Kawagoe. Deux cas de figure sont possibles :

- *Soit la puissance maximale calculée par l'outil Flumilog est inférieure à la valeur calculée par la formule de Kawagoe. On reste alors sur la courbe rouge de la Figure 13 ;*
- *Soit la puissance maximale calculée par l'outil Flumilog est supérieure à la valeur calculée par la formule de Kawagoe. Dans ce cas, la courbe de puissance de Flumilog est écrêtée par la valeur maximale de la formule et la durée de l'incendie est corrigée. On est alors sur la courbe verte de la Figure 13.*

L'approche retenue pour prendre en compte l'effet possible de la sous-ventilation du foyer sur la courbe de puissance convient à l'Ineris. Toutefois, l'Institut s'interroge sur la pertinence de la formule de Kawagoe dès lors que la paroi la plus fragile de la cellule étudiée tombe sous l'effet de l'incendie (cf. remarque D2).

3.4.2.4 Modélisation des ouvertures en façade et du désenfumage des cellules

Sauf mauvaise compréhension de la part de l'Ineris, la mise en donnée réalisée par la société LISI fait que l'outil Flumilog considère que la toiture de la cellule n'est pas équipée d'exutoires (cf. remarque D12), ignorant ainsi l'effet que peuvent avoir réellement les puits de désenfumage sur la hauteur et la température de la couche chaude formée à l'intérieur de la cellule. Le fait d'avoir modélisé les ouvrants sur les façades comme des portes de quai n'influe en rien sur la ventilation du foyer de l'incendie. On est donc sur un foyer modélisé très faiblement ventilé dans les premiers instants qui devient bien ventilé dès lors que la paroi la plus fragile (et donc la toiture, selon la réponse à la remarque D3) tombe.

Compte tenu des caractéristiques des puits de désenfumage et de la localisation des ouvrants sur les façades (cf. remarque B5), la mise en données de l'outil Flumilog est jugée acceptable pour évaluer de façon prudente les flux thermiques en cas d'incendie d'une cellule.

Remarque D1 (page 15/46) : La gestion des mezzanines est pertinente dès lors que l'agencement modélisé des charges combustibles dans ces cellules permet d'avoir une évaluation prudente des charges réellement présentes sur ces mezzanines.

Remarque D2 (page 17/46) : La formule de Kawagoe s'applique pour un feu pleinement développé survenant dans un local équipé d'une petite ouverture pour la ventilation. Tant que l'enveloppe de ce local résiste aux effets de l'incendie, cette formule permet donc d'estimer la puissance maximale libérée du fait de l'apport limité en air via cette ouverture. Quelles sont les limites d'application de cette formule ? Jusqu'à quelle surface maximale d'ouverture est-il possible par exemple de l'utiliser ? Dans le cas de la plateforme logistique, est-ce que la formule reste pertinente pour évaluer la puissance maximale libérée et, par voie de conséquence, la durée maximale de l'incendie si la paroi la plus fragile de la cellule tombe ?

Réponse de LISI INGENIERIE : « Le chercheur japonais Kawagoe (1958) a remarqué, dans les années cinquante sur des expériences en grandeur de feux de locaux, que le débit massique entrant dans un local où le feu est intense (les flammes occupent une grande partie du volume intérieur), est de la forme :

$$\dot{m}_{in} = \alpha A_{ouv} \sqrt{H_{ouv}}$$

Les premiers travaux ont été conduits sur les feux dans des locaux chargés en bois et disposant de petites ouvertures. Pour autant, les travaux de Kawagoe se sont appuyés sur de nombreux essais, dont des essais à échelle réelle sur des bâtiments en R+1. La figure ci-contre extraite du rapport interne du BRI de septembre 1958 présente cette dernière configuration.

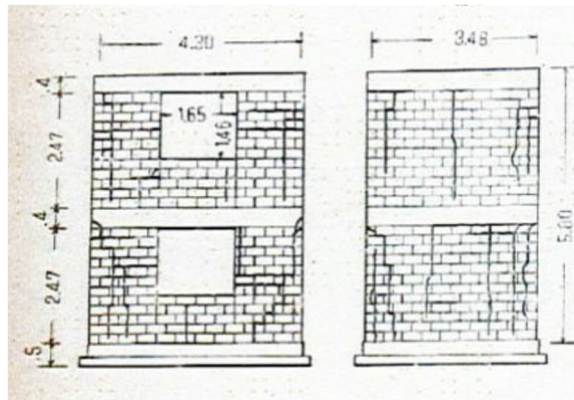


Figure 3. Configuration des essais sur lesquels se sont appuyés les travaux de Kawagoe

A notre connaissance, il n'existe pas de limite d'application de la formule de Kawagoe, portant notamment sur un facteur d'ouverture ou une surface de local. C'est une formule couramment utilisée en ingénierie pour estimer une puissance de feu pouvant être libérée au maximum à l'intérieur d'un local. Elle est d'ailleurs citée dans l'Eurocode Partie 1-2 sans limite d'application contrairement à d'autres formules. »

Réponse de l'Ineris : cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque D3 (page 18/46) : il pourrait être écrit de façon plus explicite dans la légende de la Figure 13 que le calcul Flumilog a été réalisé en attribuant à la toiture de la cellule un degré de résistance égal au degré de résistance le plus faible des parois.

Réponse de LISI INGENIERIE : « Cette remarque est prise en compte dans la révision du document ».

Réponse de l'Ineris : cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque D4 (page 18/46) : il est écrit « Dans la configuration où certaines des cellules sont frigorifiques, on retient des percements pour le désenfumage de sorte de maximiser les flux thermiques ». Cette phrase sibylline mériterait d'être plus explicitée.

Réponse de LISI INGENIERIE : « Le rapport est repris comme suit : « En ce qui concerne le cas particulier des cellules frigorifiques, les flux thermiques sont estimés en supposant les percements liés au désenfumage de sorte de maximiser ces flux thermiques ».

Réponse de l'Ineris : cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque D5 (page 18/46) : il est écrit « La surface des puits de désenfumage étant au maximum de l'ordre de 0,34% de la taille de la cellule, cette valeur est en dehors de la gamme de valeurs de l'outil Flumilog et donc trop faible pour être modélisée. Il est donc supposé une surface d'exutoire nulle ». Dans la mesure où ce puit de désenfumage sert à collecter les fumées issues de plusieurs exutoires, l'Ineris ne comprend pas pourquoi la surface de ce puit doit être intégré dans la modélisation Flumilog. La finalité de traitement ne pose donc pas de souci pour l'Ineris mais c'est la justification d'un tel traitement qui suscite des interrogations.

Remarque D6 (page 19/46) : en analysant les valeurs des tableaux, il apparaît que SUE ~ 63% SG ce qui semble assez logique. Toutefois, ce ratio est bien plus faible pour les ouvrants de la paroi 6 pour les blocs A0, BO, CO, DO, C2 et D2. Est-ce normal ?

Réponse de LISI INGENIERIE : « Les valeurs figurant dans le tableau sont correctes. Le projet prévoit pour les ouvrants de désenfumage d'installer le modèle Eura de la marque Brakel©. Il s'agit d'un modèle à ventelles. Suivant les cellules et même au sein d'une même cellule, les dimensions des ouvrants et le nombre de ventelles varient. En conséquence, le coefficient aéralique reliant la surface géométrique à la surface utile est très différent d'un ouvrant à un autre. Pour les dimensions et les ventelles prévues, le coefficient aéralique varie de 0,35 à 0,64 ».

Réponse de l'Ineris : cette remarque n'amène plus de commentaire de la part de l'Ineris.

Remarque D7 (page 19/46) : en dessous de quelques tableaux, il apparaît la mention « (**) Le preneur demandant à réduire le nombre de portes de quais, la vérification de la puissance maximale atteinte (cf. §4.3.3) est effectuée pour le nombre minimal de portes de quais (4). En revanche les flux thermiques sont calculés pour le nombre maximal de portes de quai (9) ». A ce stade de l'Etude, l'Ineris ne comprend pas pourquoi le nombre de portes de quai n'est pas définitivement figé.

Réponse de LISI INGENIERIE : « C'est un sujet qui reste en discussion avec le preneur. L'étude de flux thermique considère donc les hypothèses les plus pessimistes tant pour la durée de l'incendie, que pour les effets thermiques. ».

Réponse de l'Ineris : il serait souhaitable que cette information soit affichée de façon plus explicite dans le rapport (et pas seulement via un commentaire relatif à un tableau), par exemple dans le contexte de l'étude. Et il conviendra de s'assurer que, lorsque la décision sera prise sur le nombre réel de portes de quai, que ce nombre soit bien couvert par la présente étude des flux thermiques. Cette remarque n'amène pas de commentaire supplémentaire de la part de l'Ineris.

Remarque D8 (page 13/46) : il est écrit « Il s'agit d'une méthode de calcul référence pour déterminer les distances (...) ». Il conviendrait plutôt d'écrire qu'il s'agit d'une méthode de calcul référencée dans les textes réglementaires.

Remarque D9 (page 13/46) : le texte précise le traitement adopté « (...) dans le cas où la durée de l'incendie dépasse la tenue au feu conventionnelle des parois et planchers séparatifs entre cellules (...) », en l'occurrence une première méthode où les effets thermiques de l'incendie des cellules, prises individuellement, sont sommés et une seconde méthode où le stockage est supposé remplir l'ensemble du volume de la plateforme logistique. Selon la compréhension de l'Ineris, même si elle est pertinente, cette discussion n'a pas lieu d'être puisque finalement on s'est assuré que la durée de l'incendie ne dépassait pas celle de la tenue des parois et planchers séparatifs entre cellules.

Remarque D10 (page 13/46) : à plusieurs reprises dans le §4, il est fait mention de « flux critique ». En quoi ce flux est critique ?

Remarque D11 (page 14/46) : la phrase « Par exemple, dans les calculs, on ne prend pas en compte la partie des cellules tronquées par les zones de bureaux (...) » paraît un peu trompeuse. En effet, cette partie tronquée n'est pas prise en compte en tant que bureaux proprement dits mais en tant que stockage qui n'existe pas dans la réalité mais qui est considéré par l'outil Flumilog.

Remarque D12 (page 18/46) - remarque consécutive à la visioconférence du 9 février 2024 : il est écrit « La surface des puits de désenfumage étant au maximum de l'ordre de 0,34% de la taille de la cellule, cette valeur est en dehors de la gamme de valeurs de l'outil Flumilog et donc trop faible pour être modélisée. Il est donc supposé une surface d'exutoire nulle ». L'Ineris précise qu'il est possible de rentrer une surface d'exutoire correspondant à 0,34% de la superficie de la cellule en utilisant le mode de définition « Quantité » (et non « Pourcentage ») de l'outil Flumilog.

Remarque D13 (page 19/46) : il a été considéré des portes de quai de dimensions unitaires 3 m × 3 m. Est-ce que ces dimensions ne sont pas sous-estimées ?

Remarque D14 (page 19/46) : en dessous de chaque tableau présentant l'inventaire des portes de quai et des ouvrants, il est mentionné « x % d'exutoires pour une SUE y m² ». Cette mention n'est pas très explicite.

Remarque D15 (page 21/46) : le titre de §4.3.5 ne paraît pas adapté. Il conviendrait plutôt de l'intituler « Prise en compte de la nature et de l'agencement du stockage ».

Remarque D16 (page 22/46) : Dans le tableau, et pour les cellules du bloc C situées au R+1 ou R+3, le volume de stockage est plutôt de 11904 m³ (et non 11712 m³).

Remarque D17 (page 23/46) : sur la Figure 15, les figures situées à droite semblent indiquer un déport (type B selon l'outil Flumilog) qui ne paraît pas légitime au regard de la vraie géométrie modélisée.

3.5 Résultats de calcul

Le §6.1 présente les résultats obtenus pour la durée de l'incendie survenant dans chaque cellule des différents blocs. La valeur maximale de la courbe de puissance déterminée par l'outil Flumilog est comparée à la valeur maximale permise par la ventilation et, si cette dernière est inférieure, est écrêtée pour corriger la durée de l'incendie. **L'Ineris n'émet pas de réserves vis-à-vis des valeurs renseignées dans le Tableau 4.**

Quelle que soit la cellule considérée, il s'avère donc que cette durée (corrigée ou pas) reste inférieure à la durée théorique de tenue des parois et planchers séparatifs et il est dès lors conclu que la propagation est impossible entre les cellules. **L'Ineris précise que, de son côté, la validation de cette conclusion très importante reste conditionnée aux éléments de réponse de plusieurs remarques formulées précédemment, notamment les remarques B1, B3 et B7 (cf. remarque E1).**

La §6.2 présente la cartographie des flux pour chacune des cellules constituant la plateforme logistique. **L'Ineris n'a pas de remarques par rapport à ces cartographies. Les résultats obtenus semblent cohérents avec la nature du stockage et le fait que l'incendie ne se propage pas à d'autres cellules.**

Remarque E1 (page 27/46) : l'Ineris s'interroge tout de même sur le risque de propagation en cas d'agression thermique venant de l'extérieur. L'Étude mériterait d'être beaucoup plus dissert là-dessus. En effet, si plusieurs poids-lourds sont en attente sur l'un des étages de la plateforme logistique, relativement proche de la façade d'une cellule du bâtiment, comment s'assure-t-on que l'incendie d'un de ces véhicules, se propageant aux autres, n'est pas de nature à aggraver plusieurs cellules en même temps depuis l'extérieur ?

Réponse de LISI INGENIERIE : « *Le traitement CF des façades d'un entrepôt est exigé pour un stockage extérieur et des zones de stationnement. Suivant l'arrêté du 11 avril 2017 modifié par l'arrêté du 24 septembre 2020 (Annexe II §2.III), les zones de quais sont exclues de cette exigence (zone de préparation / réception)* ». Les éléments de réponse par rapport à la remarque B7 sont aussi repris.

Réponse de l'Ineris : cf. remarque B7.

Remarque E2 (page 28/46) : sur les Figures 19 et 20, et pour les cellules A0, A2, B0, B2, C0, C2, D0 et D2, il serait souhaitable d'indiquer la valeur obtenue pour la « puissance corrigée » (même si celle-ci est supérieure à la puissance calculée par l'outil Flumilog).

4 Synthèse

Dans le cadre de cette tierce-expertise, l'Ineris a été amené à analyser l'étude des flux thermiques sur le projet Green Dock à Gennevilliers (92), réalisée par la société LISI INGENIERIE. Le document analysé correspond au rapport intitulé « Projet Green Dock – Etude de flux thermique – Sécurité Incendie », dans sa version du 15 novembre 2023.

Au global, le travail est de qualité, les hypothèses de modélisation plutôt bien posées et les résultats semblent pertinent. En effet, selon la compréhension de l'Ineris, une étude paramétrique a été réalisée pour déterminer le nombre de portes de quai permettant de s'assurer notamment que la durée de l'incendie d'une cellule ne permet pas la propagation à une autre cellule. Dès lors que cette propagation est totalement exclue, l'outil Flumilog peut être utilisé pour étudier les effets de l'incendie de chaque cellule de la plateforme logistique, chaque cellule étant prise individuellement. Il apparaît alors que les flux thermiques reçus à la hauteur des enjeux (tiers au-delà des limites du site, voies de circulation externes, voies d'eau et services de secours) sont relativement limités et permettent de répondre favorablement aux objectifs de sécurité des textes réglementaires.

Du point de vue de l'Ineris, plusieurs informations pourraient venir compléter le descriptif technique de l'étude des flux thermiques (modalité de fermeture des portes automatiques, conception des planchers REI 120, plan de circulation et d'attente des poids-lourds aux différentes étages...). Ces informations ont été fournies par LISI INGENIERIE dans le cadre des travaux de cette tierce-expertise et permettent d'écarter totalement le risque de propagation thermique à plusieurs cellules (soit en horizontale, soit en verticale, avec un départ de feu à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la plateforme).

Même s'il n'était pas vraiment nécessaire de mentionner l'étude paramétrique dans la mesure où seuls les flux thermiques prédits avec la configuration finale de la plateforme logistique sont d'importance, il est tout de même intéressant de connaître l'existence de cette étude, sa démarche et ses modalités de réalisation. Cette étude paramétrique a porté sur l'influence de la nature de la charge calorifique et du nombre de portes de quai sur ces effets thermiques. Si l'outil Flumilog est adapté pour cette étude concernant la nature de la charge calorifique, cela n'est pas le cas pour le nombre de porte de quai puisque le fait d'avoir plus ou moins de portes n'influe en rien sur la ventilation du foyer, et donc sur le profil de puissance, prédit par l'outil Flumilog. Sans pour autant vouloir remettre en cause les conclusions obtenues par LISI INGENIERIE sur la non-propagation de l'incendie d'une cellule à une autre, l'utilisation d'un tel outil pour déterminer la durée maximale d'un incendie en condition de sous-ventilation n'est pas nécessairement gage d'assurance. Il pourrait être plus pertinent de réaliser une étude CFD du développement de l'incendie dans une cellule et de comparer l'évolution des températures prédite au niveau des parois séparatives REI 120 à la courbe ISO. Suite à la présente tierce-expertise, cette étude est envisagée dans le cadre du projet Green Dock.

Sécurité incendie

Projet Green Dock Complément à l'étude de flux thermique

ADRESSE DE L'AFFAIRE

PORT AUTONOME DE GENNEVILLIERS, ROUTE DU BASSIN N°6 – 92230 GENNEVILLIERS

OBJET DU DOCUMENT

RAPPORT D'ETUDE

REDACTEUR

M. COMPARINI

APPROBATEUR/VERIFICATEUR

E. BLANCHARD

DATE : 21 JANVIER 2025

REVISION : B



C			
B	21/01/25	LISI	Modifications mineures
A	07/11/24	LISI	1ère diffusion
INDICE	DATE	EMETTEUR	MODIFICATION

Sommaire

1. - CONTEXTE ET OBJET DU PRESENT COMPLEMENT D'ETUDE	5
2. - PRESENTATION SUCCINCTE DU BATIMENT INDUSTRIEL	6
2.1. - Géométrie et dimensions	6
2.2. - Charge combustible	7
2.3. - Dispositions constructives	7
2.4. - Désenfumage des cellules	9
2.5. - Autres mesures de sécurité incendie	10
3. - SCENARIO D'INCENDIE	11
3.1. - Choix de la cellule	11
3.2. - Départ de feu et propagation de l'incendie	11
3.3. - Etat des façades et parois	13
3.4. - Dipositif et mise en œuvre du désenfumage.....	13
3.5. - Synthèse des scénarios retenus	15
4. - MODELE NUMERIQUE ET GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES	16
4.1. - Outil de calcul utilisé	16
4.2. - Modèle numérique	16
4.3. - Grandeurs physiques exploitées	17
5. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA DETECTION INCENDIE	18
5.1. - Détection dans le canton sinistré	18
5.2. - Détection dans les cantons adjacents.....	19
5.3. - Synhèse des délais de détection	23
6. - ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION	24
6.1. - Propagation de l'incendie et quantité de masse brûlée	24
6.2. - Actions thermiques sur le plancher haut de la cellule	32
6.3. - Actions thermiques sur la paroi séparative de la cellule	36
7. - SYNTHESE ET CONCLUSION DE L'ETUDE	38

Sécurité incendie

OBJET DU DOCUMENT RAPPORT D'ETUDE

DOCUMENTS DE REFERENCE

Documents réglementaires ou normatifs

- [1] Arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- [2] Arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, y compris lorsqu'ils relèvent également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi que les arrêtés de prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à enregistrement sous les rubriques n° 1511, 1530, 1532, 2662 et 2663
- [3] Guide d'application de la rubrique 1510 et de l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 modifié relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, Document du Ministère de la Transition Ecologique, Version 2 révisée en date du 24 septembre 2021
- [4] Arrêté du 27 mars 2014 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 1511 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- [5] Arrêté du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation », Ministère de l'écologie et du développement durable, 2005
- [6] Arrêté du 22 mars 2004 modifié relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages

Documents spécifiques à l'étude

- [7] « Projet Green Dock - Etude de flux thermique » Document LISI, Révision B, Daté du 15 novembre 2023
- [8] « Projet Green Dock – Réponse aux questions et observations de l'INERIS » Document LISI, Daté du 26 janvier 2024
- [9] « Tierce expertise de l'étude des flux thermiques du projet Green Dock », Document INERIS, Référence Ineris - 227315 - 2787068 - v2.0, Daté du 20 mars 2024
- [10] « Projet Green Dock - Etude de flux thermique » Document LISI, Révision D, Daté du 17 janvier 2024

Documents spécifiques au projet

- [11] Dossier PC - Notice de sécurité - Projet Greendock, Document GE-CO, daté d'octobre 2023
- [12] Dossier PC – Plan de masse, Document A26, daté d'octobre 2023
- [13] Dossier PC – Plans de niveaux RDC à R+3, Documents A26, datés d'octobre 2023
- [14] Dossier PC – Plans des coupes, Documents A26, datés d'octobre 2023
- [15] Dossier de demande d'agrément – Plan de rackage maximal, Document A26, daté de mars 2023
- [16] Tableau d'effectifs, Document A26, transmis par courriel le 18 juillet 2023
- [17] Plans de principe de désenfumage, Document EGIS, transmis par courriel le 13 octobre 2023
- [18] Note de calculs des surfaces utiles de désenfumage, Documents A26 et EGIS, daté du 26 juillet 2023

- [19] Nomenclature des grilles de désenfumage, Document A26, transmis par courriel le 12 juillet 2023
- [20] Phase APD / PRE PC - Plan des coupes montrant l'implantation des dispositifs de désenfumages des cellules de l'entrepôt en façades, Document EGIS, transmis par courriel le 12 juillet 2023
- [21] « Phase APD/PRE PC – Détail résille – calcul désenfumage », Document A26, daté de juin 2023
- [22] « Projet Green Dock – Etude de flux thermique », Document LISI, daté d'octobre 2023

Documents généraux

- [23] « FLUMillog - Description de la méthode de calcul des effets thermiques produit par un feu d'entrepôt » - Modules 1 à 7, Documents INERIS, Référence 204476 - 2728180 - v0.3
- [24] « Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu », septembre 2005.

1. - CONTEXTE ET OBJET DU PRESENT COMPLEMENT D'ETUDE

Le projet concerne la construction d'une plateforme logistique urbaine multimodale sur le site du port Autonome de Gennevilliers, sis Route du Bassin n°6. Le projet de construction comprend un bâtiment industriel à usage d'entreposage et de distribution multimodale à niveaux, un parc de stationnement en infrastructure et des zones de bureaux liées à l'activité d'entrepôt (cf. Figure 1).

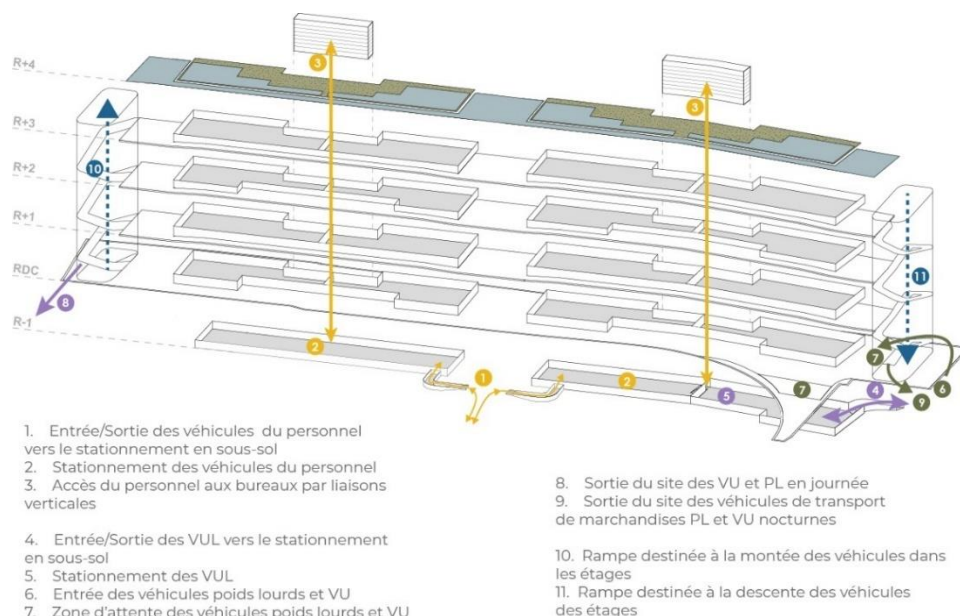


Figure 1 : Programme du projet

Le bâtiment industriel à usage d'entreposage et de distribution multimodale relève de la rubrique 1510-2b (entrepôt de matière combustible) sous le régime de l'enregistrement. À titre indicatif, certaines cellules de l'entrepôt (au RDC et au R+1 des blocs A et B) sont prévues pour être éventuellement frigorifiques d'une température inférieure à 10°C.

