



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI

**Etude d'ingénierie de sécurité incendie au
sein de l'usine pharmaceutique
EL KENDI**

Nazim YAKHOU

Maroua SOUMATIA

Sous la direction de

M. Bouzid BENKOUSSAS

Professeur à l'ENP

M. Aboubakr KERTOUS

Maître Assistant à l'ENP

M. Badreddine BOUSBAI

HSE Manager à El Kendi

Présenté et soutenu publiquement le 1^{er} Juillet 2020

Composition du Jury :

Président	M. A. CHERGUI	Professeur à l'ENP
Examineurs	M. M. BOUBAKEUR	Maître Assistant à l'ENP
	M. M. SENOUCI-BEREKSI	Maître Assistant à l'ENP
Encadreurs	M. B. BENKOUSSAS	Professeur à l'ENP
	M. A. KERTOUS	Maître Assistant à l'ENP
	M. B. BOUSBAI	HSE Manager à El Kendi

Republique Algerienne Democratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI

**Etude d'ingénierie de sécurité incendie au
sein de l'usine pharmaceutique
EL KENDI**

Nazim YAKHOU

Maroua SOUMATIA

Sous la direction de

M. Bouzid BENKOUSSAS

Professeur à l'ENP

M. Aboubakr KERTOUS

Maître Assistant à l'ENP

M. Badreddine BOUSBAI

HSE Manager à El Kendi

Présenté et soutenu publiquement le 1^{er} Juillet 2020

Composition du Jury :

Président	M. A. CHERGUI	Professeur à l'ENP
Examineurs	M. M. BOUBAKEUR	Maître Assistant à l'ENP
	M. M. SENOUCI-BEREKSI	Maître Assistant à l'ENP
Encadreurs	M. B. BENKOUSSAS	Professeur à l'ENP
	M. A. KERTOUS	Maître Assistant à l'ENP
	M. B. BOUSBAI	HSE Manager à El Kendi

ملخص : تهدف هذه الدراسة إلى مساعدة الكندي على حماية منشأتها من الحرائق. في هذا الإطار، تم محاكاة سيناريوهات حرائق على جهاز كمبيوتر عالي الأداء باستخدام برنامج Fire Dynamics Simulator. سمحت لنا هذه المحاكاة بدراسة تصرف الحريق في بعض المناطق الحساسة من المصنع وتأثيره على الأشخاص والهيكل. علاوة على ذلك ، تم تطوير إطار عمل لتقييم تجهيزات السلامة من الحرائق على شكل تطبيق ويب نشر على السحابة. الخطوات السابقة مكنتنا من تحديد جملة من النقائص و صياغة خطة عمل لمعالجتها.

الكلمات الدالة : هندسة السلامة من الحرائق، الحوسبة عالية الأداء، محاكاة FDS ، محاكاة CFD

Abstract : This study aims to help EL Kendi improve fire safety in its facility. For this purpose, fire scenarios were simulated on a high-performance computer using the Fire Dynamics Simulator (FDS). These simulations allowed us to understand how fire behaves in key areas of the plant and how it affects people and structures. Moreover, a framework was developed in order to assess fire safety equipments and was implemented in a web application on the cloud. These previous steps enabled us to identify areas for improvement that served to formulate an action plan.

Keywords : CFD, FDS, Fire safety engineering, High performance computing.

Résumé : Ce travail a pour objectif l'évaluation et l'amélioration de la capacité de l'entreprise El Kendi à faire face au risque incendie au sein de son usine. Pour cela, des scénarios d'incendie ont été simulés sur une machine de calcul haute performance à l'aide du code Fire Dynamics Simulator (FDS). Ces simulations nous ont permis d'étudier le comportement de l'incendie dans certaines zones de l'usine et ses effets sur les personnes et la structure. Afin d'évaluer l'état de la sécurité incendie en place, un protocole a été développé et implémenté sous forme d'une application web déployée sur le cloud. Les résultats des simulations et de l'évaluation nous ont permis de déterminer des points d'amélioration qui ont fait l'objet d'un plan d'action par la suite.

Mots-clés : Calcul haute performance, CFD, FDS, Ingénierie de la sécurité incendie.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation du mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Qualité Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels (QHSE-GRI).

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH Le Tout Puissant pour la force qu'il nous a donnés pour atteindre nos objectifs et arriver où nous en sommes.

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury qui apporteront la touche finale à notre projet.

A Monsieur Abdelmalek CHERGUI, Professeur à l'ENP qui nous fait l'honneur de présider ce jury.

A Messieurs Mohamed BOUBAKEUR et Malik SENOUCI-BEREKSI, qui ont bien voulu examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier nos encadreurs pour leur soutien et aide tout au long de ce mémoire :

Monsieur BENKOUSSAS, B. Chef du département MRIE et professeur à l'ENP et Monsieur KERTOUS, A. Maître-Assistant à l'ENP pour leurs précieux conseils.

Monsieur BOUSBAI, B. HSE Manager à EL KENDI, pour nous avoir donné la chance d'effectuer notre projet de fin d'étude au sein d'EL Kendi, et pour nous avoir accompagné et consacré du temps.

Notre gratitude va également à tous les enseignants du Département MRIE de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à notre formation durant notre cursus à l'École.

Dédicaces

*A la mémoire de mes grands-parents,
A mes parents,
A mon frère Meziane Réda et ma soeur Lina,
Je dédie ce modeste travail.*

Nazim

*A celle qui n'a jamais cessé de m'encourager pour faire de moi la
personne que je suis aujourd'hui, celle qu'aucun mot ne peut exprimer
mon amour éternel et mes reconnaissances infinies ... Ma chère maman,
ma réussite est la tienne !*

A celui qui est toujours fière de moi... Mon cher père

A celui qui a toujours été là pour moi... mon frère Mohamed

A mon petit ange... mon frère Wassim

A celui qui m'a toujours soutenu et cru en moi...mon fiancé Samy

A mes meilleures amies... Abir et Nabila

A ceux qui m'aiment, A ceux qui j'aime

Je dédie ce modeste travail.

Maroua

Table des matières

	Page
Liste des Figures	9
Liste des Tableaux	10
Nomenclature	10
Abréviations	11
Introduction générale	12
Chapitre 1 Contexte de l'étude	
1.1 Présentation de l'entreprise	15
1.2 Implantation du site	15
1.3 Description générale des magasins	16
1.4 Sécurité incendie en place	18
Chapitre 2 Synthèse de l'étude de danger	
2.1 Introduction	21
2.2 Objectifs de l'étude de dangers	21
2.3 Présentation de l'étude de dangers d'EL KENDI	21
2.4 Méthodologie de l'étude de dangers	21
2.5 Conclusion	25
Chapitre 3 Simulation numérique de l'incendie	
3.1 Introduction	27
3.2 Objectifs et résultats attendus	27
3.3 Présentation du code de calcul retenu	27
3.4 Méthodologie	28
3.5 Scénarios retenus	29
3.6 Construction du modèle	29
3.7 Conclusion	45
Chapitre 4 Étude des effets de l'incendie	
4.1 Introduction	47
4.2 Résultats des simulations FDS	47
4.3 Synthèse des résultats	65
4.4 Évacuation des usagers	66
4.5 Effet de l'incendie sur la structure	69

4.6	Conclusion	73
-----	----------------------	----

Chapitre 5 Evaluation et amélioration de la sécurité incendie

5.1	Introduction	75
5.2	Évaluation de la sécurité incendie	75
5.3	Proposition d'un plan d'action	77
5.4	Proposition d'un système de désenfumage	78
5.5	Conclusion	85

	Références bibliographiques	88
--	----------------------------------------------	-----------

	Annexe A : Description de la structure des magasins	93
--	----------------------------------------------------------------------	-----------

	Annexe B : Aperçu du code FDS	95
--	------------------------------------------------	-----------

	Annexe C : Note de calcul pour le système de désenfumage	99
--	---------------------------------------------------------------------------	-----------