Suivant l'arrêté du 24 septembre 2020 relatif aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, une étude de flux thermique a été réalisée pour établir que l'implantation de l'entrepôt répond aux objectifs de l'article 2 de l'annexe II. Cette étude de flux thermique a été réalisée par le LISI pour le compte du CERIB et ce, avec la méthode et l'outil FLUMilog.

S'agissant d'un entrepôt sur plusieurs niveaux, des précautions ont été prises quant à l'utilisation de cette méthode et à la représentation dans l'outil de cet entrepôt spécifique. L'organisme INERIS a réalisé une tierce expertise sur cette étude de flux thermique et a délivré un avis favorable concernant la méthode, sa fiabilité et le caractère contraignant des hypothèses adoptées. Pour autant, l'INERIS a émis une remarque sur l'étude « Sans pour autant vouloir remettre en cause les conclusions obtenues par LISI INGENIERIE sur la non-propagation de l'incendie d'une cellule à une autre, l'utilisation [de l'outil FLUMilog] pour déterminer la durée maximale d'un incendie en condition de sous-ventilation n'est pas nécessairement gage d'assurance. Il pourrait être plus pertinent de réaliser une étude CFD du développement de l'incendie dans une cellule et de comparer l'évolution de températures prédite au niveau des parois séparatives REI 120 à la courbe ISO ».

Dans ce contexte, le présent complément d'étude a pour objet de répondre à la remarque susmentionnée de l'INERIS. Il s'agit, par le biais d'une étude CFD du développement de l'incendie dans une cellule, de comparer l'évolution des températures prédites au niveau des parois/planchers séparatifs REI 120 à la courbe ISO de sorte de vérifier l'intégrité de ces dispositions de compartimentage pour ainsi démontrer la non-propagation de l'incendie d'une cellule à une autre.

Le présent rapport décrit la méthodologie développée pour répondre à cette question. Il rappelle les données de l'étude, pose les hypothèses de l'étude et définit des scénarios d'incendie. Le présent rapport restitue l'analyse des résultats concernant les agressions sur les parois et les planchers séparatifs.

2. - PRESENTATION SUCCINCTE DU BATIMENT INDUSTRIEL

2.1. - GEOMETRIE ET DIMENSIONS

Le bâtiment industriel à usage d'entrepôt et de distribution multimodale est un bâtiment sur plusieurs niveaux accessibles aux véhicules. Il s'agit d'un entrepôt multiniveau.

Dans le cadre du fonctionnement du projet Green Dock, il est prévu un système de gestion de la circulation dynamique sur site de sorte que les voiries soient libérées en tout temps et qu'il n'y ait pas de bouchon. Cette gestion sera assurée depuis le poste de garde au RDC du projet. Les hypothèses de l'étude de trafic prévoient au maximum une quarantaine de PL par heure pour 96 portes à quai.

À quai, les camions n'ont pas vocation à stationner. Ils sont chargés ou déchargés. Aussi, les quais ne constituent pas des zones de stockage. Par ailleurs, les chauffeurs sont à proximité immédiate de leur véhicule puisqu'ils sont soit dans leur véhicule, soit dans le local chauffeurs situé juste à côté. En cas d'incendie d'un véhicule, il est donné pour consigne que les autres véhicules quittent la zone. Les cours camions et les rampes d'accès sont protégées par un système d'extinction automatique d'incendie de type sprinkler conforme aux règles NFPA.

Le bâtiment est composé de quatre blocs A, B, C et D. Du RDC au R+3, chaque bloc comprend une cellule. Au total, le bâtiment comprend 16 cellules. À chacun des niveaux, les cellules sont très similaires entre les blocs que ce soient en géométrie ou en dimensions. Les cellules du niveau RDC sont identiques à celles du niveau R+2, elles sont consacrées aux activités de messagerie, distribution. Les cellules du niveau R+1 sont identiques à celles du niveau R+3, elles sont consacrées aux activités de stockage.

Le Tableau 1 résume pour chaque cellule les surfaces au sol et les hauteurs sous plafond. Les cellules mesurent entre 105 et 120 m de long et entre 25 et 50 m de profondeur. Le bâtiment s'élève sur 28 m compté depuis le plancher bas du RDC (cf. Figure 4). Certaines cellules intègrent des mezzanines. Il s'agit des cellules des blocs A à D, des niveaux R+1 et R+3.

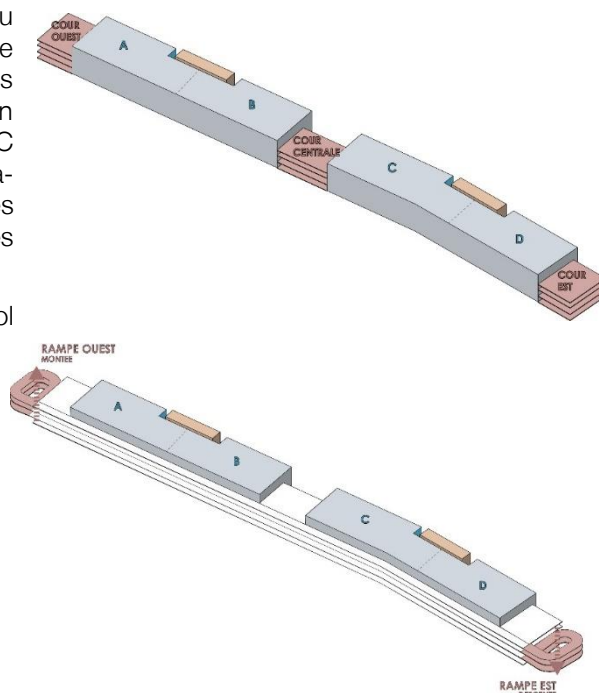


Figure 2 : Configuration du bâtiment Industriel à usage d'entrepôt

	Bloc A	Bloc B	Bloc C	Bloc D	Bloc A	Bloc B	Bloc C	Bloc D
	Surface de plancher [Surface supplémentaire en mezzanine]				Hauteur sous plafond NGF du plancher bas			
R+3	4872 m ² [606 m ²]	4872 m ² [606 m ²]	5394 m ² [605 m ²]	5319 m ² [605 m ²]	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF	6,94 m +49,75NGF
R+2	4155 m ²	4155 m ²	4754 m ²	4604 m ²	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF	5,64 m +43,55NGF
R+1	4839 m ² [592 m ²]	4839 m ² [597 m ²]	5360 m ² [592 m ²]	5287 m ² [602 m ²]	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF	7,14 m +35,85NGF
RDC	4166 m ²	4091 m ²	4687 m ²	4610 m ²	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF	5,64 m +29,65NGF

Tableau 1 : Dimensions des cellules

2.2. - CHARGE COMBUSTIBLE

La charge combustible et le volume correspondant ont été estimés au regard de l'étude capacitaire en termes de nombre de palettes. Cette estimation a conduit à établir que chaque cellule comporte entre 1 196 et 3 230 tonnes de combustibles. Le Tableau 2 reprend cette estimation de la masse combustible par cellule.

BATIMENT			Nombre maximal de palettes	Masse moyenne totale palettes (en t) sur la base d'une masse moyenne de palette de 800 kg	Volume moyen total palettes (en m³) sur la base d'un volume moyen de palette de 1,728 m³
A/B	A	RDC A0	1525	1 220,0	2 635,2
		R1 A1	3492	2 793,6	6 034,2
		mezz R1 A1	32	25,6	55,3
		R2 A2	1522	1 217,6	2 630,0
		R3 A3	3486	2 788,8	6 023,8
		mezz R3 A3	32	25,6	55,3
	B	RDC B0	1496	1 196,8	2 585,1
		R1 B1	3492	2 793,6	6 034,2
		mezz R1 B1	32	25,6	55,3
		R2 B2	1522	1 217,6	2 630,0
		R3 B3	3486	2 788,8	6 023,8
		mezz R3 B3	32	25,6	55,3
C/D	C	RDC C0	1940	1 552,0	3 352,3
		R1 C1	3977	3 181,6	6 872,3
		mezz R1 C1	32	25,6	55,3
		R2 C2	1976	1 580,8	3 414,5
		R3 C3	4005	3 204,0	6 920,6
		mezz R3 C3	32	25,6	55,3
	D	RDC D0	1718	1 374,4	2 968,7
		R1 D1	3886	3 108,8	6 715,0
		mezz R1 D1	32	25,6	55,3
		R2 D2	1718	1 374,4	2 968,7
		R3 D3	3896	3 116,8	6 732,3
		mezz R3 D3	32	25,6	55,3
TOTAL			43 393	34 714 t	74 983 m³
TOTAL avec prise en compte d'un coefficient de sécurité de 10%			47 732	38 186 t	82 481 m³

Tableau 2 : Estimation de la charge calorifique et du volume correspondant par cellule

2.3. - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

La structure principale du bâtiment est en béton armé présentant une tenue au feu conventionnelle R120. De manière plus précise, le bâtiment est prévu en béton armé et précontraint avec un système de poteaux-poutres :

- Les poteaux sont en béton armé de hauteur 4,74 m ou 6,24 m suivant les niveaux. Ces poteaux sont encastres en pieds dans les fondations.
- Les poutres principales portent dans le sens longitudinal du bâtiment (portée de 11 m) et sont en béton pré-contraint.

- Le plancher des cellules de stockage est en dalle alvéolée précontrainte de portée de 12 m d'axe à axe (dans le sens transversal du bâtiment entre chaque poutre).
- Le plancher des cours camion et de la voie de circulation est en dalle TT en béton. Les poteaux communs aux cellules et à la voie de circulation portent les poutres support des dalles respectives des cellules et de la voie de circulation.

Le degré de résistance renseigné, en l'occurrence REI 120, s'applique à tout le plancher (haut ou bas).

Chaque cellule est isolée des cellules adjacentes par des parois séparatives et des planchers en béton de degré CF2h (cf. Figure 3 et Figure 4).

Les dispositifs de fermeture au droit des ouvertures entre cellules présentent un classement EI120C. Leur fermeture est assurée de manière automatique en cas de feu. De manière plus précise, chaque cellule est surveillée par une détection automatique d'incendie. Des détecteurs optiques ou multi-ponctuels par aspiration sont positionnés sous la dalle, leur couverture répond aux exigences de la norme NF S 61-970. Cette surveillance assure une détection précoce du feu. Les dispositifs de fermeture des cellules sont constitués par des éléments DAS normalisés CF2h, leur asservissement est sans temporisation à la détection incendie. Autrement formulé, la sensibilisation d'un détecteur conduit à la fermeture sans temporisation des dispositifs de fermeture entre cellules. La libération de la ventouse DAS permet la fermeture de la porte par gravité sur un rail guide en pente jusqu'à la butée une fois l'effacement latéral ayant assuré l'obturation de la baie.

Les façades extérieures sont en panneau sandwich double peau repris par la structure porteuse. En façades NORD et SUD, les façades forment un écran thermique EI120 sur une partie ou sur la totalité de leur linéaire (cf. Figure 3 et Figure 4). Ce niveau de protection est assuré pour un feu intérieur. Une particularité concerne la cellule D0 où la façade EST présente une tenue au feu CF2h. Les cellules sont isolées des bâtiments de bureaux par des murs CF2h (cf. Figure 3). Les ouvrants en façade NORD sont disposés de telle sorte de limiter le risque de propagation de l'incendie par la façade à la cellule superposée : Le C+D est entre 4,08 m et 7,45 m en fonction des étages. À noter que ces valeurs sont très supérieures aux dispositions qui sont appliquées aux ERP (l'article art. CO21 impose au maximum C+D > 1,3 m).



Figure 3 : Vues en plan des niveaux RDC à R+3 – Tenue au feu des parois et façades



Figure 4 : Vue en coupe transversale – Tenue au feu des planchers et façades

2.4. - DESENFUMAGE DES CELLULES

Le désenfumage des cellules est assuré naturellement. Chaque cellule est découpée en quatre ou cinq cantons, d'une superficie maximale de 1650 m² et de longueur inférieure à 60 m. Les cantons sont séparés par des écrans de cantonnement SF 1/4h de hauteur minimale 1 m.

Toutes les cellules sont de profondeur inférieure à 60 m. Conformément aux dispositions de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié [1] [2] et en respect des préconisations du guide d'application de la rubrique 1510 [3], le désenfumage des cellules des niveaux RDC à R+2 est assuré par des ouvrants disposés en façade NORD et SUD, complétés de conduits de désenfumage avec en toiture des édicules équipés de grilles (cf. Figure 5). Les ouvrants situés sur la façade NORD sont positionnés de sorte de limiter les risques de transmission de l'incendie entre niveau par la façade.

Les ouvrants sont positionnés en partie haute de chaque cellule. L'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée totalisent une surface utile de 2% de la surface du canton. Les dispositifs d'évacuation de fumée sont ouverts automatiquement et asservis à la détection automatique incendie. L'amenée d'air neuf est assurée par ouverture manuelle des portes sectionnelles positionnées sur les cours camion et, pour la cellule D0, des volets positionnés en partie basse sur la façade EST. La surface des amenées d'air est équivalente à la surface utile de l'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée présents dans le plus grand canton.

Remarque : Les cellules aux niveaux RDC et R+1 des blocs A et B ne seront pas désenfumées au titre de l'article 27.2 puisqu'elles sont frigorifiques.

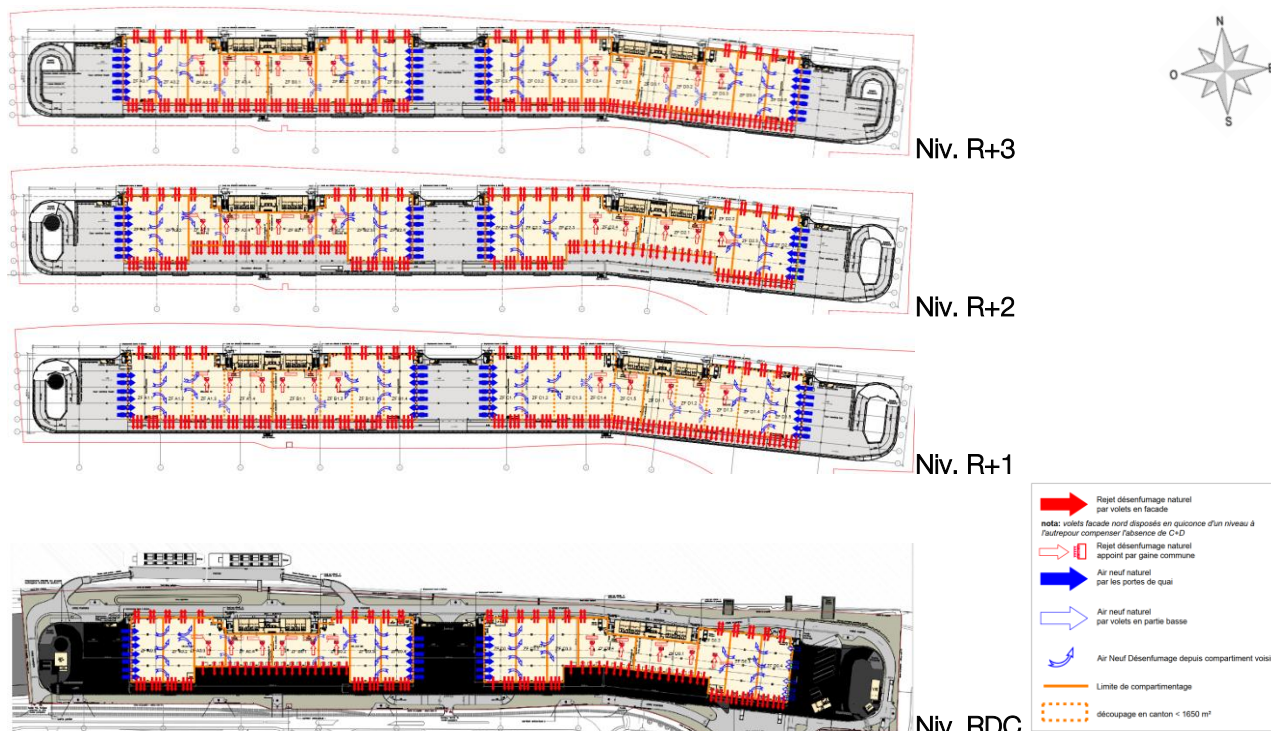


Figure 5 : Vues en plan des niveaux RDC à R+3 – Désenfumage des cellules

Le désenfumage des cellules du niveau R+3 est réalisé suivant le même principe. Les ouvrants de désenfumage sont positionnés en partie haute des façades NORD et SUD. Leur point haut se trouve à 90 cm du plafond de la cellule (cf. Figure 6). Une résille enveloppe la totalité des façades de l'établissement, elle est située entre 0,4 m et 2 m de distance par rapport à la face extérieure. Elle est ajourée et justifie de passages d'air au droit des dispositifs de désenfumage.

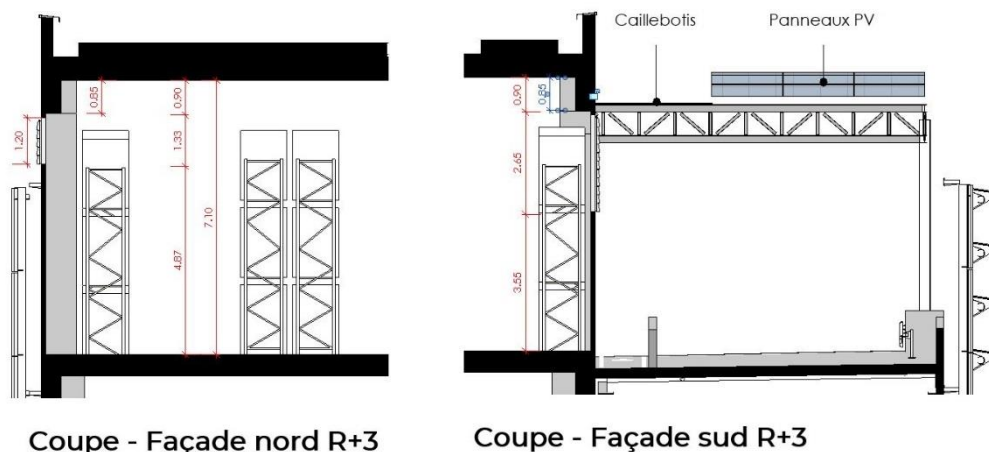


Figure 6 : Vues en coupe en façades NORD et SUD d'une cellule du R+3 – Position des ouvrants en façades

2.5. - AUTRES MESURES DE SECURITE INCENDIE

Chaque cellule est équipée d'un système d'extinction automatique d'incendie de type sprinkler conforme aux règles NFPA, y compris au niveau du parc de stationnement, des cours camions et des rampes d'accès (classe de l'entrepôt considéré à risque élevé - HHS (high hazard storage)).

Le site est équipé d'un SSI de catégorie A associé à un équipement d'alarme de type 1. Chaque cellule est surveillée par une DAI. La détection dans une cellule induit la fermeture sans temporisation des dispositifs de compartimentage et l'arrêt de la ventilation de confort. Le désenfumage est mis en œuvre manuellement depuis l'UCMC du CMSI. Le déclenchement du désenfumage (dispositifs d'évacuation de fumée) est prévu automatiquement suite à la sollicitation d'un détecteur automatique d'incendie.

Le site est surveillé en permanence par un service de sécurité H24 au poste de garde. À ce stade, il est prévu la présence permanente d'un SSIAP 2 complété par 1 SSIAP 1 (la constitution du service de sécurité sera évoquée avec les services de secours).

3. - SCENARIO D'INCENDIE

Il convient de souligner que la présente étude concerne spécifiquement les actions thermiques sur les parois et planchers séparant les cellules. Les hypothèses prises en compte dans le cadre de cette étude peuvent donc être différentes de celles retenues pour les autres études, à savoir celle portant sur le désenfumage, celle relative aux modes de ruine, voire également même l'étude de flux thermique. Les hypothèses détaillées ci-après sont choisies de sorte d'être les plus pénalisantes vis-à-vis des actions thermiques à l'intérieur de la cellule (problématique traitée ici). On pourra prendre pour exemple la ruine des façades. Les façades non résistantes au feu sont considérées ruinées lors de la première quinzaine de minutes ce, pour maximiser les températures à l'intérieur de la cellule. Dans l'étude relative au désenfumage, toutes les façades sont considérées intègres, sans distinction de leur tenue au feu ce, pour contraindre l'enfumage de la cellule. On pourra aussi prendre pour exemple la propagation de l'incendie. Dans la présente étude, celle-ci est prédite au cours du temps et également spatialement par le code de calcul. Dans l'étude de flux thermique, le mode de propagation de l'incendie est prescrit. En conséquence, les résultats obtenus dans la présente étude ne peuvent être exploités pour évaluer l'atteinte des objectifs d'autres études, quand bien même concernant le projet Green Dock.

3.1. - CHOIX DE LA CELLULE

Les cellules sont très similaires entre les niveaux RDC et R+2 et également entre les niveaux R+1 et R+3. Ces similarités concernent leur géométrie, leurs dimensions, la présence ou non d'une mezzanine, le mode de stockage en rack. Aussi, le désenfumage de ces cellules est dimensionné suivant les mêmes principes et les mêmes règles. Enfin, les planchers et planchers hauts de toutes les cellules disposent d'une tenue au feu CF2h, même au niveau R+3.

Au regard de ces similarités, il est retenu de conduire la présente étude sur la cellule A1 :

- Les cellules des niveaux R+1 et R+3 présentent une densité de charge calorifique plus élevée que celles des niveaux RDC et R+2,
- Les cellules du niveau R+1 sont contigus et superposées (au-dessus et en-dessous) à d'autres cellules.

3.2. - DEPART DE FEU ET PROPAGATION DE L'INCENDIE

La cellule est protégée par une installation sprinkler. **On ne retient pas dans la définition du scénario la limitation de l'activité du foyer par le sprinkler ainsi que l'effet de l'aspersion d'eau sur l'activité du foyer ou sur les fumées.**

Trois scénarios sont étudiés, faisant varier la position du départ de feu : à l'OUEST à proximité de la façade de la cour camion (sans tenue au feu), au centre de la cellule et à l'EST de la cellule (cf. Figure 7). Ces positions permettent d'évaluer l'impact de la ventilation du foyer sur les actions thermiques, notamment du plancher haut, ainsi que la proximité de la paroi séparative à l'EST sur les actions thermiques sur cette-dernière.

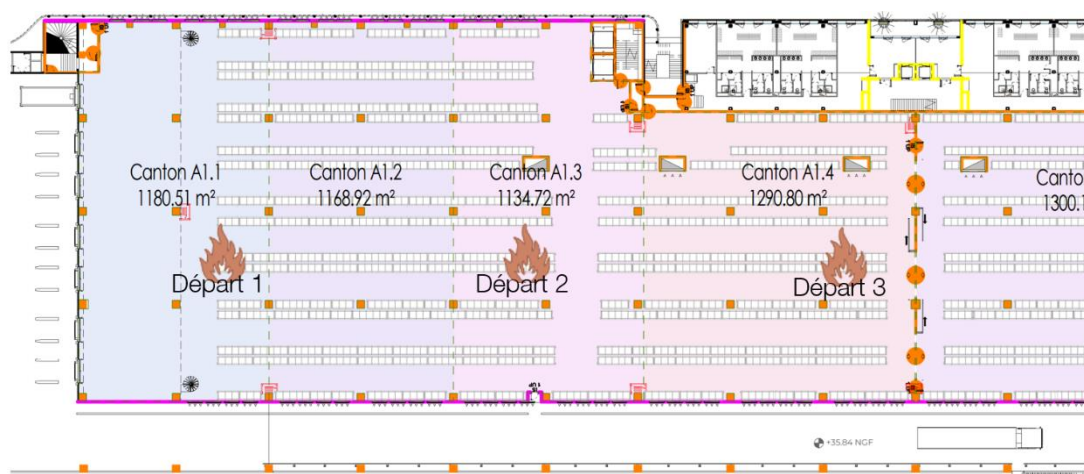


Figure 7 : Position du départ de feu dans les trois scénarios

Les départs de feu sont positionnés sur les cantons A1.1, A1.3 et A1.4 donnant respectivement les scénarios 1, 2 et 3. Le départ de feu est réalisé au milieu d'un rack double, en pied de rack (cf. Figure 7). Le départ de feu est appliqué sur la surface de deux palettes en vis-à-vis. La source au démarrage du feu libère environ 700 kW.

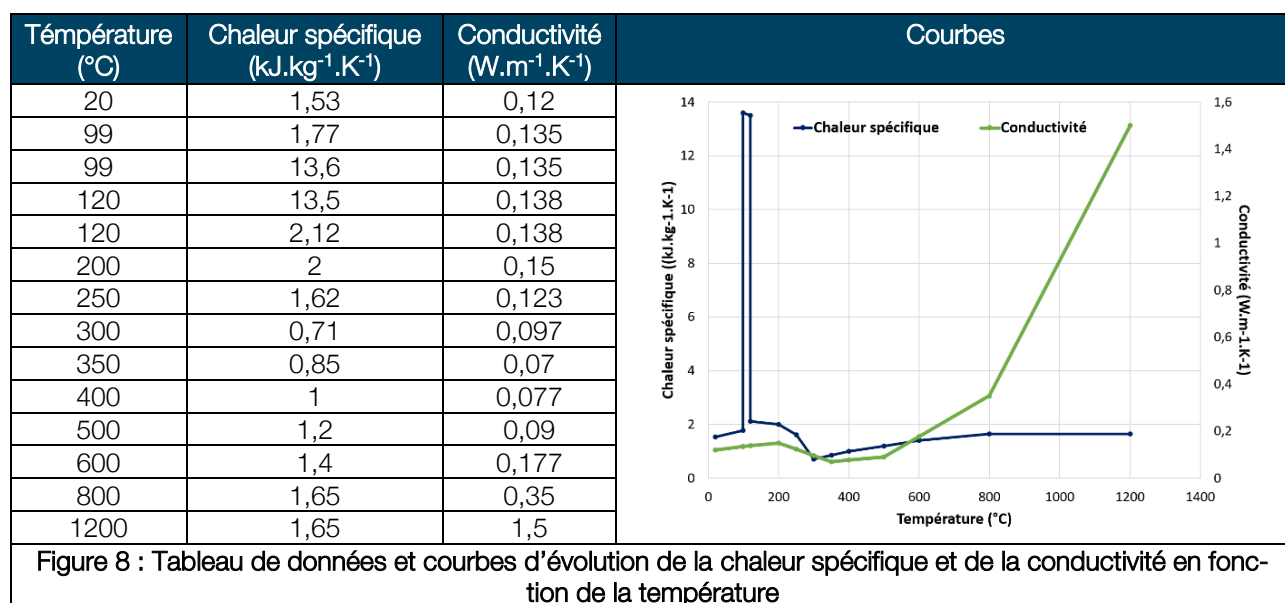
La propagation du feu aux autres palettes stockées est ensuite modélisée à partir d'une température d'inflammation. **La propagation du feu aux autres palettes stockées est donc calculée par le code de calcul et est non prescrite.**

En première approche, la température d'inflammation est prise dans la référence [23]. La valeur de 250 °C est retenue car « cela constitue une des températures d'inflammation les plus basses identifiées parmi les produits susceptibles d'être stocké [dans un entrepôt relevant de la rubrique n° 1510] ». La propagation du feu aux racks voisins est pilotée par le rayonnement thermique de la flamme et également au contact des fumées chaudes, ce par les transferts de chaleur combinés par convection et par rayonnement.

L'analyse des résultats, restituée dans le chapitre 6. - , met en lumière que cette température d'inflammation pour un départ de feu dans le canton A1.3 conduit à brûler 57% de la masse combustible présente dans la cellule en 2h. Aussi, ces résultats montrent qu'en dépit de la masse combustible non brûlée dans la cellule, le feu est quasi éteint après 1h30. Enfin, ces résultats montrent que les actions thermiques sont bien inférieures à celles d'un essai conventionnel de résistance au feu où l'action thermique sur le corps d'épreuve suit la courbe ISO 834.

En conséquence, de sorte de favoriser une cinétique de développement plus rapide, de mobiliser davantage de palettes dans la cellule et d'obtenir des actions thermiques plus élevées sur les cibles, une température d'inflammation plus basse est considérée. En ce sens, nous considérons de façon arbitraire une température d'inflammation de 200°C pour certains scénarios.

Le modèle numérique comprend des palettes sur trois niveaux, jusqu'à 6 m de stockage. Leurs dimensions sont définies de façon à se rapprocher de celles d'une palette type 1510 (1,25 m*0,80 m *1,50 m) tout en rattachant à la discrétisation spatiale du modèle numérique (25 cm * 25 cm * 25 cm). La chaleur dégagée par chaque palette est prise égale à 1525 kW comme indiqué dans la référence [23], sa durée de combustion est de 45 min. La chaleur dégagée par chaque palette est modélisée par un débit de chaleur surfacique d'environ 200 kW/m² de sur chaque face de la palette. La palette-type correspondant à la rubrique 1510 étant composée de matières cellulosique et plastique avec une majorité d'éléments cellulosiques. Les valeurs de la chaleur spécifique ainsi que la conductivité sont extraites de l'Eurocode 5 concernant le bois [24]. Elles varient en fonction de la température et sont explicitées dans la Figure 8. Le taux de production de suie est pris égal à 5% et la chaleur de combustion est prise égale à 25 MJ/kg.



3.3. - ETAT DES FAÇADES ET PAROIS

Le Tableau 3 rappelle les caractéristiques des façades de la cellule d'étude.

	Cellule A1			
Composition de la paroi	Monocomposante			
Structure Support	Poteau béton			
R : Résistance au feu	120			
Paroi	Paroi est	Paroi nord	Paroi ouest	Paroi sud
Matériau	Béton armé	Panneaux sandwich (*)	Panneaux sandwich	Panneaux sandwich (*)
E : Etanchéité aux gaz chauds (min)	120	120	-	120
I : Critère d'isolation de la paroi (min)	120	120	-	120
Y : Résistance des Fixations (min)	120	120	-	120

(*) Ecran thermique métallique

Tableau 3 : Caractéristique des parois de la cellule A1

Le feu est simulé sur une durée de 2h. Passé 1h30, le débit de pyrolyse et la puissance libérée par le feu ont très fortement diminué (cf. chapitre 6. -). En conséquence, passé 1h30, les actions thermiques sur le plancher haut et sur la paroi séparative ont également très fortement diminué. En cohérence, les parois de la cellule bénéficiant d'une tenue au feu conventionnelle sur une durée de 2h, sont considérées intègres sur toute la durée de l'incendie. Cela concerne la paroi EST ainsi que les façades NORD et SUD.

En ce qui concerne la façade située à l'OUEST, elle est composée de panneaux sandwich ne présentant aucune résistance au feu. Dans les scénarios, il est supposé de façon arbitraire que sa ruine débute après 15 min. Cette durée correspond à la performance minimale en résistance au feu. Comme l'illustrent les résultats présentés dans le chapitre 6. - , considérer la ruine de cette façade permet ainsi de poursuivre le développement du feu et de maximiser le dégagement de chaleur et les actions thermiques à l'intérieur de la cellule.

Pour la façade OUEST, passé 15 min, la vitesse d'affaissement de la paroi retenue est de 0,9h m/min ce qui conduit à une ruine de la façade sur un temps très court. Conformément à la référence [23], la hauteur résiduelle est de 0,3 h après le temps de ruine est de 50 s.

3.4. - DIPOSITIF ET MISE EN ŒUVRE DU DESENFUMAGE

Le délai de détection t_d par la DAI est estimé pour chaque position de départ de feu et chaque température d'inflammation par un calcul détaillé dans le Chapitre 5. - . Il ressort de cette analyse que le délai de détection t_d est inférieur à 30 s dans le canton sinistré, inférieur à 1 min 30 dans le(s) canton(s) adjacent(s) au canton sinistré, inférieur à 2 min 30 dans le canton suivant et éventuellement 3 min 30 pour le dernier canton. Les tableaux ci-dessous reprennent le délai de détection dans chacun des cantons de la cellule.

	Primo détection	Antépénultième détection	Pénultième détection	Ultime détection
Scénario 1 (200°C) Départ de feu dans le Canton A1.1	30 s (Canton A1.1)	90 s (Canton A1.2)	150 s (Canton A1.3)	210 s (Canton A1.4)
Scénario 2a (250°C) Départ de feu dans le Canton A1.3	30 s (Canton A1.3)	90 s (Canton A1.2 et A1.4)	150 s (Canton A1.1)	N/A
Scénario 2b (200°C) Départ de feu dans le Canton A1.3	30 s (Canton A1.3)	90 s (Canton A1.2 et A1.4)	150 s (Canton A1.1)	N/A
Scénario 3 (200°C) Départ de feu dans le Canton A1.4	30 s (Canton A1.4)	90 s (Canton A1.3)	150 s (Canton A1.2)	210 s (Canton A1.1)

Pour la mise en œuvre des dispositifs d'évacuation de fumée, s'agissant de dispositifs asservis à la détection incendie, ils sont mis en œuvre à ces délais de détection.

Pour les portes donnant sur l'extérieur assurant l'amenée d'air neuf, on retient un délai pessimiste intégrant le délai de détection automatique d'incendie t_d , un délai pour ouvrir ces portes à pied d'œuvre (6 min). Les dispositifs de désenfumage sont donc mis en œuvre 6 min 30 après le début du feu (cf. Chapitre 5. -). À noter qu'un délai plus tardif de ces portes conduirait à limiter le développement du feu et donc à minimiser les températures à l'intérieur de la cellule.

Le désenfumage est assuré par 36 ouvrants en façade SUD, 15 ouvrants en façade NORD ainsi que 3 exutoires. Ces dispositifs sont ouverts, par canton, aux délais de détection. Cela est résumé dans le tableau suivant.

Cantons	Positions	Caractéristiques des dispositifs	Temps d'ouverture par scénario
Canton A1.1	Façade SUD	7 ouvrants type G4 de SL unitaire 1,39 m ²	Scénario 1 : 30 s Scénario 2a & 2b : 2 min 30 s Scénario 3 : 3 min 30 s
	Façade NORD	4 ouvrants type G3 de SL unitaire 1,14 m ² 4 ouvrants type G8 de SL unitaire 2,45 m ²	Scénario 1 : 30 s Scénario 2a & 2b : 2 min 30 s Scénario 3 : 3 min 30 s
Canton A1.2	Façade SUD	8 ouvrants type G4 de SL unitaire 1,39 m ²	Scénario 1 : 1 min 30 s Scénario 2a & 2b : 1 min 30 s Scénario 3 : 2 min 30 s
	Façade NORD	8 ouvrants type G5 de SL unitaire 1,65 m ²	Scénario 1 : 1 min 30 s Scénario 2a & 2b : 1 min 30 s Scénario 3 : 2 min 30 s
Canton A1.3	Façade SUD	4 ouvrants type G4 de SL unitaire 1,39 m ²	Scénario 1 : 2 min 30 s Scénario 2a & 2b : 30 s Scénario 3 : 1 min 30 s
	Exutoires	1 exutoire de SL 4.5 m ²	Scénario 1 : 2 min 30 s Scénario 2a & 2b : 30 s Scénario 3 : 1 min 30 s
	Façade NORD	8 ouvrants type G5 de SL unitaire 1,65 m ²	Scénario 1 : 2 min 30 s Scénario 2a & 2b : 30 s Scénario 3 : 1 min 30 s
Canton A1.4	Façade SUD	12 ouvrants type G5 de SL unitaire 1,65 m ²	Scénario 1 : 3 min 30 s Scénario 2a & 2b : 1 min 30 s Scénario 3 : 30 s
	Plafond	2 exutoires de SL unitaire 4,5 m ²	Scénario 1 : 3 min 30 s Scénario 2a & 2b : 1 min 30 s Scénario 3 : 30 s

Tableau 4 : Récapitulatif des dispositifs de désenfumage assurant l'évacuation de fumée

3.5. - SYNTHESE DES SCENARIOS RETENUS

Trois scénarios d'étude sont retenus faisant varier la position du départ de feu. Le tableau ci-dessous précise les caractéristiques de chaque scénario.

Scénario de départ de feu et de propagation de l'incendie	Prise en compte du sprinkler	Mise en œuvre du désenfumage
Température d'inflammation 250°C		
Scénario 2a, départ de feu : en pied d'un rack, sur le canton A1.3 au milieu d'un rack double Propagation de l'incendie : Température d'inflammation de 250 °C	Non	Canton A1.1 : 2 min 30 Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 30 s Canton A1.4 : 1 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Température d'inflammation 200°C		
Scénario 1, départ de feu : en pied d'un rack, sur le canton A1.1 au milieu d'un rack double Propagation de l'incendie : Température d'inflammation de 200 °C	Non	Canton A1.1 : 30 s Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 2 min 30 Canton A1.4 : 3 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Scénario 2b, départ de feu : en pied d'un rack, sur le canton A1.3 au milieu d'un rack double Propagation de l'incendie : Température d'inflammation de 200 °C	Non	Canton A1.1 : 2 min 30 Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 30 s Canton A1.4 : 1 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Scénario 3, départ de feu : en pied d'un rack, sur le canton A1.4 au milieu d'un rack double Propagation de l'incendie : Température d'inflammation de 200 °C	Non	Canton A1.1 : 3 min 30 Canton A1.2 : 2 min 30 Canton A1.3 : 1 min 30 Canton A1.4 : 30 s Porte de quais : 6 min 30

Pour tous les scénarios, la température ambiante est identique à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, elle est égale à 20°C. Les effets de vent ne sont pas pris en compte dans ces simulations.

4. - MODELE NUMERIQUE ET GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES

4.1. - OUTIL DE CALCUL UTILISE

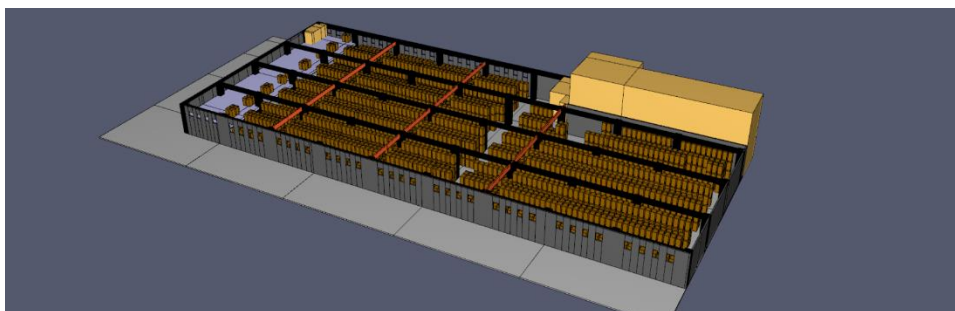
Le logiciel FDS (*Fire Dynamics Simulator*) développé aux États-Unis par le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) est utilisé dans sa version 6.7 pour simuler de manière tridimensionnelle le mouvement de la fumée à l'intérieur du volume d'étude. Il repose sur un modèle de champ qui résout les équations de la mécanique des fluides par la méthode des volumes finis en s'appuyant sur un maillage spatial cartésien. Il permet la détermination fine au cours du temps de grandeurs locales (température, vitesse, composition chimique, etc.) à l'intérieur du volume d'étude au prix de temps de calculs élevés.

4.2. - MODELE NUMERIQUE

Le modèle numérique est construit. Il représente la cellule A1. Un aperçu du modèle est donné sur la Figure 9. Ce modèle résulte du compromis entre les possibilités du logiciel FDS, la géométrie, les dimensions de l'ouvrage et la performance des ordinateurs. Il est composé de mailles élémentaires parallélépipédiques de largeur 25 cm, de longueur 25 cm et de hauteur 25 cm. Cela conduit à près de 8 170 500 mailles.

À l'intérieur de la cellule, les modèles intègrent le stockage en racks des palettes (cf. Figure 10), sur le plancher du R+1 ainsi que sur la mezzanine.

Concernant la nature des parois, le sol, les parois verticales et le plafond (non isolés) sont considérées isothermes et sont maintenues à température ambiante (20°C).



Depuis le SUD EST



Depuis le NORD OUEST

Figure 9 : Aperçu du modèle numérique



Figure 10 : Stockage en rack modélisé

4.3. - GRANDEURS PHYSIQUES EXPLOITEES

Le développement du feu dans la cellule et les actions thermiques sur les éléments séparatifs sont évalués en exploitant des grandeurs physiques. Ces grandeurs caractérisent l'enfumage en ce qui concerne la détection incendie et les conditions thermiques en ce qui concerne les actions thermiques sur les parois et les planchers. Elles sont calculées par le logiciel FDS dans sa version 6.7 :

- **Le champ horizontal du coefficient d'extinction** sous le plafond, à 25 cm de la dalle. Cette grandeur caractérise l'enfumage. Une valeur nulle du coefficient d'extinction indique un espace libre de fumée.
- **La température de surface adiabatique sur les parois, plafonds et planchers.** Cette température notée T_{AST} est directement déduite des résultats de calcul et calculée implicitement depuis la version 5 du code FDS en cours de simulation par la relation suivante :

$$\varphi_{net} = \varepsilon \sigma (T_{AST}^4 - T^4) + h(T_{AST} - T)$$

Cette sortie du code permet le calcul sans approximation du flux à utiliser pour le calcul de transfert thermique. Il s'agit de la température d'échauffement maximale que peut atteindre une surface indépendamment de ses propriétés thermiques.

Il est proposé un découpage du modèle afin de préciser et faciliter l'interprétation des données. Ainsi, les cantons sont découpés en section, allant de 3 à 4, réparties selon la position de la poutraison (Figure 11). Par exemple et pour détailler, les départs de feu sont localisés dans la section 2 des cantons A1.1, A1.3 et A1.4 respectivement pour les scénarios 1, 2 (a & b) et 3.

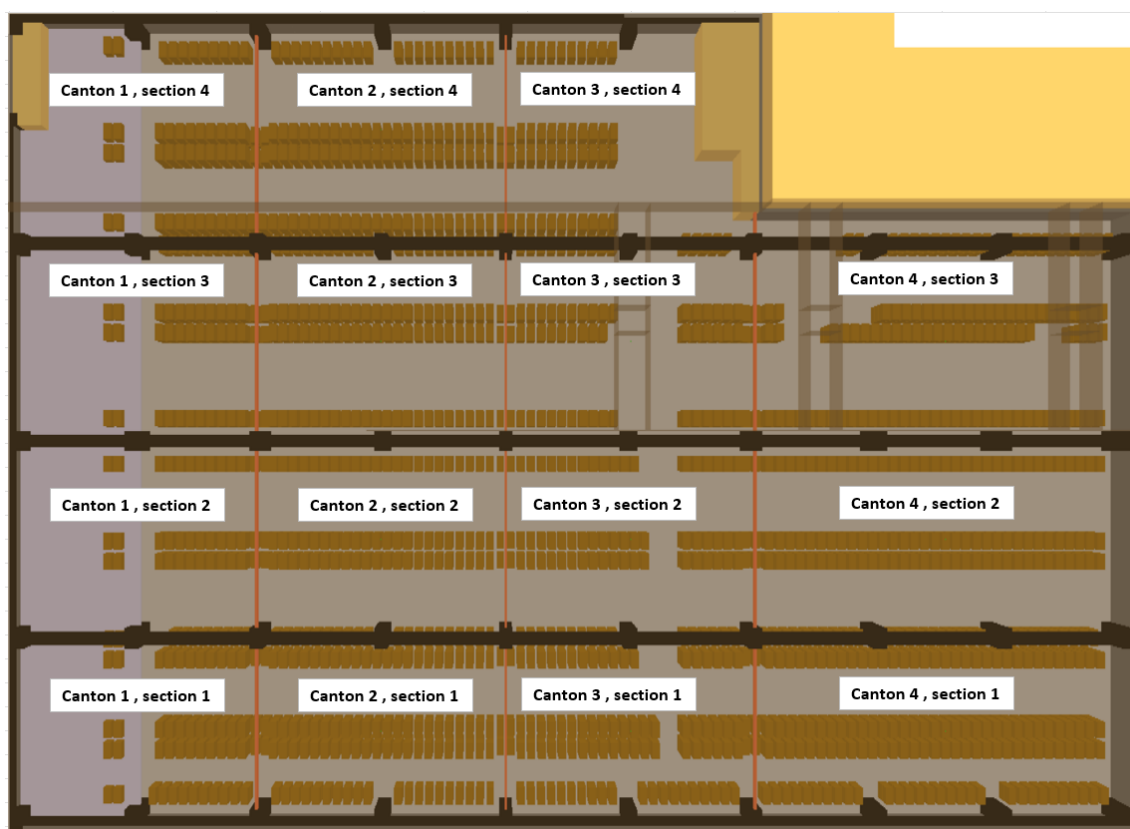


Figure 11 : Nomenclature des secteurs définies pour l'analyse des résultats

5. - EVALUATION DU DELAI NECESSAIRE A LA DETECTION INCENDIE

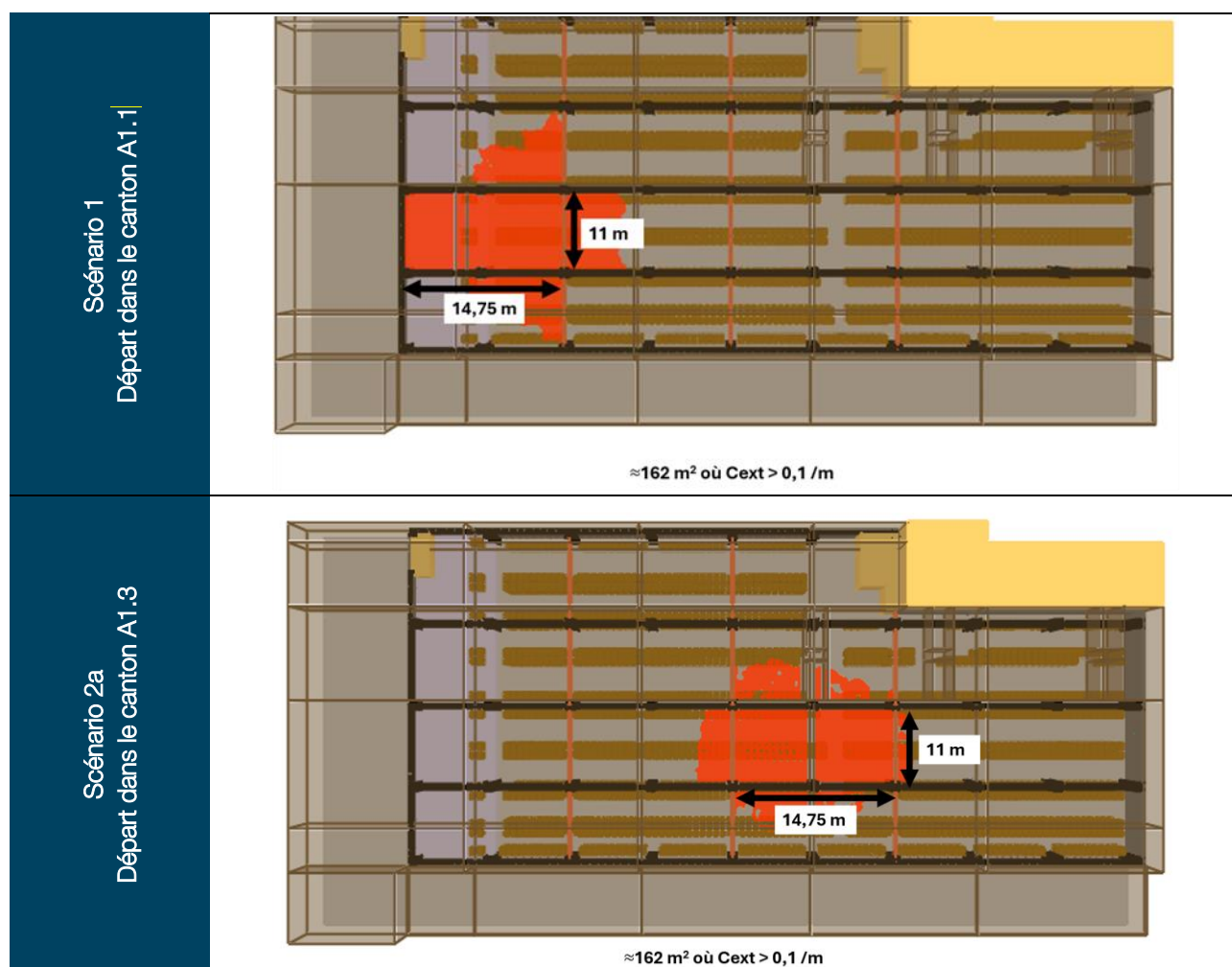
Le délai nécessaire à la détection incendie est évalué en analysant les conditions d'enfumage et les conditions thermiques pour le scénario retenu dans les premiers instants du feu. La cellule est surveillée par des détecteurs multi-ponctuels par aspiration. Ils sont positionnés sous dalle. Leur couverture répond aux exigences de la norme NF S 61-970. À ce stade de la conception, le projet n'a pas arrêté le modèle de détecteurs.