	Annexe D : Aperçu de l'interface du framework	103
--	----------------------------------------------------------------	------------

Liste des figures

1.1	Façade latérale de l'usine El KENDI avec affectation des niveaux	15
1.2	Plan du magasin du rez-de-chaussée	17
1.3	Entreposage des produits - Magasin du rez-de-chaussée	17
1.4	Plan du magasin AC	18
1.5	Entreposage des produits - Magasin AC	18
1.6	Aperçu du système d'extinction automatique en place dans les magasins	19
2.1	Étapes de réalisation de l'étude de dangers	22
3.1	Rendus 3D de l'usine El KENDI.	30
3.2	Étagères du Magasin d'articles de conditionnement	32
3.3	Étagères du Magasin RDC	32
3.4	Schéma simplifié de la pyrolyse et de la combustion	33
3.5	Courbe de pyrolyse pour des articles en PE dans des boîtes en carton	34
3.6	Courbe de pyrolyse pour des boîtes en carton	34
3.7	Positionnement du départ de feu dans le magasin RDC	37
3.8	Positionnement du départ de feu dans le magasin AC	37
3.9	Évolution d'un feu exprimé en taux de dégagement de chaleur en fonction du temps.	39
3.10	Comparaison des taux de chaleurs pour des maillages de différentes résolutions	42
3.11	Comparaison des taux de chaleurs pour des maillages de différentes résolutions	43
3.12	Logo du service Elastic Cloud	44
4.1	Évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse - Magasin RDC	48
4.2	Comparaison entre l'évolution de la puissance théorique et celle obtenue par FDS	49
4.3	Simulation réalisée par le VTT [20]	49
4.4	Puissance dégagée - Simulation du VTT	50
4.5	Évolution des paramètres critiques d'un flashover - Magasin RDC	52
4.6	Chronologie de l'incendie - Magasin RDC	52

4.7	Évolution de l'emprise des fumées dans le magasin RDC	53
4.8	Enfumage des escaliers - Magasin RDC	53
4.9	Évolution de la visibilité à hauteur d'homme - Magasin RDC	54
4.10	Évolution de la température à hauteur d'homme -Magasin RDC . . .	55
4.11	Localisation des points critiques de relevés de température	56
4.12	Évolution de la température aux points critiques - Magasin RDC . .	56
4.13	Évolution de la température aux points clés - Magasin RDC	57
4.14	Évolution du flux thermique net- Magasin RDC	58
4.15	Évolution de la toxicité à hauteur d'homme - Magasin RDC	59
4.16	Évolution de la concentration aux points critiques - Magasin RDC .	60
4.17	Évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse - Magasin AC	61
4.18	Comparaison entre l'évolution de la puissance théorique et celle enregistrée par FDS	62
4.19	Résultat de la puissance dégagée par la simulation du VTT [20] . . .	62
4.20	Évolution des paramètres clés d'un flashover - Magasin AC	63
4.21	Chronologie de l'incendie - Magasin AC	63
4.22	Évolution de l'envahissement des escaliers - Magasin AC	64
4.23	Évolution de l'emprise des fumées dans le magasin AC	64
4.24	Evolution du nombre d'occupants en fonction du temps au niveau du rez-de-chaussée	67
4.25	Evolution du nombre d'occupants en fonction du temps au niveau du 2ème étage	68
4.26	Temps nécessaire pour l'évacuation	68
4.27	Flux thermique incident sur un élément structurel	71
4.28	Distribution de la température en °C à t=30 mn - Magasin RDC . .	72
4.29	Distribution de la température °C à t=30 mn - Magasin AC	72
5.1	Schéma d'un système de désenfumage mécanique type	80
5.2	Évolution des débits de CO et des suies à partir de la puissance - Magasin RDC	83
5.3	Évolution des débits de CO et des suies à partir de la puissance - Magasin AC	83
5.4	Évolution des paramètres critiques - Magasin RDC	84
5.5	Évolution des paramètres critiques - Magasin AC	84