Suivant la norme NF S 61-970, un orifice de prélèvement couvrira une surface maximale de 35 m² et tout point du plafond se situera au plus à 5,9 m d'un orifice de prélèvement. Pour déterminer le seuil de sensibilité des détecteurs multi-ponctuels par aspiration, plusieurs fiches techniques sont analysées. Il apparaît que 0,1 /m correspond à la valeur plus pénalisante i.e. celle qui conduit au délai de détection le plus tardif :

- La fiche technique des modèles Phénix 2A-1V/Phénix 2A-2V/Phénix 2C-1V/Phénix 2C-2V de la marque DEF indique une sensibilité comprise entre 0,0002 m⁻¹ et 0,1 m⁻¹,
- La fiche technique des modèles Titanus ProSens et TopSens de la marque SIEMENS indique une sensibilité comprise entre 0,00015 m⁻¹ et 0,01 m⁻¹,
- La fiche technique du modèle FFAST de la marque ESSER indique une sensibilité comprise entre 0,0007 et 0,0066 m⁻¹.

5.1. - DETECTION DANS LE CANTON SINISTRE

La Figure 12 présente les conditions d'enfumage dans la cellule sinistré après 30 s. À cet instant, l'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée sont fermés. Comme l'illustre cette figure, il ressort des résultats qu'après seulement 30 s, les conditions sont telles que la fumée aura été détectée sur 5 orifices dans le canton sinistré. Autrement formulé, cette simulation montre qu'il est pertinent de faire l'hypothèse d'un délai de détection t_d dans les premiers instants du feu, **dans les trente premières secondes.**



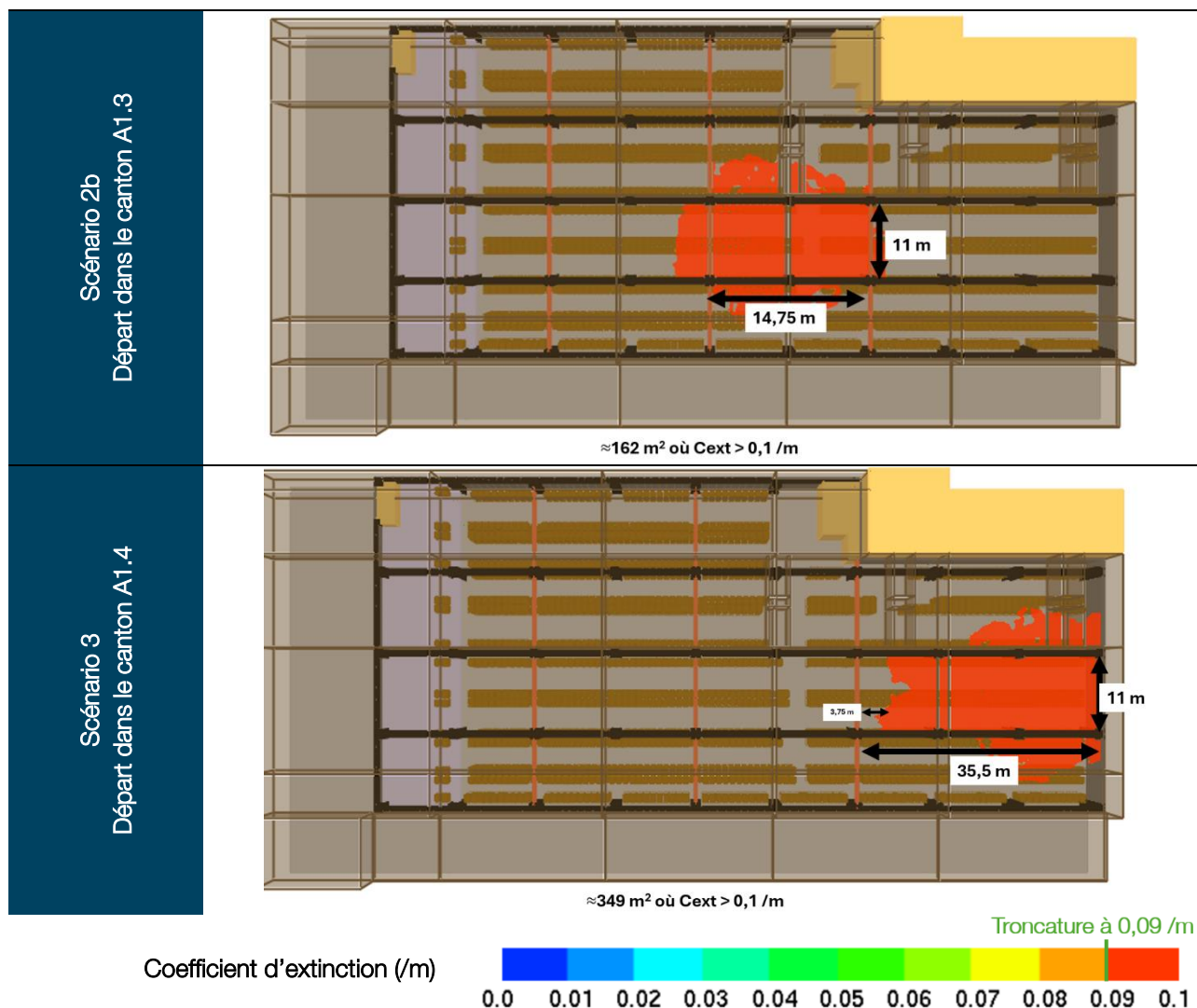
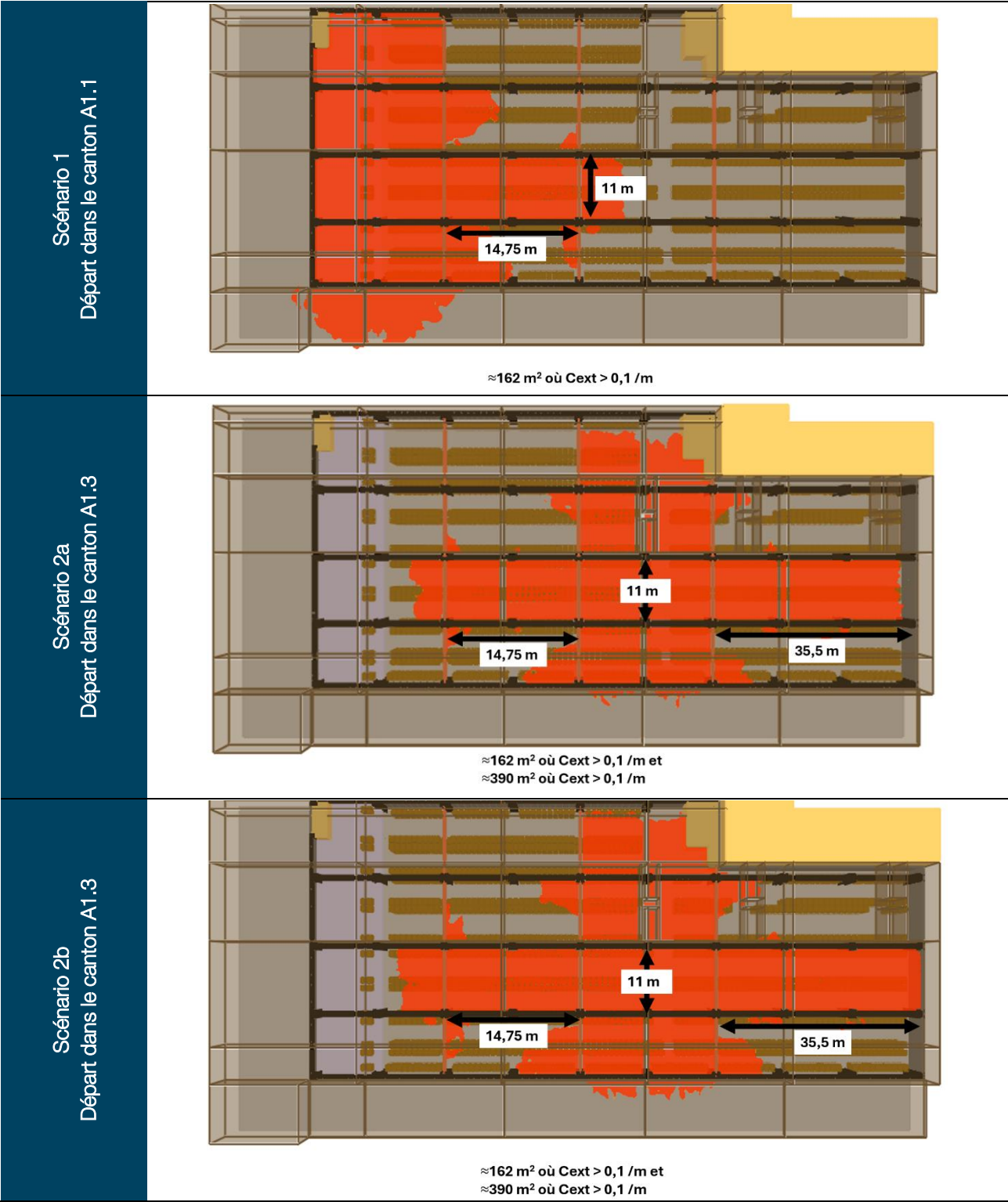


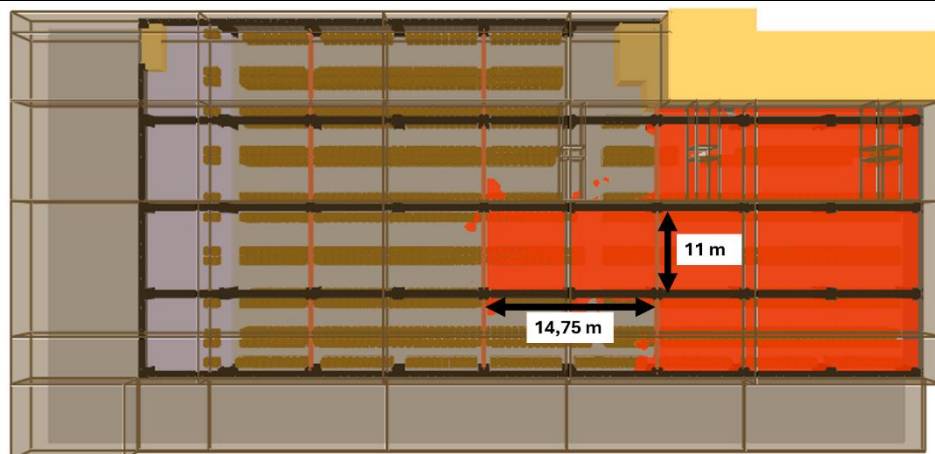
Figure 12 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 25 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 30 s

5.2. - DETECTION DANS LES CANTONS ADJACENTS

La Figure 13, la Figure 14 et la Figure 15 présentent les conditions d'enfumage dans la cellule après 1 min 30 s, 2 min 30 s et 3 min 30 s pour les quatre scénarios. À ces instants, les dispositifs d'évacuations de fumées du canton sinistré sont ouverts. Les autres dispositifs sont fermés et s'ouvrent progressivement à partir des temps exposés : 1 min et 30 s pour le(s) canton(s) adjacent(s) au canton sinistré, 2 min pour le(s) canton(s) suivant et 3 min 30 s pour le dernier canton (uniquement pour les scénarios 1 et 3). Comme illustré par les figures, il ressort des résultats qu'aux temps affichés, une majeure partie d'une section de canton (parties séparées par la poutre) atteint des conditions telles que la fumée est détectée sur par au moins 5 orifices correspondant à un minimum d'environ 71% de la surface de la section concernée. **Il est retenu alors de façon pénalisante que les temps montrés correspondent aux temps de détection par cantons et donc aux instants de mise en œuvre des systèmes de désenfumage respectifs.**



Scénario 3
Départ dans le canton A1.4

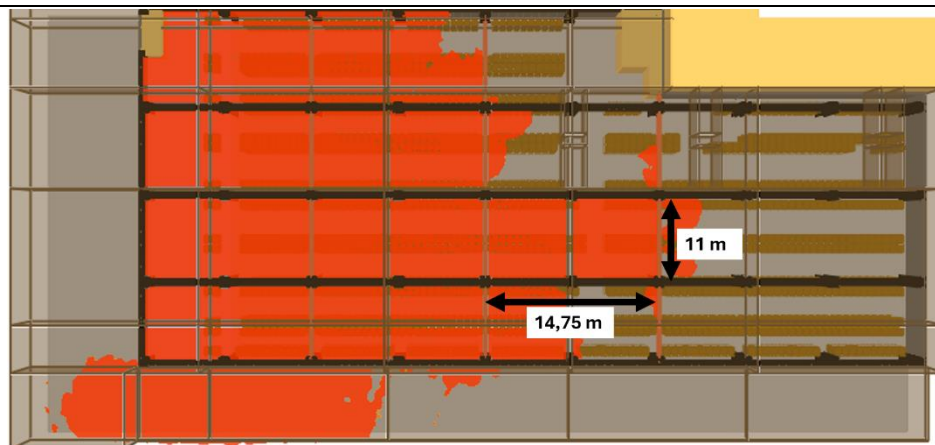


≈162 m² où Cext > 0,1 /m

Coefficient d'extinction (/m)

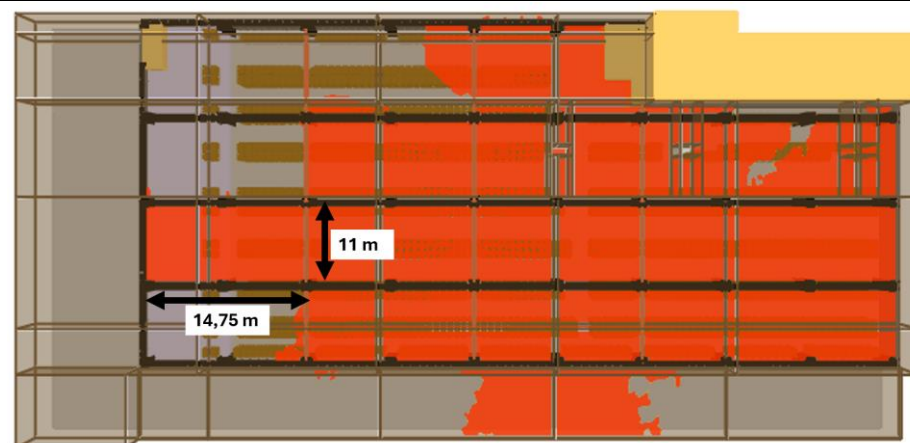
Figure 13 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 25 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 90 s

Scénario 1
Départ dans le canton A1.1

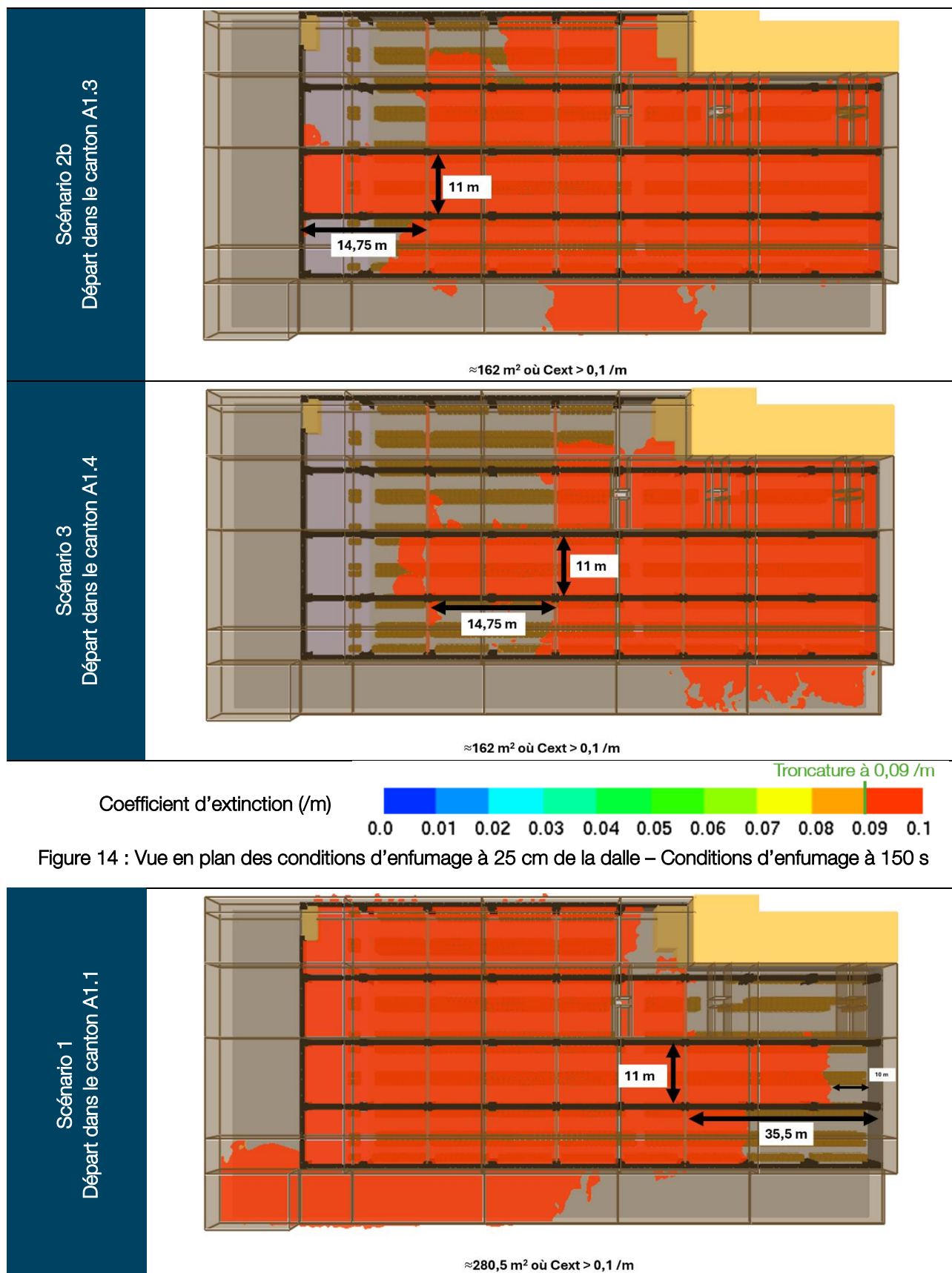


≈162 m² où Cext > 0,1 /m

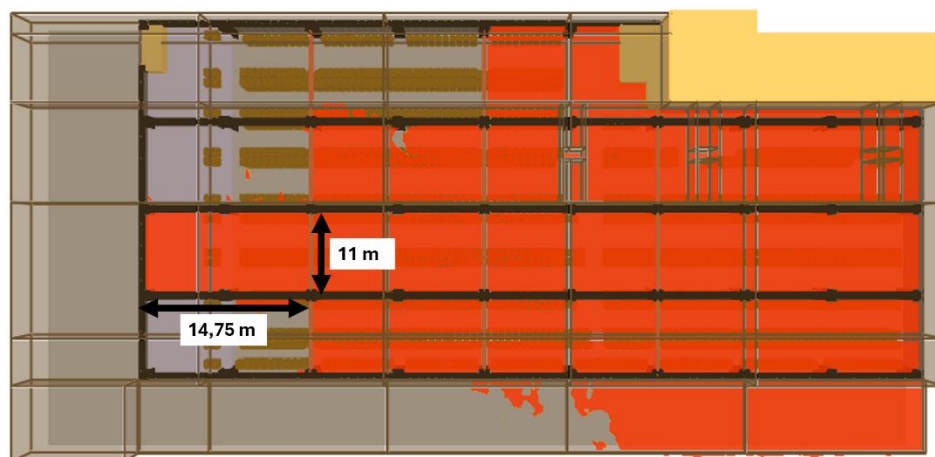
Scénario 2a
Départ dans le canton A1.3



≈162 m² où Cext > 0,1 /m



Scénario 3
Départ dans le canton A1.4



≈162 m² où $C_{ext} > 0,1$ /m

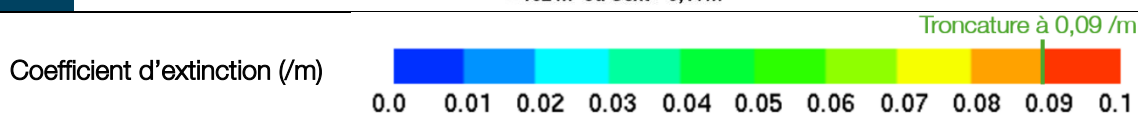


Figure 15 : Vue en plan des conditions d'enfumage à 25 cm de la dalle – Conditions d'enfumage à 210 s

5.3. - SYNHESE DES DELAIS DE DETECTION

Scénario de départ de feu	Mise en œuvre du désenfumage
Scénario 1, départ de feu : sur le canton A1.1, avec une température d'inflammation de 200°C	Canton A1.1 : 30 s Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 2 min 30 Canton A1.4 : 3 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Scénario 2a , départ de feu : sur le canton A1.3, avec une température d'inflammation de 250°C	Canton A1.1 : 2 min 30 Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 30 s Canton A1.4 : 1 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Scénario 2b, départ de feu : sur le canton A1.3, avec une température d'inflammation de 200°C	Canton A1.1 : 2 min 30 Canton A1.2 : 1 min 30 Canton A1.3 : 30 s Canton A1.4 : 1 min 30 Porte de quais : 6 min 30
Scénario 3, départ de feu : sur le canton A1.4, avec une température d'inflammation de 200°C	Canton A1.1 : 3 min 30 Canton A1.2 : 2 min 30 Canton A1.3 : 1 min 30 Canton A1.4 : 30 s Porte de quais : 6 min 30

6. - ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION

Les courbes dans ce chapitre sont réparties en code couleur afin de faciliter l'analyse. Les courbes bordeaux représentent les résultats pour le départ d'incendie dans le canton A1.1, les courbes vertes (claires pour la température d'inflammation à 250°C et foncées pour 200°C) les résultats du départ d'incendie dans le canton A1.3 et les courbes bleues les résultats du départ d'incendie dans le canton A1.4.

6.1. - PROPAGATION DE L'INCENDIE ET QUANTITE DE MASSE BRULEE

Pour rappel, la propagation de l'incendie aux palettes stockées est calculée par le code de calcul et non prescrite. La position du départ de feu impactant les conditions thermiques dans une cellule, la propagation de l'incendie diffère donc suivant le scénario.

La référence [23] concernant la méthode FLUMillog pour les études de flux thermiques dans les ICPE décrit les grandes phases de la propagation du feu. Les voici ci-après décrites en établissant la capacité du code de calcul à les prédire numériquement.

LA PHASE DE CROISSANCE ASCENDANTE.

Le feu démarrant au pied d'un rack de stockage, le feu se propage verticalement au cœur du rack, sur la hauteur de stockage (cf. Figure 16). Le mode de stockage en rack crée un effet cheminée qui favorise une montée rapide de la flamme jusqu'en partie haute du stockage. La Figure 16 présente à 2 min 30, la surface de palette en pyrolyse pour la position de départ du feu du scénario 3 (Canton A1.4). Les deux autres positions de feu et la seconde température d'inflammation conduisent à des résultats similaires. La surface en pyrolyse affiche cette forme caractéristique en V au-dessus du point d'allumage. Cette image montre que, dans les premières minutes, la propagation du feu par l'effet cheminée est bien reproduite par le code de calcul.

LA PHASE DE PROPAGATION HORIZONTALE.

Lorsque le feu atteint le sommet du rack, il entre dans une phase de propagation horizontale qui commence par le niveau le plus haut du rack (cf. Figure 17 à 10 min). La Figure 17 montre que (1) la surface en pyrolyse conserve cette forme en V et que (2) la partie supérieure du stockage qui participe au feu s'étend horizontalement de proche en proche, d'une palette à une autre.

LA PHASE DE PROPAGATION DESCENDANTE.

La surface en feu progresse ensuite vers le bas du stockage ce, depuis la partie la plus haute (cf. Figure 17 à 10 min). La Figure 17 illustre la propagation horizontale qui se poursuit et le début de la propagation descendante avec les surfaces latérales du rack qui se colorent. Aussi, cette figure montre la propagation du feu par rayonnement au rack voisin.

LA PHASE DE PROPAGATION A LA FACE SUPERIEURE DES RACKS ET EMBRASEMENT DES RACKS.

La façade OUEST de la cellule est considérée ruinée à 15 min. Cette ruine permet d'alimenter le foyer en oxygène. Pour autant, le feu se développant, la zone de dégagement de chaleur est déplacée dans la cellule vers la façade OUEST de la cellule ce qui conduit à la propagation du feu à la face supérieure des racks dans la partie OUEST de la cellule puis à l'embrasement de ces racks.

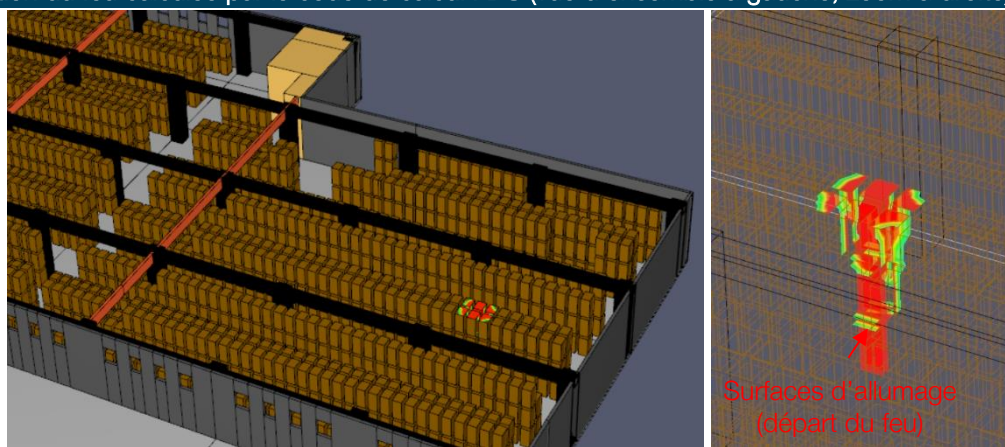
Il est à noter que pour les trois positions de départ de feu et la seconde température d'inflammation, les simulations ne conduisent jamais à une propagation instantanée de la totalité de la face supérieure des racks, ni à un embrasement complet des racks au même instant. La propagation de l'incendie est évolutive, le feu s'éteint sur certaines palettes alors même que d'autres palettes plus éloignées ne sont pas encore enflammées (cf. Figure 17).

Propagation du feu théorique [23]



Propagation du feu calculée par le code de calcul FDS (vue d'ensemble à gauche, zoom à droite)

Sc.4
Après
2 min
30



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

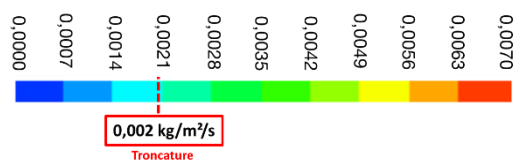
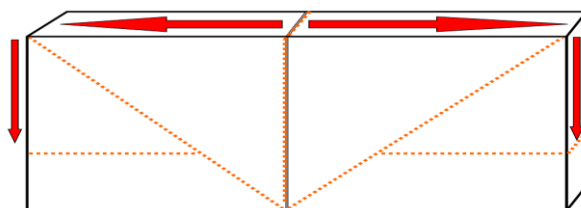


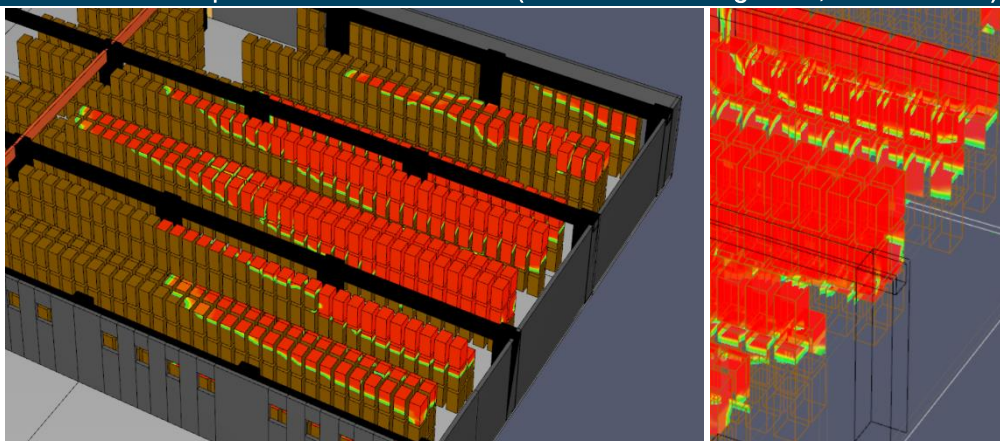
Figure 16 : Propagation du feu après le départ de feu jusqu'en partie haute du stockage [23]

Propagation du feu théorique [23]



Propagation du feu calculée par le code de calcul FDS (vue d'ensemble à gauche, zoom à droite)

Sc.4
Après
10 min



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

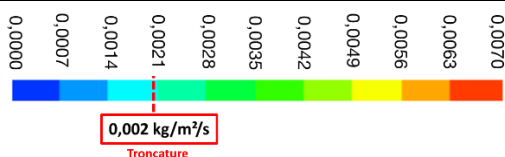


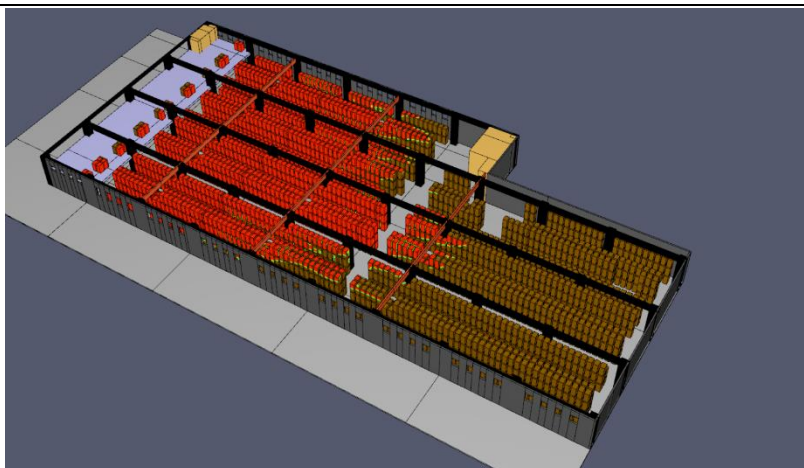
Figure 17 : Propagation du feu dans les phases de propagations horizontale et verticale [23]

La phase de propagation à la face supérieure des racks et d'embrasement des racks est détaillée ci-après pour chaque scénario.

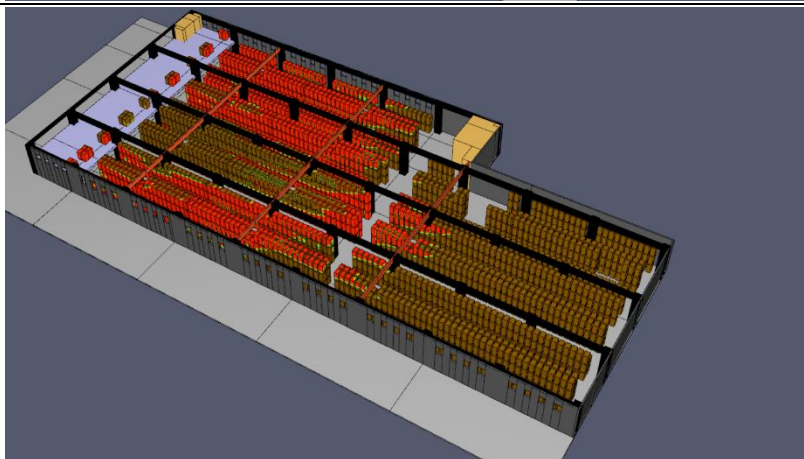
POUR LE SCENARIO 1 (DEPART DE FEU DANS LE CANTON A1.1).

Comme montré sur la Figure 18, le feu se propage de la façade OUEST vers le centre de la cellule tant qu'il est limité par le débit de pyrolyse (i.e. pas sous-ventilé) au cours des trente premières minutes. Au bout de 30 min, l'incendie commence à être contrôlé par la ventilation et sa propagation loin des amenés d'air s'arrête. Après 1h, les premières palettes enflammées s'éteignent conduisant à une réduction progressive du débit de pyrolyse et de la puissance libérée par le feu. Après 1 h 30 min, la totalité des palettes allumées lors des premières phases de l'incendie sont éteintes. L'air frais est renouvelé et ce nouvel apport de comburant permet de déclencher la combustion de quelques palettes qui ne s'étaient pas encore allumées. Les palettes intègres, qui n'ont pas pyrolysées au cours des 2 premières heures, se localisent dans la partie EST de la cellule. Il s'agit des palettes les plus éloignées de l'amenée d'air neuf principale, à savoir la façade OUEST.

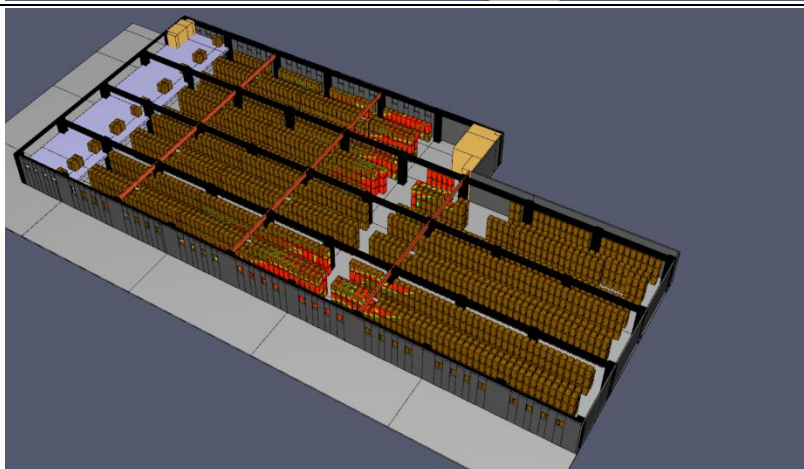
Après 30 min



Après 1h



Après 1h30



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

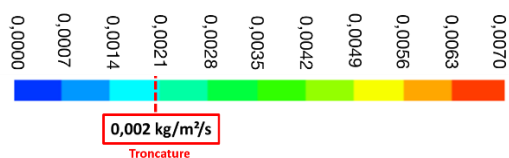
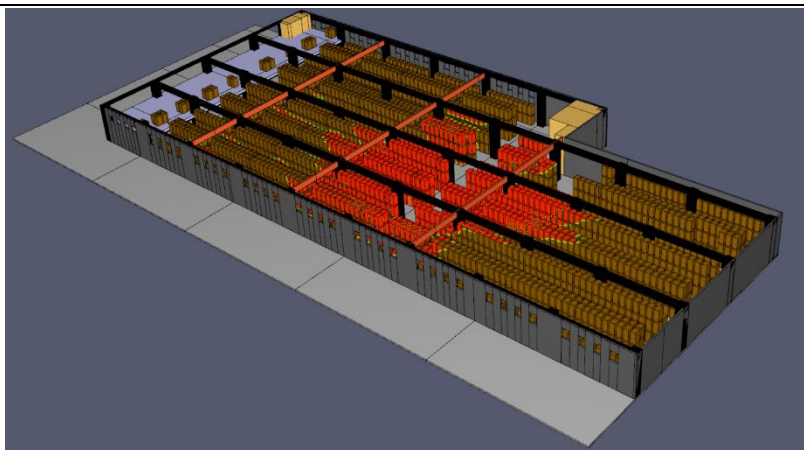


Figure 18 : Propagation du feu après 30 min, 1h et 1h30 – scénario 1

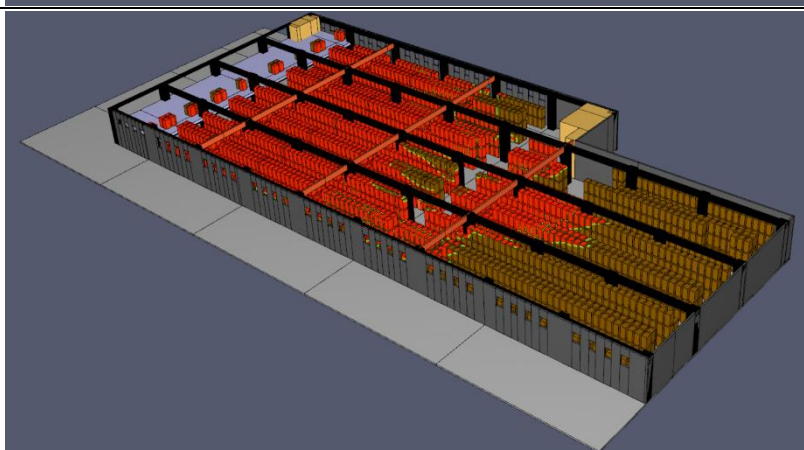
POUR LES SCENARIO 2A ET 2B (DEPART DE FEU DANS LE CANTON A1.3).

Comme montré sur la Figure 20, au bout de 30 min le feu ne se propage plus par manque de comburant. Au bout d'1 h, les premières palettes enflammées s'éteignent conduisant à une réduction du débit de pyrolyse et de la puissance libérée par le feu. Au bout d'1 h 30 min, la totalité des palettes allumées lors des premières phases de l'incendie sont éteintes. L'air frais est renouvelé et ce nouvel apport de comburant permet de déclencher l'allumage de palettes dispersées dans la cellule. La dynamique d'ignition, de propagation et d'extinction est globalement similaire avec celle du scénario 1. Il en va de même pour la quantité de combustible mobilisée.

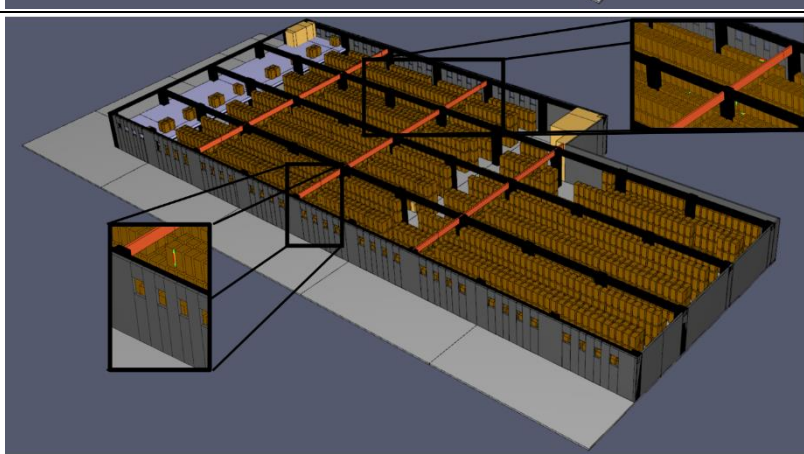
Après 30 min



Après 1h



Après 1h30



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

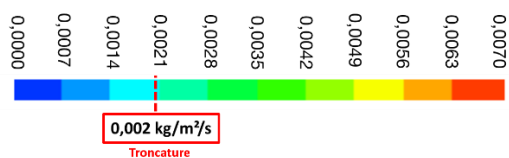
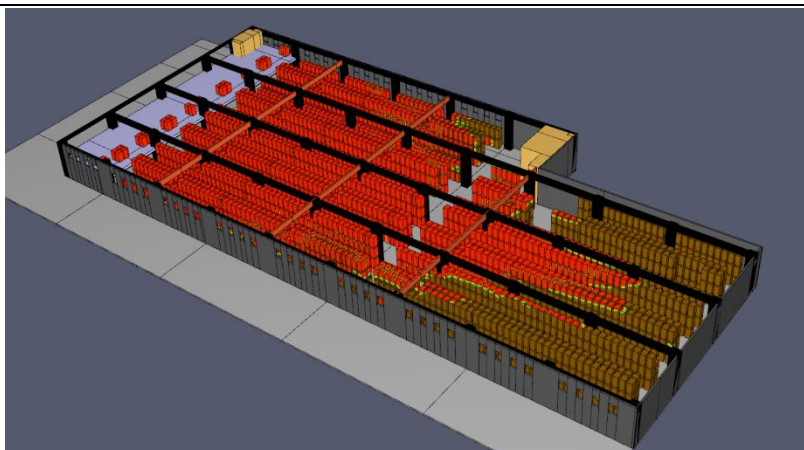
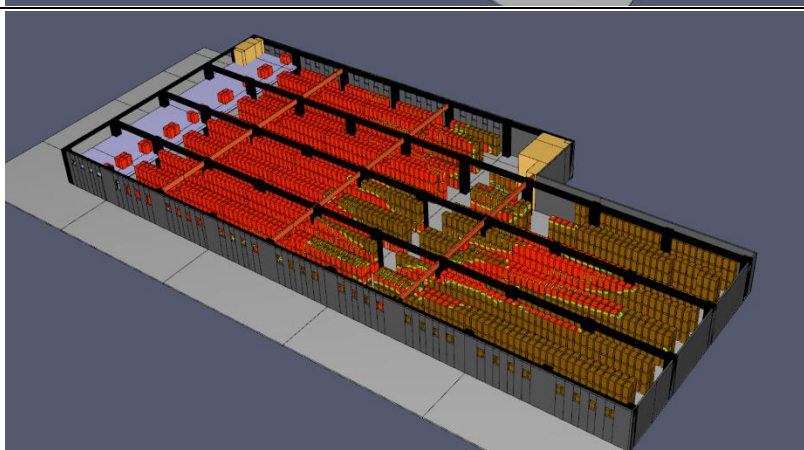


Figure 19 : Propagation du feu après 30 min, 1h et 1h30 – scénario 2a

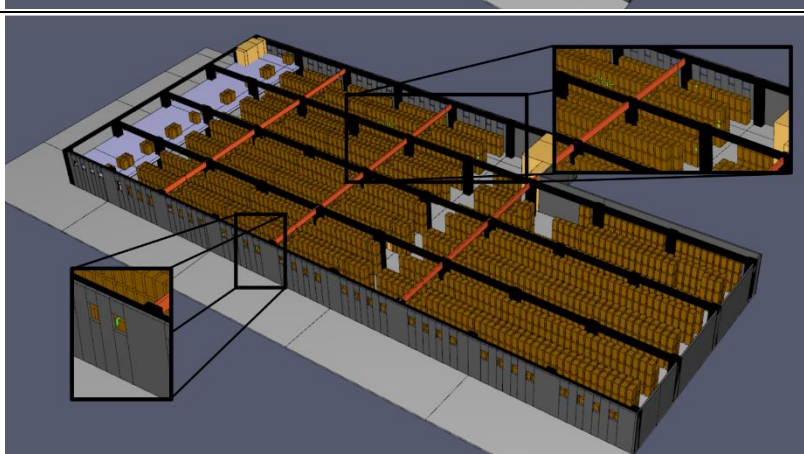
Après 30 min



Après 1h



Après 1h30



Débit de pyrolyse surfacique
(kg/m²/s)

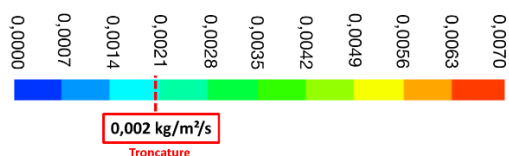


Figure 20 : Propagation du feu après 30 min, 1h et 1h30 – scénario 2b

POUR LE SCENARIO 3 (DEPART DE FEU DANS LA SECTION 2 DU CANTON A1.4).

Comme montré sur la Figure 21, au bout de 30 min le feu s'est quasiment propagé à la totalité des palettes présentes dans la cellule. Les derniers racks ne sont allumés que sur leur face extérieure malgré une température d'ambiance de la cellule supérieure à la température d'inflammation des palettes. A cet instant, L'incendie est principalement contrôlé par la ventilation. Au bout d'1 h, les premières palettes enflammées s'éteignent conduisant à une réduction de la puissance. Au bout d'1 h 30 min, la totalité des palettes allumées lors des premières phases de l'incendie sont éteintes. L'air frais est renouvelé et ce nouvel apport de comburant conduit à la combustion

des dernières faces (intérieures) qui n'avaient pas été allumées. La dynamique d'ignition, de propagation et d'extinction est globalement similaire avec celle du scénario 1 et des scénarios 2a et 2b.

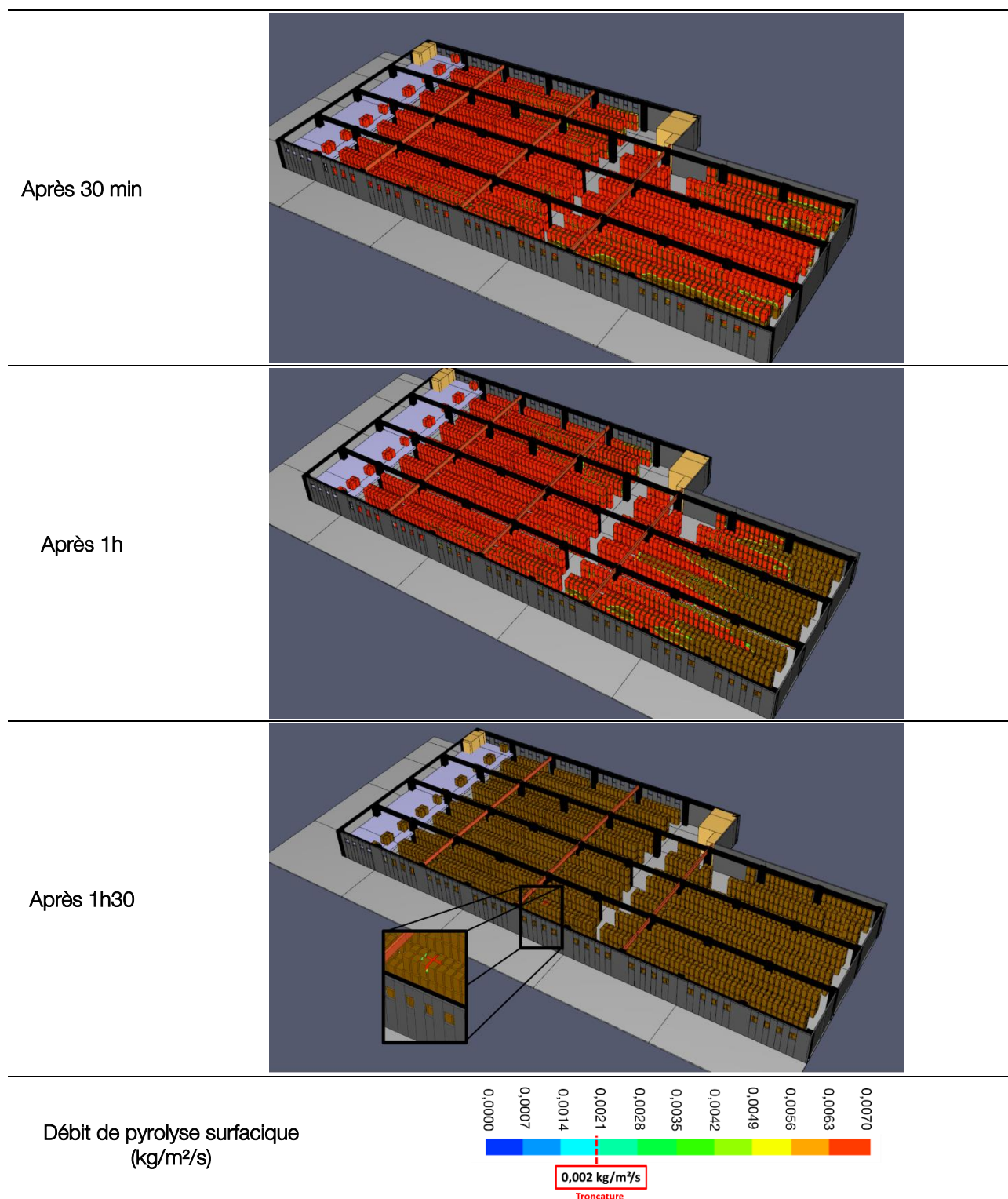


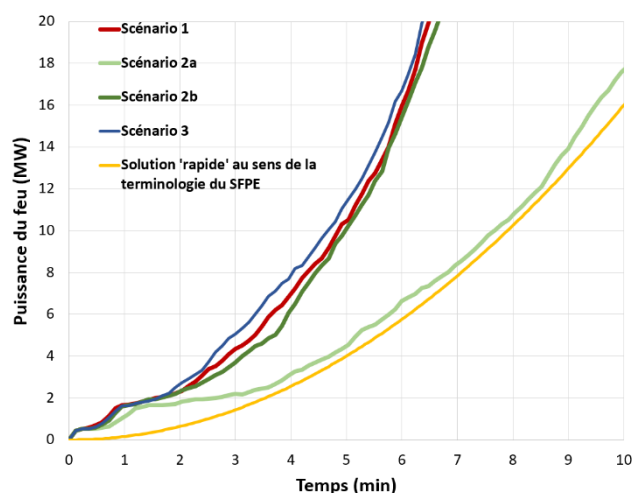
Figure 21 : Propagation du feu après 30 min, 1h et 1h30 – scénario 3

La Figure 22 zoome sur l'évolution de la puissance libérée par le feu dans les premiers instants du feu. Également sur cette figure, est représentée une cinétique de développement dite « rapide » au sens de la terminologie SFPE.