Liste des tableaux

1.1	Affectation des activités au sein du bâtiment de l'usine El Kendi . . .	16
2.1	Etape 1, HAZID	23
2.2	Etape 2, Matrice de présentation des résultats de l'APR	23
2.3	Etape 3, Grille de criticité des scénarios majeurs	24
3.1	Résumé de quelques propriétés définies dans FDS [8]	31
3.2	Valeurs expérimentales du débit de pyrolyse	34
3.3	Taux de CO et de suie pour les combustibles retenus	35
3.4	Mesure des paramètres critiques à 1.75m du sol	40
3.5	Mesure des conditions 30cm sous le plafond	40
3.6	Variation de la résolution du maillage	42
3.7	Variation de la résolution du maillage	43
4.1	Coefficients correspondant à différents régimes de croissance	48
4.2	Comparaison des propriétés du combustible pour les deux simulations	50
4.3	Puissance générée par diverses sources	51
4.4	Résumé des temps de remise en cause des critères de tenabilité pour le personnel	65
4.5	Résumé des temps de remise en cause des critères de tenabilité pour des agents d'intervention équipés d'ARI	66
4.6	Bilan du temps nécessaire pour l'évacuation du personnel	69
4.7	Température et flux critiques pour certains matériaux	70
5.1	Performance des systèmes de lutte incendie [Mars 2020]	77
5.2	Volet lutte incendie du plan d'action	78
5.3	Evolution des niveaux de performance de la lutte incendie	78

Nomenclature

- ΔH_c : Chaleur de combustion [kJ/kg]
- v_i : Coefficient stoechiométrique
- y_i : Fraction massique
- W_i : Masse molaire [g/mol]
- x : Nombre d'atomes de carbone
- y : Nombre d'atomes d'hydrogène
- z : Nombre d'atomes d'oxygène
- O : Oxygène
- H : Hydrogène
- CO : Monoxyde de carbone
- CO_2 : Dioxide de carbone
- CH_4 : Méthane
- P_{in} : Puissance incidente
- ϵ_s : Emissivité
- h : Coefficient de transfert thermique
- q''_{net} : Flux thermique net
- q''_{rad} : Flux thermique radiatif
- T_s : Température à la surface des poutres/poteaux
- T_{gaz} : Température des gaz chauds
- dA : Unité de surface
- $D^*/\delta x$: Résolution du maillage
- D^* : Diamètre caractéristique du feu
- δx : Taille nominale d'une cellule de maillage
- \dot{Q} : Taux de chaleur [kW]
- ρ_{air} : Masse volumique de l'air ambiant [kg/m^3]
- c_p : Capacité calorifique de l'air ambiant [$kJ/kg.K$]
- T_{air} : Température ambiante
- g : Accélération de la gravité (m/s)
- δt : Un pas de temps
- U : Vitesse d'advection des particules [m/s]
- Δ : Taille nominale d'une cellule du maillage
- $P_{drysdale}$: Puissance de Drysdale
- α : Coefficient de croissance
- $HRRPUA$: Taux de chaleur par unité de surface [kW/m^2]
- V : Volume de canton [m^3]
- S : Superficie du canton [m^2]
- Q_v : Débit nominal du ventilateur [m^3/s]
- Q_{ext} : Débit d'extraction [m^3/s]
- Q_1 : Débit maximal d'extraction [m^3/s]
- $\dot{Q}_{combustible}$: Débit de combustible [m^3/s]
- \dot{Q}_{event} : Débit d'évent [m^3/s]