Cette figure montre que la vitesse de propagation de l'incendie pendant les 10 premières minutes pour le scénario impliquant un départ de feu dans le canton A1.3 avec une température d'inflammation de 250 °C croît quasiment suivant une cinétique théorique « rapide ». Également sur cette Figure 22, est représentée l'évolution de la

puissance du feu pour les trois scénarios considérant une température d'inflammation plus faible de 200 °C. Il apparaît que le développement du feu est semblable entre les scénarios. Il croît plus rapidement, quasiment suivant une cinétique théorique dite « ultra-rapide ». L'abaissement de la température d'inflammation conduit donc à favoriser de façon notable la propagation de l'incendie dans la cellule.

Figure 22 : Zoom sur l'évolution temporelle de la puissance libérée par l'incendie sur les 10 premières minutes. Cette puissance est calculée par le code de calcul pour chacun des départs de feu modélisés



La Figure 23 présente l'évolution de la puissance libérée par le feu pour tous les scénarios ainsi que le débit de perte de masse. Quel que soit le scénario, cette figure montre que le développement de l'incendie dans la cellule peut être scindé en trois phases.

La première phase correspond à la phase de croissance. Elle dure environ 45 minutes pour le scénario 2a impliquant un départ de feu dans le canton A1.3 avec une température d'inflammation de 250 °C et 30 minutes pour les trois scénarios considérant une température d'inflammation plus faible de 200 °C. Le débit de pyrolyse augmente, tout comme la puissance libérée par le feu ce, jusqu'à atteindre un plateau. Plus le départ de feu est éloigné de la façade OUEST, plus grand est le nombre de palettes en feu et subséquemment le débit de perte de masse et la puissance de l'incendie.

La deuxième phase correspond à la phase de régime établi. Cette phase s'étend de 50 min jusqu'à 80 min pour le scénario 2a impliquant un départ de feu dans le canton A1.3 avec une température d'inflammation de 250 °C et de 40 min jusqu'à 60-70 min pour les trois scénarios considérant une température d'inflammation plus faible de 200 °C. La durée de la phase de régime établi est liée à la durée pendant laquelle chaque palette brûle, à savoir 45 min. Durant cette seconde phase, le débit de perte de masse est quasi-constant. En revanche, la puissance du feu évolue différemment pour certains scénarios. Hormis pour le scénario 1 impliquant un départ de feu dans le canton A1.1, au plus près de la façade OUEST, la puissance du feu ne suit pas la même évolution que le débit de perte de masse. Le feu devient piloté par la ventilation du foyer et non plus par la pyrolyse. Pour les scénarios 2a, 2b et 3 impliquant un départ de feu dans les cantons A1.3 et A1.4, plus éloignés de la façade OUEST ruinée dans la cellule, le front de flamme se déplace vers la façade OUEST pour être alimenté par le comburant ce, en allumant totalement ou partiellement les palettes sur son passage. Progressivement, le front de flamme sort par les ouvrants en façade NORD et SUD, les exutoires en toiture et la façade ruinée à l'OUEST. Après trente minutes, le front de flamme est en dehors de la cellule pour être alimenté en oxygène. Ensuite, il sort des limites du domaine de calcul conduisant à ce qu'une partie des gaz de combustion ne soit plus tracée par la simulation tout comme une partie de la puissance libérée.

La troisième phase correspond à la phase de décroissance, elle diffère suivant les scénarios. Pour le scénario n°1 impliquant un départ de feu dans le canton A1.1, au plus près de la façade OUEST, le feu décroît dans la cellule. Pour autant, un nombre conséquent de palettes s'allume puis brûle pendant cette phase libérant ainsi une puissance de feu de près de 400 MW. En ce qui concerne les deux scénarios 2b et 3, avec un départ de feu dans les cantons A1.3 et A1.4, la puissance du feu décroît de façon très conséquente. Seule une trentaine de palettes continue à brûler. Le scénario 2a suit la même dynamique que le scénario 2b décalé de dix minutes. Ainsi, il connaît aussi une importante décroissance.

Dans la simulation, la masse totale de palettes impliquée est de 532 969 kg dans la cellule. La différence de masse avec la valeur relevée dans le Tableau 2 est liée notamment à la masse de chaque palette. Dans ce tableau, il est considéré qu'une palette implique 800 kg de matière combustible. Dans les simulations, considérant une puissance maximale de 1525 kJ sur 45 min avec une chaleur de combustion de 25 MJ/kg, la masse combustible d'une palette est de l'ordre de 170 kg.

En sommant la masse de combustible brûlée sur 2h, il ressort que la proportion de combustible brûlée est de l'ordre de 60% pour le scénario 1, 57% pour le scénario 2a, 60% pour le scénario 2b et 73 % le scénario 3. La majeure partie de la masse combustible a donc été consommée au cours des deux heures de simulations. Au-delà, le feu est soit quasiment éteint, soit reste très faible en comparaison à la phase de régime établi.

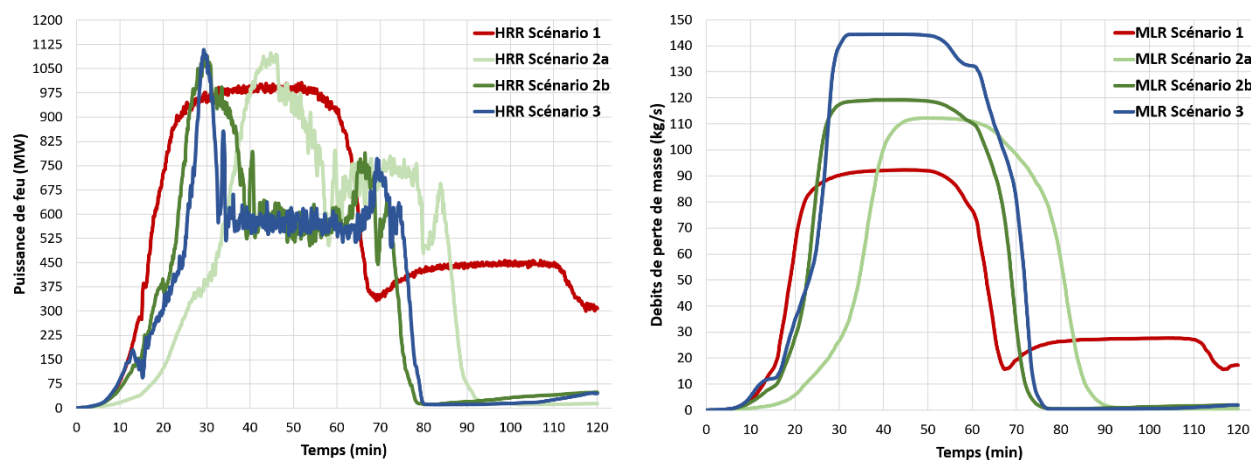


Figure 23 : Evolution temporelle de la puissance libérée par l'incendie et du débit massique sur 2 h. Cette puissance est calculée par le code de calcul pour chacune des positions de départ de feu

6.2. - ACTIONS THERMIQUES SUR LE PLANCHER HAUT DE LA CELLULE

Les actions thermiques sur le plancher haut de la cellule sont analysées selon deux manières.

Une première manière s'appuie sur les champs de température adiabatique de surface à des temps clés de la simulation afin de déterminer si les actions thermiques sont homogènes sur une même section de mesure. Ces champs sont représentés sur la Figure 24 pour les scénarios 1, 2b et 3. En ce qui concerne le scénario 2a, les résultats sont similaires à ceux du scénario 2b impliquant une température d'inflammation plus faible de 200°C avec un décalage dans le temps d'environ 20 min.

Une seconde manière s'appuie sur les courbes d'évolution temporelle des moyennes spatiales de température adiabatique de surface sur chaque section de mesure du plancher haut (cf. Figure 25 pour les scénarios 1, 2b et 3 et Figure 26 pour les scénarios 2a et 2b). De manière à aider la comparaison des actions thermiques sous feux réels avec les actions thermiques conventionnelles (pour des essais de résistance au feu), la courbe ISO 834 est tracée en jaune sur tous les graphiques de la Figure 25 et de la Figure 26.

Sont retenus comme temps pertinents 30 min, 40 min, 90 min et 120 min.

- À 30 min, l'incendie atteint sa puissance maximale pour les trois scénarios Sc. 1/2b/3 avec une température d'inflammation de 200°C, le débit de perte de masse atteint un plateau et devient quasiment constant.
- À 40 min, l'incendie atteint sa puissance maximale pour le scénario Sc. 2a. En ce qui concerne les trois autres scénarios Sc. 1/2b/3, le débit de perte de masse reste constant. Pour autant, la puissance de feu chute fortement (près de la moitié du maximum). Comme expliqué précédemment, cette chute de puissance s'explique par le déplacement du front de flamme en quête d'oxygène hors de la cellule et d'une perte des gaz de pyrolyse hors du domaine de calcul de FDS.
- À 90 min, la majeure partie des palettes initialement enflammées sont éteintes, ce qui amène la puissance libérée et le débit de perte masse à baisser fortement. Au-delà de 90 min, la puissance du feu est directement corrélée par le débit de pyrolyse. La ventilation du foyer change, la combustion se produit à l'intérieur de la cellule.
- À 120 min. Il s'agit du dernier instant de la simulation, à l'issue de la durée conventionnelle de résistance au feu de 2h.

L'analyse des résultats permet d'établir que :

- Les actions thermiques sont maximales sur le plancher haut de la cellule quand la puissance libérée par le feu à l'intérieur de la cellule est elle-même maximale (i.e. vers 30 à 40 min). À cet instant, l'incendie est généralisé à la cellule, l'action thermique sur le plancher haut est relativement uniforme sur chaque section délimitée par des poutres. La température est au maximum de 600°C.

- Lorsque le feu devient sous-ventilé et que la réaction de combustion est réalisée à l'extérieur de la cellule, l'évolution de la puissance du feu se décorrèle du débit de perte de masse et la température d'action thermique sur le plancher haut diminue très fortement notamment dans la partie de la cellule éloignée de la façade OUEST ruinée (vers 40 min pour les scénarios 2b/3).
- Au-delà de 90 min, le nombre de palettes continuant à brûler dans le scénario 1 conduit à une puissance de feu libérée élevée. L'action thermique sur le plancher haut diminue et est relativement uniforme sur chaque section délimitée par des poutres. Pour les scénarios 2b et 3, impliquant peu de palettes en comparaison (une trentaine de palettes), le feu devient localisé. Les actions thermiques deviennent alors très hétérogènes avec des écarts allant jusqu'à 300°C dans une seule section.
- Les scénarios impliquant des températures d'inflammation différentes conduisent à des résultats similaires :
 - Le changement de température d'inflammation décale dans le temps la dynamique du feu sans pour autant impacter l'amplitude des actions thermiques. L'agression thermique sur le plancher haut reste donc du même ordre de grandeur et la manière d'agresser le plancher haut (localement ou de façon uniforme) reste similaire.
 - Cette agression thermique reste très en-deçà de la courbe de feu conventionnelle ISO 834. Quel que soit le scénario étudié, les actions thermiques sur le plancher haut sont en moyenne sur chaque section de mesure, inférieure à 500°C. Or, cette valeur correspond à la température critique limite (à partir de laquelle la ruine est susceptible de se produire) pour les éléments en béton [Eurocode 2].

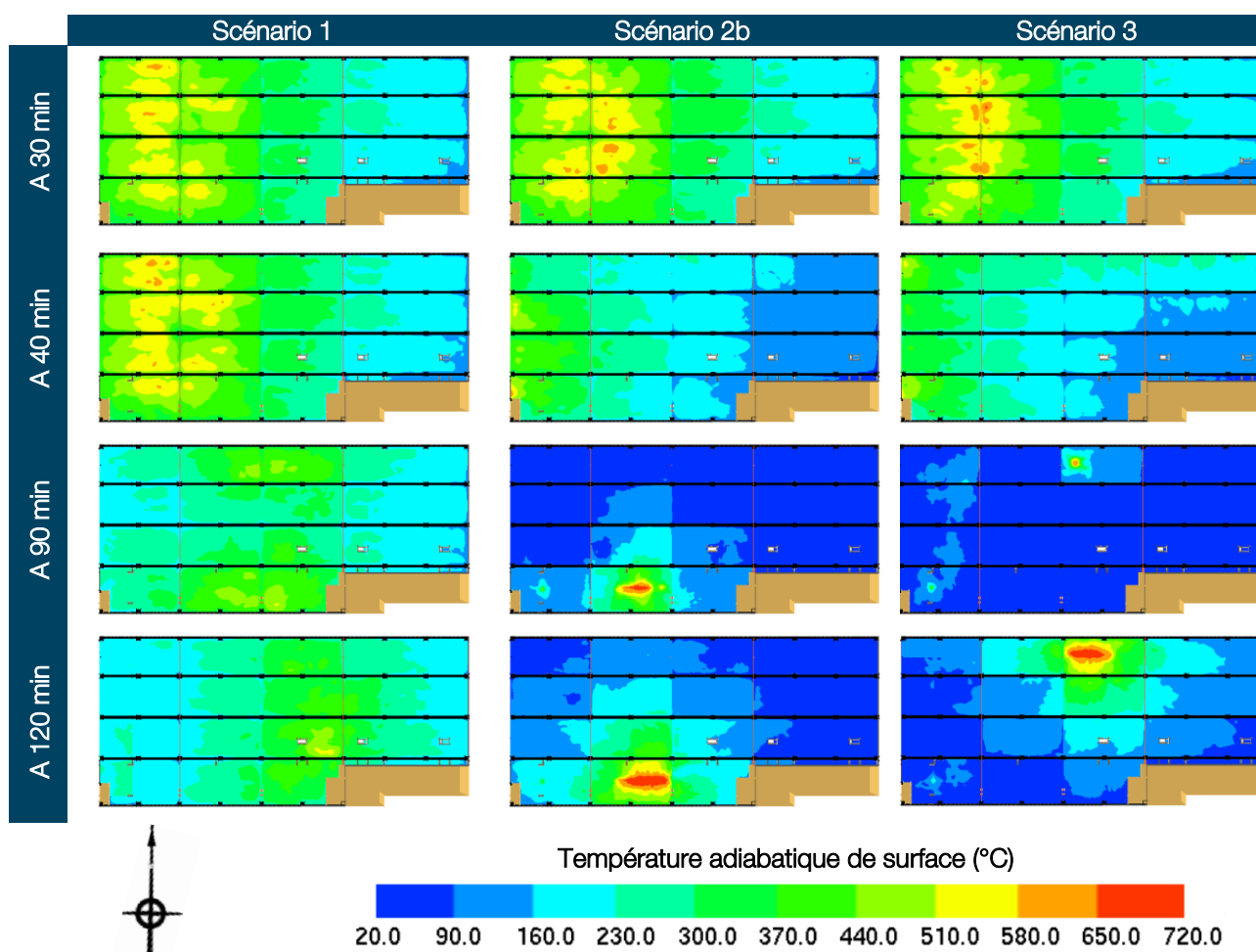
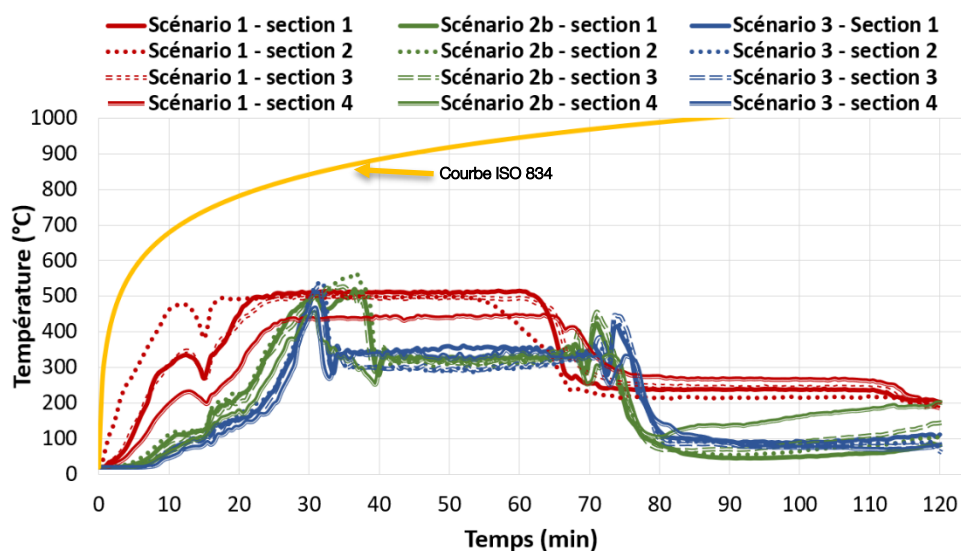
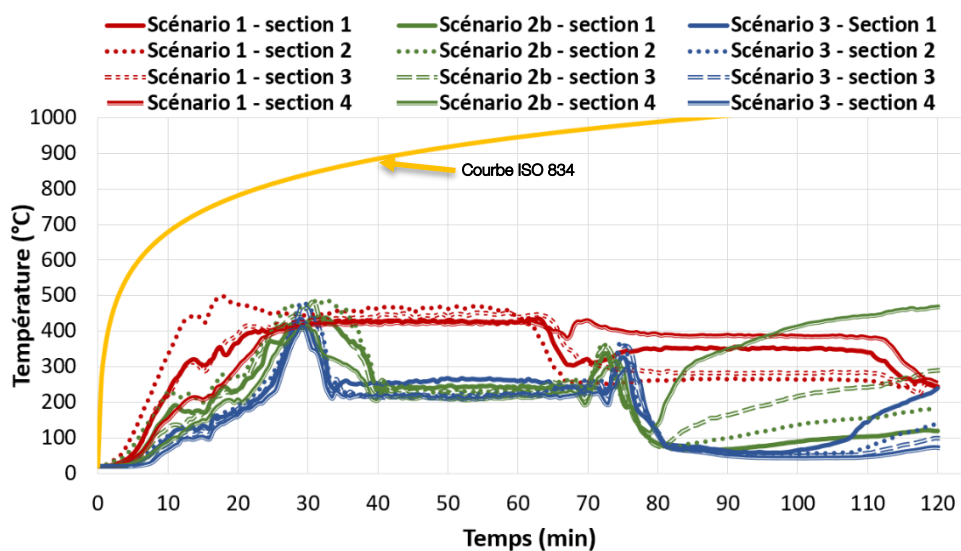


Figure 24 : Températures adiabatiques de surfaces du plancher haut de la cellule pour les scénarios 1, 2b et 3 à 30 min, 40 min, 90 min, 120 min.

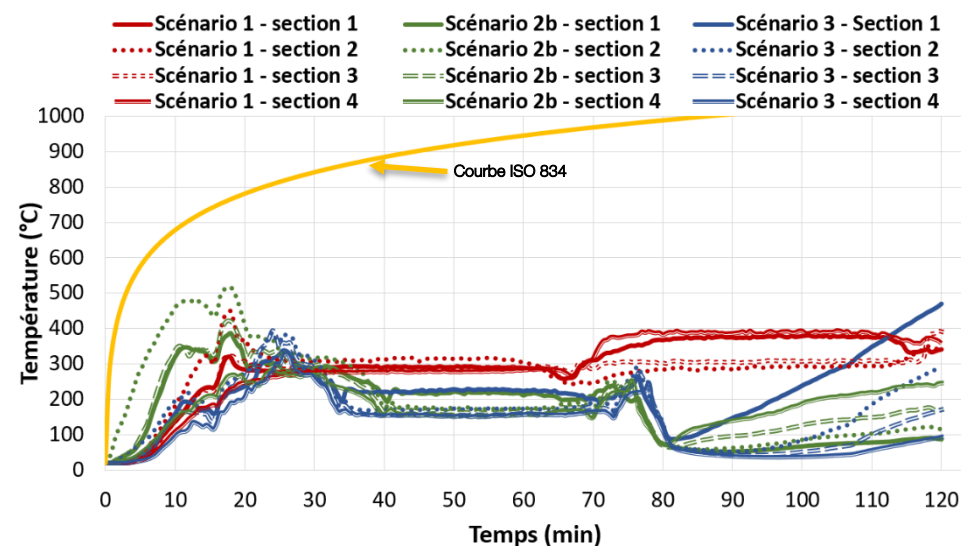
Canton A1.1



Canton A.1.2



Canton A1.3



Canton A1.4

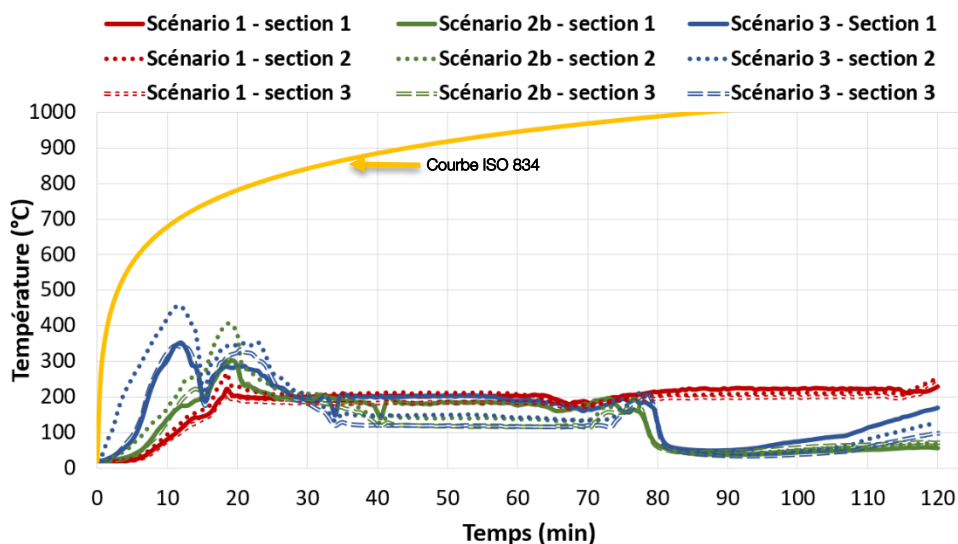
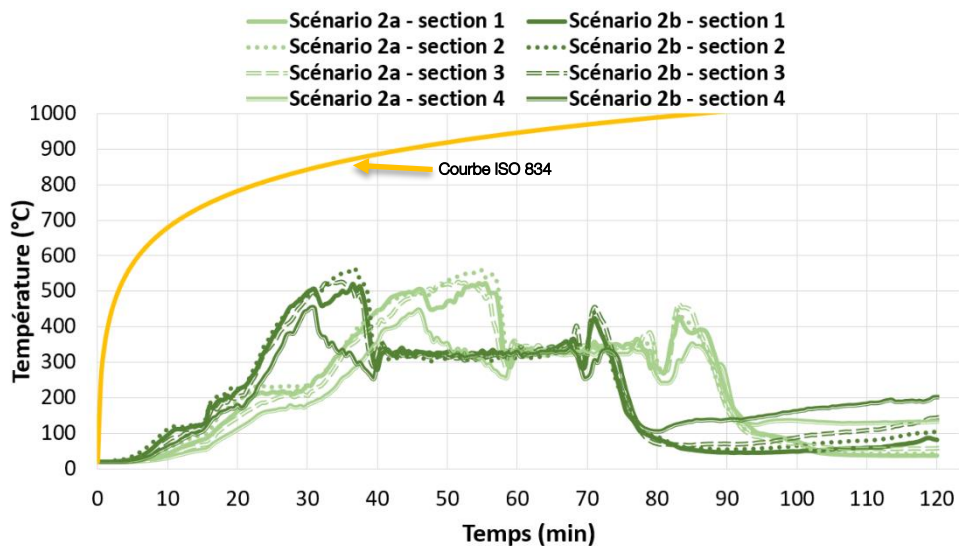
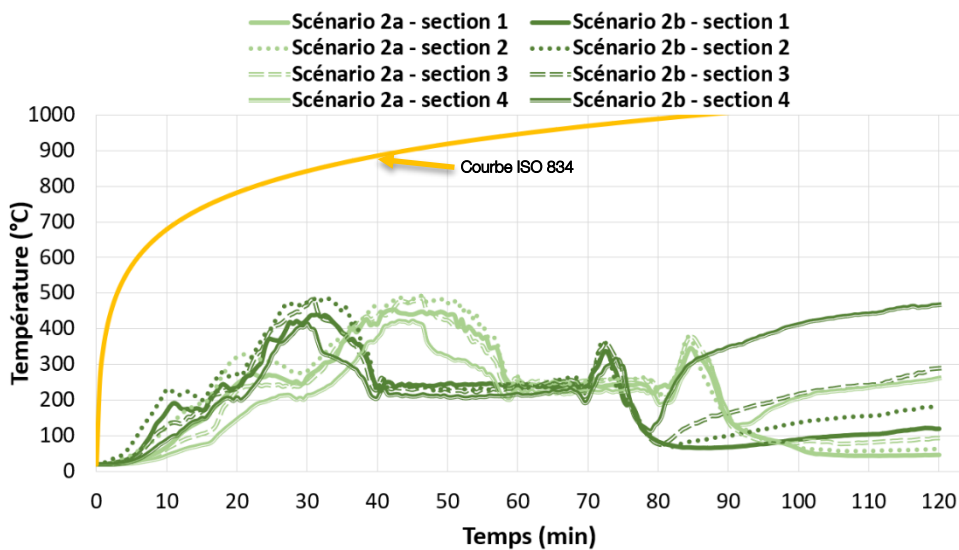