Abréviations

- 2D : Deux dimensions
- 3D : Trois dimensions
- AC : Articles de conditionnement
- ADR : Analyse détaillée des risques
- ALARP : As Low As Reasonably Achievable
- ARI : appareil respiratoire individuel
- CFD : Computational Fluid Dynamics
- EDD : Étude de dangers
- EPR : Évaluation préliminaire des risques
- ESFR : Early Suppression Fast Response
- FDA : La Food and Drug Administration (l'administration américaine des denrées alimentaires et des médicaments)
- FDS : Fire Dynamics Simulator
- HAZID : HAZard IDentification (identification des dangers)
- HRR : Heat release rate (taux de chaleur dégagée)
- HSE : Qualité - Hygiène - Sécurité
- EPI : Équipements de protection individuels
- MLR : Mass loss rate (Débit massique de pyrolyse)
- min : minimum
- mn : minute
- P : Probabilité
- PE : Polyéthylène.
- QA : Assurance qualité
- RDC : Rez-de-chaussée
- RIA : Robinet d'incendie armé.
- sec : seconde
- VTT : Centre de recherche technique de Finland

Introduction générale

Au sein de notre société moderne, le risque incendie revêt d'un caractère permanent car il est impossible d'écarter d'une manière systématique tous les matériaux combustibles, de même qu'il est déraisonnable d'imaginer un monde à l'abri des défaillances et des malveillances. Il convient donc de réduire le niveau de risque incendie au minimum par la mise en œuvre d'une panoplie de mesures telles que la détection, l'extinction automatique et l'évacuation des fumées. Cependant, ces mesures de sécurité ne dispensent pas de la nécessité de concevoir des structures résistantes au feu permettant de minimiser les dégâts occasionnés au bâtiment et assurant une intervention sûre de la protection civile.

Pour cela, les industriels consentent des investissements importants dans la prévention et la protection contre le risque incendie. EL KENDI ne fait pas exception et s'efforce de protéger son personnel et ses installations dans la mesure de ses moyens. Afin d'assister l'entreprise dans cette mission, on s'efforce à travers ce travail de développer les méthodes et outils permettant d'évaluer le potentiel destructif des incendies et l'adéquation des moyens mis en place.

Ainsi, la problématique de cette étude trouve sa genèse dans les préoccupations de l'entreprise par rapport à la sécurité incendie. En effet, les questions suivantes ont été posées :

1. L'évacuation est-elle faisable si on tient compte de la dynamique de l'incendie ?
2. Les systèmes de lutte incendie sont-ils correctement exploités ?
3. Comment s'assurer que les systèmes de lutte incendie mis en œuvre par El Kendi restent performants et aptes à préserver l'intégrité de ses installations et la sécurité de son personnel **dans la durée** ?

Pour répondre à ces préoccupations, nous nous sommes fixés les objectifs suivants :

1. Synthétiser l'étude de danger afin de sélectionner les scénarios d'incendie critiques.
2. Simuler les scénarios retenus et vérifier si la dynamique de l'incendie est compatible avec l'évacuation des personnes. Pour cela, on évalue le temps de remise en cause des conditions de survie des personnes et de la tenue de la structure. Puis on le compare avec la durée nécessaire pour évacuer les lieux.
3. Implémenter un protocole permettant d'évaluer la performance des systèmes de lutte incendie **en continu**.

4. Proposer un plan d'amélioration pour la mise à niveau des systèmes de lutte incendie.
5. Mettre en place un système de désenfumage mécanique dans les magasins comme suggéré dans des rapports d'inspections remis à l'entreprise par des consultants.

Ce mémoire s'articule donc autour de cinq chapitres : Après un **premier chapitre** en guise de mise en situation, un **deuxième chapitre** sera consacré à la synthèse de l'étude de danger, à travers laquelle nous identifierons les scénarios d'incendie critiques qui seront étudiés par la suite. Puis, dans le **troisième chapitre** nous présentons le modèle considéré pour la simulation de la dynamique de l'incendie suivant les scénarios prédéfinis. Dans le **quatrième chapitre**, les résultats des simulations seront interprétés. Les temps de remise en cause des critères de survie pour le personnel dans les locaux sera déterminé puis comparé au temps d'évacuation afin de vérifier si la dynamique de l'incendie entrave l'évacuation des personnes. En outre, l'effet de l'incendie sur la structure sera évalué. Dans le **cinquième et dernier chapitre**, nous évaluons les systèmes de lutte incendie en place à l'aide d'un protocole dédié. Nous proposerons par la suite un plan d'action visant à améliorer la sécurité incendie en fonction des résultats issus des chapitres 4 et 5.