Figure 25 : Evolution temporelle des actions thermiques sur le plancher haut de la cellule pour les scénarios 1, 2b et 3. Sur ces graphiques, la courbe ISO 834 est également représentée en jaune

Canton A1.1



Canton A.1.2



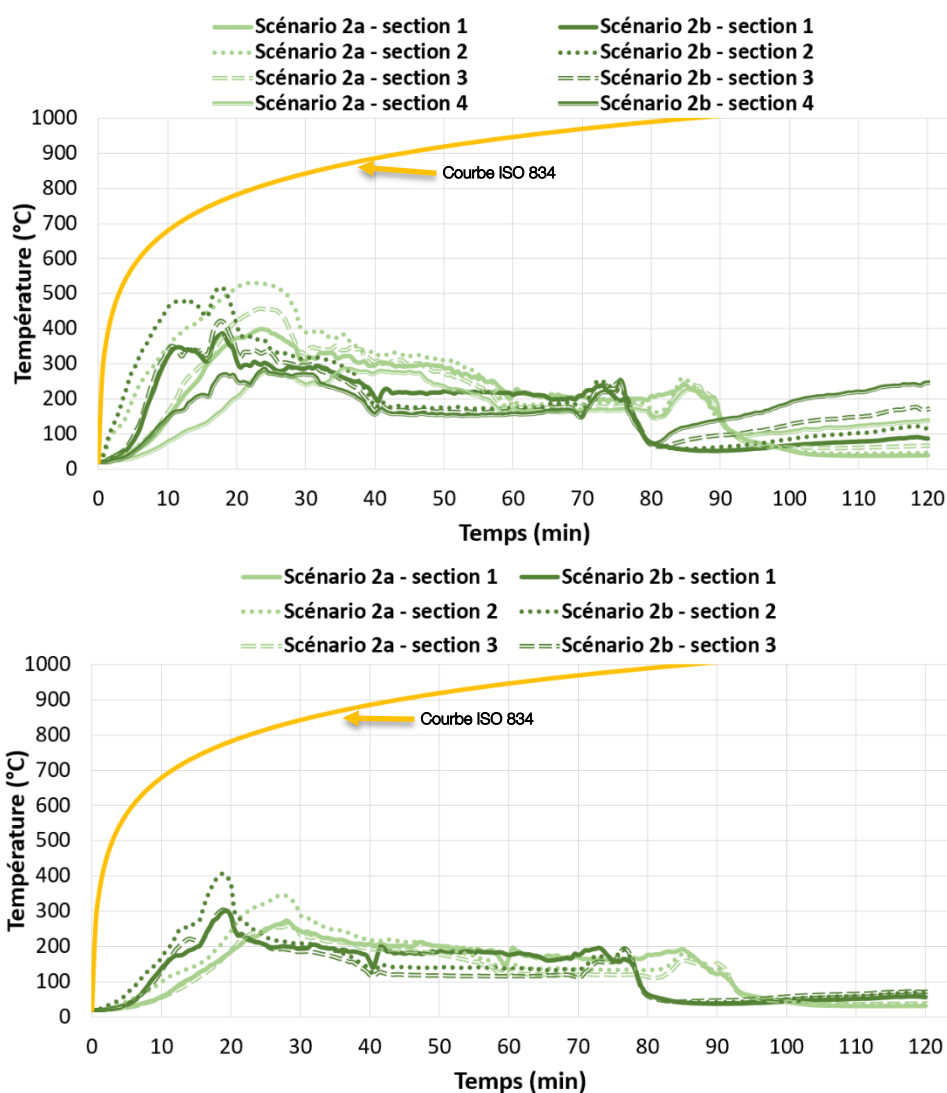


Figure 26 : Evolution temporelle des actions thermiques sur le plancher haut de la cellule pour les scénarios 2a et 2b. Sur ces graphiques, la courbe ISO 834 est également représentée en jaune

6.3. - ACTIONS THERMIQUES SUR LA PAROI SEPARATIVE DE LA CELLULE

Les actions thermiques sur la paroi séparative sont analysées en s'appuyant sur les courbes d'évolution temporelle des moyennes spatiales des températures adiabatiques de surface (cf. Figure 27). Ces moyennes spatiales sont largement inférieures aux valeurs de la courbe ISO ainsi qu'aux moyennes spatiales des planchers hauts précédemment présentées du fait de l'éloignement de la paroi de l'arrivée d'air frais (déplacement du feu vers la paroi opposée).

De manière à aider la comparaison des actions thermiques sous feux réels avec les actions thermiques conventionnelles (pour des essais de résistance au feu), la courbe ISO 834 est tracée en jaune sur tous les graphiques de la Figure 27.

L'analyse des résultats permet d'établir que :

- Les actions thermiques sur cette paroi séparative sont limitées du fait que la combustion est favorisée dans la partie OUEST de la cellule, du côté de l'amenée d'air neuf principale
- La température d'inflammation de 250°C amène à considérer des actions thermiques plus élevées que la température d'inflammation de 200°C. Cependant, l'écart entre les valeurs reste relativement négligeable en comparaison à l'écart avec les valeurs de la courbe ISO834.
- Pendant 2h, l'agression thermique de la paroi séparative reste très en-deçà de la courbe de feu conventionnelle. Quel que soit le scénario étudié, les actions thermiques sur la paroi séparative sont inférieures à 350°C

alors que 500°C correspond à la température critique limite (à partir de laquelle la ruine est susceptible de se produire) pour les éléments en béton [Eurocode 2].

Paroi séparative

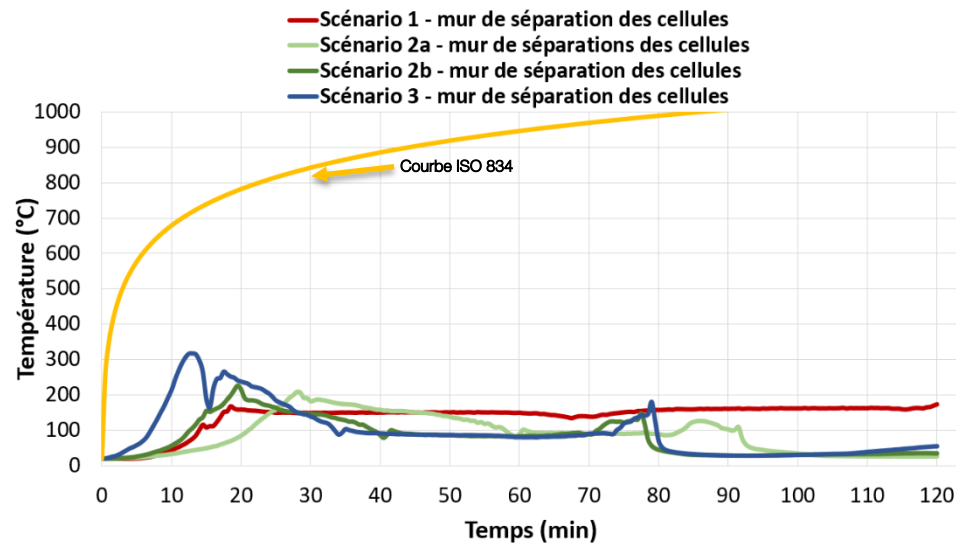


Figure 27 : Evolution temporelle des actions thermiques sur le plancher haut de la cellule pour les scénarios 1, 2 et 3. Sur ce graphique, la courbe ISO 834 est également représentée en jaune

7. - SYNTHÈSE ET CONCLUSION DE L'ÉTUDE

La présente étude est réalisée dans le cadre du projet de construction d'une plateforme logistique urbaine multi-modale sur le site du port Autonome de Gennevilliers, sis Route du Bassin n°6. Le projet de construction comprend un bâtiment industriel à usage d'entreposage à niveau, un parc de stationnement en infrastructure et des zones de bureaux liées à l'activité d'entrepôt.

Le bâtiment industriel à usage d'entreposage relève de la rubrique 1510-2b (entrepôt de matière combustible) sous le régime de l'enregistrement. À titre indicatif, certaines cellules de l'entrepôt (au RDC et au R+1 des blocs A et B) sont prévues pour être éventuellement frigorifiques d'une température inférieure à 10°C.

La présente étude vient compléter l'étude de flux thermique conduite en application de l'article 2 de l'annexe II de l'arrêté du 11 avril 2017 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts soumis à la rubrique 1510, modifiées par l'arrêté du 24 septembre 2020. La présente étude a pour objet de comparer les agressions thermiques sur les éléments séparatifs entre cellules (parois, planchers) avec celle de la courbe ISO 834.

La présente étude permet d'établir que les actions thermiques agressant les éléments séparatifs entre cellule sont très largement inférieures à celles de la courbe ISO 834. En d'autres termes, les simulations montrent que les éléments présentant une résistance au feu CF2h (testé sous courbe feu ISO 834) ne sont pas soumis à une agression thermique plus importante que celle de la courbe ISO834. Au contraire, il apparaît qu'elles sont très inférieures à cette courbe. En moyenne, sur le plancher haut, elles sont mêmes inférieures à 500°C, soit la température critique limite (à partir de laquelle la ruine est susceptible de se produire) pour les éléments en béton [Eurocode 2].



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 229420 - 2821996 - v1.0

23/01/2025

Analyse critique d'une étude ISI

LABORATOIRE D'INGENIERIE DE LA SECURITE INCENDIE

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 toute autre modification qui y serait apportée. 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 : DIRECTION INCENDIE DISPERSION EXPLOSION

Rédaction : LEROY Guillaume

Vérification : GENTILHOMME OLIVIER; MURILLO RUEDA CARLOS

Approbation : Document approuvé le 23/01/2025 par BOUET REMY

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Contexte	4
1.2	Documents de référence	4
1.3	Déroulement de l'étude	4
2	Analyse critique	5
2.1	Avis sur le contexte et objet du présent complément d'étude	5
2.1.1	Contenu de l'étude	5
2.1.2	Avis de l'Ineris	5
2.2	Avis sur la présentation succincte du bâtiment industriel	5
2.2.1	Contenu de l'étude	5
2.2.2	Avis de l'Ineris	6
2.3	Avis sur les scénarios d'incendie	7
2.3.1	Contenu de l'étude	7
2.3.2	Avis de l'Ineris	7
2.4	Avis sur le modèle numérique et les grandeurs physiques exploitées	8
2.4.1	Contenu de l'étude	8
2.4.2	Avis de l'Ineris	9
2.5	Avis sur l'évaluation du délai nécessaire à la détection incendie	9
2.5.1	Contenu de l'étude	9
2.5.2	Avis de l'Ineris	9
2.6	Avis sur l'analyse des résultats de simulation	10
2.6.1	Contenu de l'étude	10
2.6.2	Avis de l'Ineris	11
2.7	Avis sur la synthèse de l'étude	11
2.7.1	Contenu de l'étude	11
2.7.2	Avis de l'Ineris	11
3	Conclusions	12
4	Références	16

1 Introduction

1.1 Contexte

Dans le cadre d'une précédente prestation, l'Ineris a réalisé l'avis critique de l'étude des flux thermiques portant sur la plateforme logistique urbaine multimodale du projet Green Dock, située sur le port autonome de Gennevilliers (92). Cet avis a fait l'objet d'un livrable, référencé Ineris-227315-278068-v2.0, et daté du 20/03/24.

La principale remarque de l'Ineris était alors : « *Sans pour autant vouloir remettre en cause les conclusions obtenues par LISI INGENIERIE sur la non-propagation de l'incendie d'une cellule à une autre, l'utilisation [de l'outil Flumilog] pour déterminer la durée maximale d'un incendie en condition de sous-ventilation n'est pas nécessairement gage d'assurance. Il pourrait être plus pertinent de réaliser une étude CFD du développement de l'incendie dans une cellule et de comparer l'évolution de températures prédite au niveau des parois séparatives REI 120 à la courbe ISO* ». C'est une action que la société LISI a engagé de son côté.

La présente étude constitue l'avis critique de l'étude CFD réalisée par la société LISI.

1.2 Documents de référence

Cette prestation fait suite à :

- Une offre de l'Ineris référencée 229420 - 2799659 - v1.0 en date du 03/06/2024 ;
- Une commande en date du 19/11/2024.

L'INERIS a disposé, pour réaliser son analyse, du document suivant :

- LISI – Sécurité Incendie - Projet Green Dock – Complément à l'étude de flux thermique référencée 07.11.24 – N/Réf. : LISI_REF_DOCUMENT_L24.5.0876 – [INDICE A].

1.3 Déroulement de l'étude

Cette mission d'expertise porte exclusivement sur l'étude CFD d'agression thermique issue d'un feu se déclarant dans une cellule de la plateforme logistique. L'analyse critique de ce document s'attache à analyser notamment les hypothèses de calcul et les résultats obtenus par LISI en termes de températures calculées au niveau des éléments séparatifs.

Il est à noter que tous les commentaires de l'INERIS entraînant une demande d'informations ou d'actions supplémentaires de la part de la société LISI ont une référence commençant par C. La structure du présent rapport suit le plan du document réalisé par LISI afin de faciliter la lecture du document.

2 Analyse critique

2.1 Avis sur le contexte et objet du présent complément d'étude

2.1.1 Contenu de l'étude

La société LISI rappelle que le bâtiment relève de la rubrique 1510-2b sous le régime de l'enregistrement incluant certaines cellules (RDC et R+1 des blocs A et B) sous la rubrique 1511.

LISI rappelle également qu'elle a d'abord réalisé une étude des flux thermiques de ce bâtiment pour le compte du CERIB au moyen du code de calcul Flumilog. Etant donné la hauteur atypique du bâtiment, l'utilisation de la méthode Flumilog a fait l'objet d'un premier avis critique de l'Ineris qui a conclu qu'une étude complémentaire CFD était nécessaire. Ce document présente cette étude spécifique incendie.

2.1.2 Avis de l'Ineris

La démarche proposée par LISI est conforme à la remarque émise par l'Ineris dans l'avis critique de l'étude Flumilog référencée Ineris-227315-278068-v2.0. L'Ineris n'a pas de commentaire supplémentaire à émettre sur ce chapitre.

2.2 Avis sur la présentation succincte du bâtiment industriel

2.2.1 Contenu de l'étude

2.2.1.1 Géométrie et dimensions

LISI rappelle que le bâtiment est composé de 4 blocs A, B, C et D sur 4 niveaux. Au total, le bâtiment comprend 16 cellules très similaires en géométrie ou en dimensions à chaque niveau, entre 105 et 120 m de long et entre 25 et 50 m de profondeur. Les hauteurs varient entre 5.64 m et 7.14 m. Les niveaux RDC et R+2 sont consacrés aux activités de messagerie et les niveaux R+1 et R+3 sont consacrés aux activités de stockage. Les cellules des niveaux R+1 et R+3 intègrent des mezzanines.

2.2.1.2 Charges combustibles

LISI présente un tableau avec les charges combustibles présentes dans le bâtiment, cellule par cellule détaillées en nombre de palettes, masse totale et volume total de palettes. Les charges présentes sur les mezzanines sont également détaillées.

2.2.1.3 Dispositions constructives

LISI détaille la structure du bâtiment, et notamment donne les informations suivantes :

- La structure principale du bâtiment est en béton armé avec un système de poteaux-poutres d'une tenue au feu de R 120.
- Le plancher des cellules de stockage est en dalle alvéolée précontrainte.
- Le plancher des cours camion et de la voie de circulation est en dalle TT en béton.
- Tous les planchers haut ou bas ont un degré de résistance au feu REI 120.
- Chaque cellule est isolée des cellules adjacentes par des parois séparatives et des planchers en béton CF 2H.
- Les dispositifs de fermeture entre cellules sont EI 120C. Ils se ferment par gravité par libération de la ventouse DAS.
- Chaque cellule est munie de détecteurs optiques ou multi-ponctuels par aspiration répondant aux exigences de la norme NF S 61-970.
- Les façades extérieures sont en panneaux sandwich. Les façades NORD et SUD forment un écran thermique sur une partie ou la totalité de leur linéaire.
- Les cellules sont isolées des bâtiments de bureaux par des murs CF 2H.
- Les ouvrants sur la façade nord sont positionnés de telle sorte d'éviter la propagation du feu d'un niveau au niveau supérieur (C+D entre 4.08 m et 7.45 m).

2.2.1.4 Désenfumage des cellules

Le désenfumage des cellules se fait naturellement. La réglementation concernant le désenfumage est respectée :

- Les cellules disposent de cantons de surface maximale de 1650 m² et de longueur inférieure à 60 m, séparés par des écrans de cantonnement SF 1/4h d'une hauteur minimale de 1 m.
- Les dispositifs d'évacuation des fumées totalisent une surface utile de 2 % de la surface du canton. Ils sont positionnés en partie haute, sur les façades NORD et SUD de chaque cellule.
- Des conduits de désenfumage jusqu'en toiture sont également ajoutés.
- L'amenée d'air est réalisée principalement par l'ouverture manuelle des portes de quai.
- Les cellules frigorifiques ne sont pas désenfumées.

2.2.1.5 Autres mesures de sécurité incendie

LISI détaille dans ce paragraphe les autres mesures de sécurité importantes du site, à savoir le système d'extinction automatique, l'utilisation sur le site d'un SSI de catégorie A, la surveillance H24 d'un service de sécurité au poste de garde.

2.2.2 Avis de l'Ineris

Une précision sur la distribution des détecteurs serait bienvenue à ce stade du rapport afin de mettre en avant l'efficacité de leur couverture (on note toutefois que l'information apparaît au chapitre 5).

Il serait pertinent de préciser que le degré CF 2H est équivalent à REI 120. On préférera toutefois l'utilisation du terme REI 120 (norme européenne) plutôt que CF 2H (norme française). L'Ineris souhaiterait également une précision sur la signification du C utilisé dans le degré de tenue au feu EI 120C des dispositifs de fermeture entre cellules.

Les dispositifs d'évacuation des fumées totalisent une surface utile de 2% de la surface du canton. Un tableau présentant les surfaces des ouvrants et des cantons ainsi que les surfaces géométriques et utiles serait bienvenu afin de vérifier le ratio réglementaire de 2 %.

L'Ineris s'interroge sur l'ouverture manuelle des portes de quai. Existe-t-il une procédure détaillant cette opération en cas de départ de feu et précisant qui la réalise (pompier, personnel, société de surveillance ... ?). En tout état de cause, les portes de quai ne présentant aucune tenue au feu, elles seront potentiellement détruites par le feu ce qui constituera naturellement une amenée d'air.

Il serait pertinent de mieux détailler le dispositif d'évacuation des fumées par conduits de désenfumage car les figures du rapport ne permettent pas de comprendre précisément ce dispositif.

C 1	Un tableau présentant les surfaces des cantons ainsi que les surfaces utiles et géométriques des évacuations permettrait de vérifier le ratio des 2 %.
C 2	L'Ineris souhaiterait plus de précision sur la procédure d'ouverture manuelle des entrées d'air prévue en cas de sinistre.
C 3	L'Ineris souhaiterait une description plus précise du dispositif d'évacuation des fumées par conduits de désenfumage afin de s'assurer de son efficacité.

A noter que les autres points discutés dans le § 2.1.2 n'interpellent pas l'Ineris. La présentation de la structure du bâtiment est suffisamment exhaustive pour alimenter les logiciels de modélisation et répondre à la demande initiale.

2.3 Avis sur les scénarios d'incendie

2.3.1 Contenu de l'étude

LISI rappelle en introduction que l'étude concerne spécifiquement l'évaluation de la tenue des parois et planchers suite à une agression thermique. Les hypothèses sont donc choisies pour être les plus pénalisantes vis-à-vis de l'agression des parois et planchers.

2.3.1.1 Choix de la cellule

LISI a réalisé l'étude spécifique incendie sur une seule cellule située au niveau R+1 car les cellules R+1 présentent une densité de charge calorifique la plus élevée et qu'elles sont contiguës à 2 cellules verticalement. La cellule A1 a été retenue.

2.3.1.2 Départ de feu et propagation de l'incendie

L'éventuelle action du système d'extinction incendie n'est pas modélisée dans une approche majorante. LISI a défini 3 positions de départ de feu dans la cellule A1, l'une à l'ouest, l'une au centre et la dernière à l'est de la cellule. L'inflammation est positionnée au pied d'un rack double situé au centre de la cellule. La puissance de feu de la source d'inflammation est de 700 kW. En première approche, la propagation du feu entre palettes est fixée dans le code de calcul par température, à la valeur de 250°C, puis après analyse des premiers résultats à 200°C. Les dimensions des palettes dans le modèle numérique sont de 1,25 m x 0,8 m x 1,5 m, c'est-à-dire les dimensions de palettes standards. Le débit calorifique dégagé par chaque palette est de 1575 kW sur une durée de 45 min conformément à la méthode Flumilog [1]. Le débit surfacique imposé dans le code FDS est de 200 kW/m². Les valeurs de la chaleur spécifique ainsi que la conductivité thermique sont celles du bois, issues de l'Eurocode 5 [2]. Le taux de production de suies est de 5 % et la chaleur de combustion est de 25 MJ/kg.

2.3.1.3 Etat des façades et parois

LISI pose comme hypothèse que les parois REI 120, à savoir les parois NORD, SUD et EST, restent intégrées sur toute la durée de l'incendie modélisé. La paroi OUEST dont le degré de résistance est faible ruine après 15 min sur un temps très court de 50 s. Considérer la ruine de la paroi de manière précoce permet de favoriser l'oxygénation du feu et donc son agression thermique.

2.3.1.4 Dispositif et mise en œuvre du désenfumage

Le délai de détection de l'incendie dans le canton sinistré est de 30 s. Il augmente pour les cantons adjacents. L'analyse est réalisée dans le chapitre 5.

Les amenées d'air sont ouvertes 6,5 min après l'inflammation. Un délai plus tardif d'ouverture des portes limiterait le développement du feu et donc son agression thermique. Les ouvrants en façade NORD et SUD s'ouvrent selon les délais de détection.

2.3.1.5 Synthèse des scénarios retenus

La synthèse des scénarios d'inflammation est présentée dans un tableau avec les hypothèses retenues. LISI précise que les effets de vent ne sont pas pris en compte dans ces simulations.

2.3.2 Avis de l'Ineris

Pour le choix de la cellule, les arguments développés sont pertinents. Les cellules présentant une charge calorifique la plus élevée sont susceptibles de favoriser le développement d'un feu plus violent. Par ailleurs, la cellule A1 étant située à mi-hauteur du bâtiment, elle permet de vérifier s'il y a propagation possible de l'incendie à une cellule située au-dessous ou au-dessus d'elle-même. Les 3 positions de départ de feu permettent de balayer des scénarios distincts. La température de propagation de 250°C correspond aux usages. Celle de 200°C considérée dans un second temps constitue une approche sécuritaire car cela favorise la cinétique de développement du feu. Concernant les dimensions affichées des palettes de 1,25 m x 0,8 m x 1,5 m et au regard de la taille des mailles, l'Ineris comprend que les palettes modélisées ont pour dimensions 1,25 m x **0.75 m** x 1,5 m. Cela aura peu d'impact sur les résultats. Le débit surfacique retenu dans le code FDS de 200 kW/m² permet bien d'obtenir une puissance palette de 1525 kW au regard de leur géométrie. Les valeurs retenues pour le taux de suie et la chaleur de combustion sont pertinentes au regard de la nature des produits stockés, composés de matières cellulosiques et de plastique. A noter qu'un taux de production de suie de 5 % est une valeur basse qui permet bien d'obtenir une faible valeur d'opacité des fumées et donc une valeur sécuritaire de durée de détection. Des valeurs courantes appliquées pour les polymères (polypropylène, polyéthylène, PVC, ...) sont comprises entre 5 et 15 % d'après le SFPE [3].

A noter qu'une justification du choix des valeurs de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique associées au bois en montrant qu'elles favorisent la montée rapide en température des parois des palettes permettrait de garantir que l'approche est bien majorante, sachant que les palettes ne sont pas exclusivement composées de matières cellulosiques, mais contiennent également des polymères et des matières incombustibles.

Le délai de détection de l'incendie dans le canton sinistré et donc la mise en œuvre du désenfumage est de 30 s. L'Ineris s'interroge si cette durée précoce ne peut pas mettre en défaut l'activation du système de sprinklage pour les têtes situées à proximité des exutoires et donc des façades NORD et SUD.

La durée considérée pour l'ouverture des amenées d'air de 6,5 min est pertinente sachant que l'ouverture est réalisée manuellement. Envisager une durée inférieure ne serait pas acceptable au regard de la taille du bâtiment et de la durée nécessaire pour ouvrir manuellement les portes. Fixer les délais d'ouverture des dispositifs de désenfumage sur les délais de détection est également pertinent du fait de la présence du SSI.

Les effets de vent n'étant pas modélisés, il serait pertinent de montrer qu'ils n'auront pas d'impact sur le désenfumage pour un vent de NORD (ou de SUD) au regard de la hauteur du bâtiment ou montrer que de ne pas prendre en compte le vent est une approche sécuritaire.

C 4	Justifier le choix des valeurs de la chaleur spécifique (Cp) et de la conductivité thermique (λ) associées au bois pour des palettes 1510
C 5	Montrer que les effets de vent n'auront pas d'impact sur le désenfumage ou auront un impact qui ira dans le sens de la sécurité.
C 6	Montrer que l'ouverture précoce des dispositifs de désenfumage ne peut pas mettre en défaut l'activation des têtes de sprinklage situées à proximité : - des ouvrants verticaux des deux façades NORD et SUD ; - des dispositifs d'évacuation des fumées par conduits de désenfumage.

2.4 Avis sur le modèle numérique et les grandeurs physiques exploitées

2.4.1 Contenu de l'étude

2.4.1.1 Outil de calcul utilisé

Le logiciel utilisé est FDS v6.7 développé par le NIST.

2.4.1.2 Modèle numérique

Le modèle numérique de la cellule A1 est présenté. La taille des mailles est de 25 cm x 25 cm x 25 cm. Le stockage des palettes ainsi que la mezzanine sont représentés. Les parois sont considérées comme isothermes et sont maintenues à température ambiante (20°C).

2.4.1.3 Grandeurs physiques exploitées

Les grandeurs physiques exploitées sont les suivantes :

- Le champ horizontal du coefficient d'extinction sous plafond pour vérifier l'opacité des fumées et le temps de réaction des détecteurs ;
- La température de surface adiabatique sur les parois, plafonds et planchers. Celle-ci prend en compte les effets convectifs mais également radiatifs des flammes. La température de surface adiabatique est déduite de l'équation suivante :

$$\varphi_{\text{net}} = \epsilon \sigma (T_{\text{AST}}^4 - T^4) + h(T_{\text{AST}} - T)$$

Les grandeurs sont moyennées sur des sections définies. Chaque canton est découpé en 4 sections, à l'exception du canton 4 qui est découpé en 3 sections du fait de la présence des bureaux.

2.4.2 Avis de l'Ineris

Ne remettant pas en cause l'utilisation de la température de surface adiabatique qui est une approche majorante, l'Ineris compléterait la définition de cette grandeur en ajoutant qu'elle s'obtient par résolution de l'équation suivante :

$$\varepsilon_s(\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{AST}^4) + h_c(T_g - T_{AST}) = 0$$

Avec

ε_s	=	Emissivité = absorptivité de la paroi (-)
$\dot{q}_{inc}''$	=	Flux thermique total incident (W/m ²)
T_{AST}	=	Température de surface adiabatique (K)
h_c	=	Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m ² /K)
T_g	=	Température des gaz (K)
σ	=	Constante de Stefan-Boltzmann (W/m ² /K ⁴)

Cette approche considère que la chaleur ne pénètre pas dans la paroi (matériau très isolant), ce qui maximise la température de surface.

L'Ineris s'interroge sur la taille des sections qui ne permettent pas de vérifier les températures locales.

C 7	Montrer que la taille des sections ne conduit pas à une valeur de température moyenne de surface trop lissée.
-----	---

2.5 Avis sur l'évaluation du délai nécessaire à la détection incendie

2.5.1 Contenu de l'étude

Des détecteurs multi-ponctuels par aspiration seront utilisés dans la cellule selon les exigences de la norme NF S 61-970 qui impose une surface maximale de couverture pour un détecteur de 35 m². Un seuil de sensibilité de 0.1 m⁻¹ a été retenu par LISI car il correspond à la valeur la plus pénalisante des fiches techniques analysées et donc au délai de détection le plus élevé.

2.5.1.1 Détection dans le canton sinistré

Les conditions d'enfumage dans la cellule A1 sont présentées à t₀ + 30 s pour les 4 scénarios étudiés. Les résultats montrent que la surface d'enfumage est supérieure à 35 m² à t₀ + 30 s quel que soit le scénario étudié.

2.5.1.2 Détection dans les cantons adjacents

Les conditions d'enfumage dans la cellule à t₀ + 1 min 30 s, 2 min 30 s et 3 min 30 s sont présentées pour les 4 scénarios.

2.5.1.3 Synthèse

Un tableau de synthèse des temps de détection est présenté.

2.5.2 Avis de l'Ineris

LISI a retenu un seuil de détection de 0,1 m⁻¹ sécuritaire. Au regard des résultats obtenus, le délai de détection de 30 s dans le canton sinistré est pertinent. Par ailleurs, les temps retenus de 1 min 30 s, 2 min 30 s et 3 min 30 s pour l'ouverture des systèmes de désenfumage des cantons adjacents sont cohérents vis-à-vis de la cinétique de développement des fumées modélisées.

C 8	LISI a étudié uniquement des détecteurs ponctuels. Montrer que les temps de détection resteraient toujours acceptables pour des détecteurs optiques.
-----	--

2.6 Avis sur l'analyse des résultats de simulation

2.6.1 Contenu de l'étude

2.6.1.1 Propagation de l'incendie et quantité de masse brûlée

Ce paragraphe rappelle les différentes phases de développement d'un feu selon la méthode Flumilog [1], à savoir la phase de croissance ascendante, la phase de propagation horizontale, la phase de propagation descendante et enfin la phase de propagation à la face supérieure des racks et embrasement des racks. Cette dernière phase est décrite plus précisément pour les 4 scénarios.

- Pour le scénario 1, le départ de feu étant positionné à proximité de la façade OUEST qui ruine après 15 min induisant une entrée d'air, le feu est suffisamment alimenté en oxygène pour consommer plus de la moitié des racks, la deuxième moitié située du côté EST n'étant pas suffisamment alimentée en oxygène pour permettre son embrasement ;
- Pour les scénarios 2a et 2b, et similairement au scénario 1, le feu se propage difficilement dans la partie EST de la cellule par manque d'oxygène avec une avancée plus notable pour le scénario 2b ;
- Pour le scénario 3, le feu se propage à la totalité des racks de la cellule.

Les courbes de débits calorifiques calculées au cours du temps pendant les 10 premières minutes pour les 4 scénarios sont comparées à la cinétique rapide utilisée par le SFPE (cinétique dite FAST). Le scénario 2b croît selon une cinétique rapide alors que les autres scénarios croissent selon une cinétique plus rapide car la température de propagation fixée est plus faible (respectivement 250 et 200°C).

Les courbes de débit calorifique obtenues pour les 4 scénarios sont analysées. Elles se divisent en 3 phases :

- La phase de croissance qui montre que plus le départ de feu est éloigné de la façade OUEST, plus le nombre de palettes en feu est important et plus la puissance de feu est élevée ;
- La phase de plateau qui montre que le feu est piloté par la ventilation pour les scénarios 2a, 2b et 3 où le feu cherche le comburant en sortant par les ouvrants. Une partie de la puissance développée par le feu n'est donc pas comptabilisée par le code FDS ;
- La phase de décroissance qui montre que pour le scénario 1, le feu continue à se maintenir 1h30 après l'inflammation car il progresse lentement vers la façade EST et pour les autres scénarios, le feu s'éteint par manque d'oxygène.

La quantité de combustible consommée est de 60 % pour le scénario 1, 57 % pour le scénario 2a, 60 % pour le scénario 2b et 73 % pour le scénario 3.

2.6.1.2 Actions thermiques sur le plancher haut de la cellule

Les actions thermiques sur le plancher haut de la cellule pour les 4 scénarios sont présentées de 2 manières différentes :

- Les champs de température du plancher haut à 4 instants stratégiques : 30, 40, 90 et 120 min ;
- Les courbes d'évolution temporelle des moyennes spatiales de température adiabatique de surface sur chaque section de mesure du plancher haut.

Les actions thermiques sont maximales lorsque la puissance est maximale à $t_0 + 30$ min pour les scénarios 1, 2b et 3 ($t_0 + 40$ min pour le scénario 2a). La température moyenne maximale calculée est de 600°C. A $t_0 + 90$ min, les palettes continuent à brûler dans le scénario 1 avec des températures toujours élevées alors qu'elles sont pratiquement éteintes dans les autres scénarios et des températures beaucoup plus faibles (sauf localement).

Le fait d'augmenter la température de propagation du feu de 200 à 250°C a peu d'impact sur l'agression thermique, à ceci près que la dynamique du feu est décalée dans le temps.

L'agression thermique reste très en deçà de la courbe ISO834. Elle est même inférieure à 500°C.

2.6.1.3 Actions thermiques sur la paroi séparative de la cellule

Les courbes d'évolution temporelle des moyennes spatiales de température adiabatique de surface sur la paroi séparative de la cellule est analysée. Les actions thermiques sont limitées car la combustion est peu favorisée dans la partie EST par manque d'oxygène. L'agression thermique reste très en deçà de la courbe ISO834 voire en deçà de 350°C.

2.6.2 Avis de l'Ineris

L'Ineris retient une analyse pertinente concernant le développement du feu en fonction de son oxygénation et de l'éloignement du départ de feu par rapport à la façade OUEST. La comparaison avec la courbe de développement d'un feu selon la méthode analytique du SFPE montre que la cinétique du feu modélisée dans FDS est pertinente. L'évolution de la puissance de l'incendie calculée par LISI pour les 4 scénarios est bien représentative d'un incendie d'un stockage de produits appartenant à la rubrique 1510.

L'Ineris s'interroge sur l'absence du calcul de l'énergie totale libérée. Cela permettrait, d'une part, de confirmer le taux de masse brûlée, et d'autre part, d'évaluer l'énergie totale évacuée et non comptabilisée.

LISI affirme qu'une partie de la chaleur s'évacue par les ouvrants. En cas de fort vent extérieur, cette chaleur pourra-t-elle s'échapper de la même manière ou cela pourrait-il avoir un impact sur l'évacuation des fumées et donc sur les températures intérieures ?

Le suivi des moyennes de températures sur les sections ne permet pas d'évaluer les agressions thermiques locales. D'ailleurs, on remarque d'après la figure 24 que la température atteint plus de 700°C dans une section pour le scénario 2b à t0 + 90 min et pour les scénarios 2b et 3 à t0 + 120 min et ces hautes températures ne sont pas visibles sur les graphes d'évolution de la température moyenne en fonction du temps car elles sont lissées par la moyenne spatiale. LISI peut-il s'assurer qu'aucune température critique ne risque d'impacter les parois. A noter que les représentations des champs de températures sur la figure 24 semblent avoir été disposées à l'envers par rapport aux autres vues utilisées dans le reste du document.

L'Ineris s'interroge sur la pertinence de calculer la moyenne spatiale sur toute la longueur de la paroi séparative, ce qui aura pour effet de lisser fortement les valeurs hautes. Même si le mur sera moins impacté par le feu que la dalle, il serait plus prudent d'analyser le mur section par section ou de vérifier la présence d'éventuels points chauds.

L'Ineris s'interroge sur l'absence d'étude du plancher bas.

C 9	Montrer que la température de la dalle n'excèdera pas localement la courbe ISO834 ou bien si cela se produit localement, montrer que cela n'aura pas d'impact sur la tenue mécanique de la structure.
C 10	Montrer que la moyenne lissée de la température de surface de la paroi séparative est acceptable ou présenter les résultats par section.
C 11	Vérifier que la tenue mécanique du plancher bas ne sera compromise.

2.7 Avis sur la synthèse de l'étude

2.7.1 Contenu de l'étude

LISI rappelle le cadre de l'étude et ses objectifs, à savoir de comparer les agressions thermiques sur les éléments séparatifs entre cellules avec la courbe ISO834. Les résultats montrent que les températures moyennes d'agression thermique restent inférieures à la courbe ISO834. Il est même précisé que sur le plancher haut, elle reste inférieure à 500°C, température critique limite pour les éléments en béton d'après l'Eurocode 2.

2.7.2 Avis de l'Ineris

L'Ineris n'a pas de remarque particulière à émettre sur ce paragraphe à l'exception que la société LISI évoque des actions thermiques sur le plancher haut qui sont en moyenne inférieures à 500°C, ce qui pourrait être contredit par la figure 24 pour 2 sections minimum.

3 Conclusions

Conformément à la demande de l'Ineris, la société LISI a réalisé une étude CFD du développement de l'incendie dans une cellule de la plateforme logistique Green Dock pour comparer l'évolution de températures prédite au niveau des parois séparatives REI 120 à la courbe ISO 834.

LISI a montré que l'agression thermique associée à l'incendie dans une cellule de la plateforme incendie reste inférieure à celle de la courbe ISO834.

Toutefois, l'Ineris a souhaité une clarification sur un ensemble de points pour lesquels LISI a donné des réponses présentées à la suite :

- C1 Un tableau présentant les surfaces des cantons ainsi que les surfaces utiles et géométriques des évacuations permettrait de vérifier le ratio des 2 %.

Réponse de LISI :

Il est indiqué dans le rapport tout comme dans l'étude de flux thermiques que « les ouvrants sont positionnés en partie haute de chaque cellule. L'ensemble des dispositifs d'évacuation de fumée totalisent une surface utile de 2 % de la surface du canton. ».

Le fichier Excel figurant en PJ confirme ces dispositions pour tous les cantons. Voici par exemple les surfaces d'évacuation de fumée de chaque canton des cellules A0 et A1 du bloc A.

A0.1	Surface 1175 m ² Besoin SUE 23,5 m ² / SUE prévue 24,7 m ² (SG 46,2 m ²)
A0.2	Surface 1190 m ² Besoin SUE 23,8 m ² / SUE prévue 24,3 m ² (SG 48,2 m ²)
A0.3	Surface 815 m ² Besoin SUE 16,3 m ² / SUE prévue 18,4 m ² (SG 33,8 m ²)
A0.4	Surface 872 m ² Besoin SUE 17,4 m ² / SUE prévue 19,5 m ² (SG 25,8 m ²)
A1.1	Surface 1180 m ² Besoin SUE 23,6 m ² / SUE prévue 24,1 m ² (SG 48,2 m ²)
A1.2	Surface 1169 m ² Besoin SUE 23,4 m ² / SUE prévue 24 m ² (SG 38,6 m ²)
A1.3	Surface 1135 m ² Besoin SUE 22,7 m ² / SUE prévue 23,26 m ² (SG 29,7 m ²)
A1.4	Surface 1291 m ² Besoin SUE 25,8 m ² / SUE prévue 28,8 m ² (SG 31,3 m ²)

L'Ineris valide ce point.

- C2 L'Ineris souhaiterait plus de précision sur la procédure d'ouverture manuelle des entrées d'air prévue en cas de sinistre.

Réponse de LISI :

Aucune procédure d'ouverture n'est prévue à ce stade.

Pour rappel :

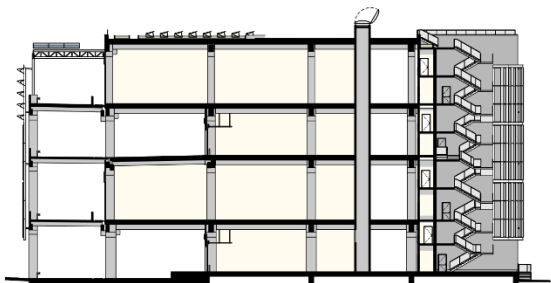
- Les amenées d'air sont assurées par les portes sectionnelles positionnées sur les cours camion pour les cellules (hormis pour la cellule D0). Ces portes ne présentent aucune tenue au feu conventionnelle.
- Le site est surveillé en permanence par un service de sécurité H24 au poste de garde. À ce stade, il est prévu la présence permanente d'un SSIAP 2 complété par 1 SSIAP 1. La constitution du service de sécurité sera précisée avec les services de secours.
- La réglementation ICPE n'impose aucune procédure d'ouverture.

L'Ineris valide ce point mais propose de retirer la phrase « l'amenée d'air neuf est assurée par ouverture manuelle des portes sectionnelles positionnées sur les cours camion » situées p9 dans le rapport.

C3 L'Ineris souhaiterait une description plus précise du dispositif d'évacuation des fumées par conduits de désenfumage afin de s'assurer de son efficacité.

Réponse de LISI :

Voici en PJ une vue en coupe du principe d'un des conduits de désenfumage en prenant pour exemple la cellule A0.



Les conduits sont traités de la même manière sur les autres cellules. En particulier, on notera que la longueur des traînasses (raccordements horizontaux de niveaux des conduits d'évacuation) est très limitée. Un conduit a deux impacts sur la performance vis-à-vis de l'évacuation de fumée. Avant de présenter ces deux impacts, il faut rappeler que la performance d'un désenfumage naturel est conditionnée par la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Pour des exutoires et conduits de désenfumage, la différence de pression pilote le débit de fumée évacuée tout par le tirage thermique selon l'équation où S représente la surface d'évacuation :

$$\dot{m}_{out} = S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot (\rho_a - \rho_f) \cdot g \cdot (H - Z_d)}$$

Le premier impact est thermique. En début d'incendie, le conduit est froid et la fumée est peu chaude. La fumée aura donc tendance à se refroidir au contact des parois du conduit. Ce refroidissement est certainement suffisant pour obtenir une différence de masse volumique quasi-nulle, voire nulle. Le débit de fumée est donc nul, voire négatif (de l'air rentre par le conduit, « ça refoule »).

Dans notre cas, nous avons considéré des feux extrêmement puissants. Après 10 à 15 min, on peut établir que le feu dépasse la puissance libérée par un poids lourd avec un chargement combustible (selon guide du CETU). La température de la fumée, malgré son refroidissement, est donc suffisante pour créer ce tirage thermique et le refroidissement devient mineur.

Le second impact est lié au tirage thermique lui-même. Dans l'équation ci-avant, on retrouve l'épaisseur de la couche de fumée. Cette épaisseur est la distance entre le point bas de la couche de fumée dans la cellule et la sortie à l'extérieur. Dans le cas d'un conduit, il se trouve que cette distance est augmentée puisqu'elle intègre la longueur du conduit.

Dans les simulations, le modèle représente le conduit depuis le R+1 et dans la hauteur du R+2, soit sur un seul niveau. Le matériau est considéré isotherme à température ambiante. L'hypothèse de modélisation est une hypothèse contraignante puisqu'elle minimise le tirage thermique.

L'Ineris valide ce point.

- C4 Justifier le choix des valeurs pour la chaleur spécifique (C_p) et pour la conductivité thermique (λ) associées au bois pour des palettes 1510.

Réponse de LISI :

Les valeurs de la chaleur spécifique ainsi que la conductivité sont extraites de l'Eurocode 5 concernant le bois. Au-delà des propriétés thermiques des matériaux, il est considéré une épaisseur de bois de 5 mm pour obtenir un matériau thermiquement mince et ainsi favoriser la montée rapide en température des parois des palettes et garantir une approche majorante. Le caractère contraignant de cette hypothèse est vérifié par le biais de la cinétique de développement du feu. Il ressort que la cinétique est rapide à très rapide « fast » à « ultra fast » (cf. figure 22).

L'Ineris valide ce point.

- C5 Montrer que les effets de vent n'auront pas d'impact sur le désenfumage ou auront un impact qui ira dans le sens de la sécurité.

Réponse de LISI :

Il est probable que le vent ait une influence mineure sur la capacité du désenfumage à évacuer la fumée et la chaleur de la cellule dans la mesure où les ouvrants d'évacuation de fumée sont positionnés sur deux façades opposées, et complétés de conduits de désenfumage.

L'Ineris valide ce point.

- C6 Montrer que l'ouverture précoce des dispositifs de désenfumage ne peut pas mettre en défaut l'activation des têtes de sprinklage situées à proximité :

- des ouvrants verticaux des deux façades NORD et SUD,
- des dispositifs d'évacuation des fumées par conduits de désenfumage.

Réponse de LISI :

Pour rappel, l'effet du sprinkler n'est pas considéré dans la présente étude. Pour autant, la commande automatique du désenfumage à la DAI répond à l'article 5 de l'annexe II de l'arrêté du 11 avril 2017 révisé pour les entrepôts multinationaux.

L'Ineris valide ce point mais propose de rajouter la phrase suivante issue de l'arrêté : « les dispositifs d'ouverture automatique des exutoires sont réglés de telle façon que l'ouverture des organes de désenfumage ne puisse se produire avant le déclenchement de l'extinction automatique ».

- C7 Montrer que la taille des sections ne conduit pas à une valeur de température moyenne de surface trop lissée.

Réponse de LISI :

Les résultats de l'étude montrent que les actions thermiques sont homogènes sur une même section de mesure (cf. figure 24 du rapport) ce, à partir des champs de température adiabatique de surface à des temps clés de la simulation. Ces résultats montrent également que les actions thermiques sont très inférieures à la courbe ISO834. A noter que le four d'un essai conventionnel en résistance au feu est piloté suivant la courbe ISO834, à partir de la valeur moyennée des thermocouples installés dans le four.

L'Ineris valide ce point mais souhaite attirer l'attention sur le fait que les courbes d'évolution temporelle des actions thermiques moyennées sur les sections ne permettent pas d'évaluer l'agression thermique locale, au sens « localisée sur une surface vulnérable » telle qu'une section de poutre de quelques mètres de longueur, au regard de la grande taille des sections (de l'ordre de 25 x 10 m² qui est d'ailleurs largement supérieure à la surface d'un élément de structure testé dans un four). Des sections plus petites auraient permis de suivre de manière plus précise les agressions locales.

- C8 LISI a étudié uniquement des détecteurs ponctuels. Montrer que les temps de détection resteraient toujours acceptables pour des détecteurs optiques.

Réponse de LISI :

La sensibilité des détecteurs n'a pas d'impact sur les résultats de l'étude puisque nous nous concentrons, non pas sur les premiers instants de l'incendie, mais sur la période où l'incendie libère une grande puissance. Pour autant, si on regarde la sensibilité de détecteurs ponctuels, les fiches techniques de modèles montrent que cette sensibilité est au minimum pour une opacité de 0,085 /m. La norme NF S 61970 impose une distance horizontale entre détecteurs ponctuels entre 5,8 et 6,7 m suivant la hauteur sous plafond. Le chapitre 5 montre que les délais de détection mentionnés au § 5.3 valent également pour des détecteurs ponctuels.

L'Ineris valide ce point.

- C9 Montrer que la température de la dalle n'excèdera pas localement la courbe ISO834 ou bien si cela se produit localement, montrer que cela n'aura pas d'impact sur la tenue mécanique de la structure.

Réponse de LISI :

Un four d'un essai conventionnel en résistance au feu est piloté suivant la courbe ISO834, à partir de la valeur moyennée des thermocouples installés dans le four et non pas à partir d'une valeur locale.

Ce commentaire est lié au commentaire C7. L'Ineris valide ce point.

- C10 Montrer que l'étude de la moyenne lissée de la température de surface de la paroi séparative est acceptable ou présenter les résultats par section.

Réponse de LISI :

La paroi séparative est moins sollicitée que le plancher puisqu'elle est distante des ouvertures sur l'extérieur et donc de la zone où se passe la combustion. La figure 27 montre d'ailleurs que les actions thermiques moyennées sont plus faibles sur cette paroi par rapport au plancher haut. On peut ajouter que la partie du plancher haut à proximité de cette paroi est toujours soumise à des actions thermiques plus faibles que la partie du plancher haut à distance.

L'Ineris valide ce point.

- C11 Vérifier que la tenue mécanique du plancher bas ne sera pas compromise.

Réponse de LISI :

En cas d'incendie, les actions thermiques sont généralement plus élevées sur le plafond et sur les parois que sur le plancher bas. Ceci est d'autant plus vrai en réalité dans la mesure où ce plancher est bas et protégé par l'amoncellement de matières au sol.

L'Ineris valide ce point et propose de rajouter cette phrase dans le rapport.

Au regard de l'ensemble des réponses formulées par la société LISI, l'Ineris valide son étude CFD modélisant le développement de l'incendie dans une cellule de la plateforme logistique Green Dock.

Par conséquent, l'Ineris valide le fait que l'agression thermique associée à l'incendie dans une cellule de la plateforme incendie reste inférieure à celle de la courbe ISO834. L'absence de propagation en cas de départ de feu dans une cellule est donc validée.

4 Références

- [1] FLUMilog - Description de la méthode de calcul des effets thermiques produit par un feu d'entrepôt - Modules 1 à 7, Documents INERIS, Référence 204476 - 2728180 - v0.3
- [2] Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu, septembre 2005.
- [3] SFPE - Handbook of Fire Protection Engineering – 5th edition - Morgan J. Hurley Editor-in-Chief