Chapitre 1

Contexte de l'étude

1.1 Présentation de l'entreprise

EL KENDI est une entreprise pharmaceutique algérienne avec un investissement étranger direct. C'est l'un des plus grands investissements privés en Algérie dans le domaine de la pharmacie. L'usine est située au niveau de la zone d'activité El Boustene (Rahmania). Inaugurée en 2008, cette usine fabrique toutes les formes de produits pharmaceutiques usuelles à savoir les formes sèches, liquides et pâteuses. Les médicaments produits par EL KENDI sont dédiés principalement au traitement des maladies chroniques (hypertensions artérielles et maladies cardiovasculaires, système nerveux central, diabète et métabolisme, appareil urinaire, appareil respiratoire et même le cancer). EL KENDI ambitionne de maintenir sa position sur le marché et l'étendre vers d'autres classes thérapeutiques.

1.2 Implantation du site

L'établissement est implanté sur un terrain d'une superficie totale d'environ $8000 m^2$. Au voisinage de cet établissement on retrouve :

Au Nord, une unité de montage de matériel informatique. Au sud et à l'est, des terrains vagues. Et à l'ouest, une ligne électrique haute tension qui passe à environ 35m. L'usine est accessible depuis Mahelma et Douera par la route nationale RN 63. L'unité de protection civile la plus proche est celle de Zeralda, située à environ 15 km du site (temps de trajet estimé à 30 mn en cas de trafic dense).

L'usine de production regroupe toutes les activités de stockage des matières premières, de fabrication des médicaments et de stockage des produits finis. Elle est constituée d'un seul bâtiment de trois étages (un sous-sol, un rez de chaussée, deux étages et 4 mezzanines), avec une emprise au sol de $1900 m^2$, **figure (1.1)**. Dans le **tableau (1.1)**, les affectations des différentes activités sont présentées.

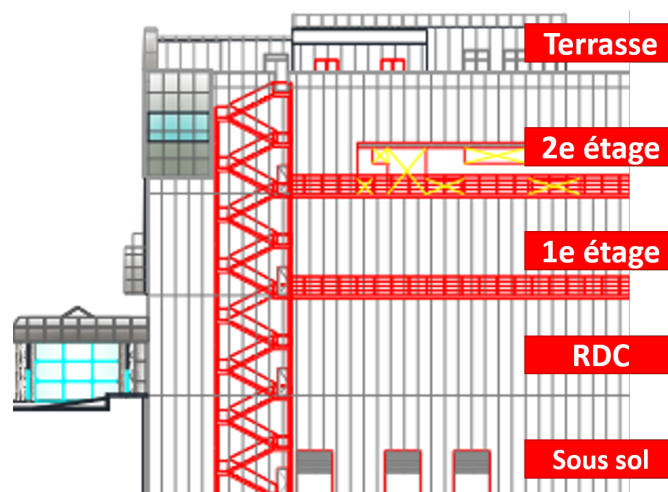


FIGURE 1.1 – Façade latérale de l'usine El KENDI avec affectation des niveaux

Tableau 1.1 – Affectation des activités au sein du bâtiment de l'usine El Kendi

Niveau	Affectation	Surface <i>m</i> ²
Sous sol	Lignes de production	1400
	Utilités	408
Mezzanine sous sol	Centrale de traitement d'air (CTA) Equipements électriques	1808
Rez-de-chaussée	Magasin de stockage Matiere premiere et produits finis	1900
1er étage	Lignes de production	1926
Mezzanine 1er étage	Centrale de traitement d'air (CTA)	-
2e étage	Laboratoire controle qualité	640
	Magasin de stockage d'articles de conditionnement	1590
3e étage (Mezzanine 2e étage)	Administration	310
	Laboratoire de recherche & développement	310
Terasse	Cantine Salles de stabilité Archives	500

1.3 Description générale des magasins

1.3.1 Magasin du rez de chaussée (RDC)

Le magasin de stockage des matières premières et produits finis est situé au niveau du rez-de-chaussée. Les zones de stockage sont de taille suffisante pour permettre un stockage ordonné des différentes catégories de produits : matières premières, produits intermédiaires, vrac et finis, produits en quarantaine, libérés, refusés et retournés ou rappelés, **figure(1.2)**.

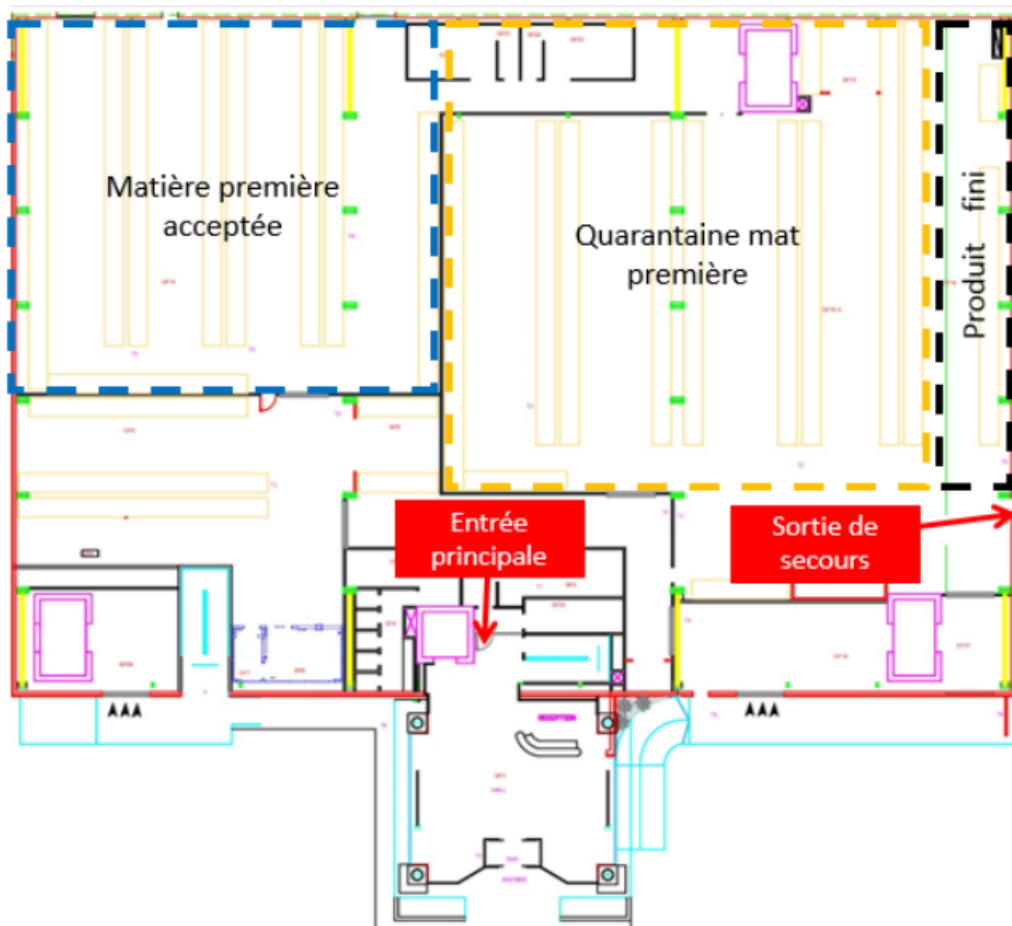


FIGURE 1.2 – Plan du magasin du rez-de-chaussée

L'entreposage est effectué sur palettes, dans des conteneurs spécialisés, ou sur des rayonnages métalliques à 4 voire 5 niveaux. Le dernier niveau de stockage est à 6 mètres du sol, **figure(1.3)**.



FIGURE 1.3 – Entreposage des produits - Magasin du rez-de-chaussée

1.3.2 Magasin des articles de conditionnement (AC) - 2ème étage

Le magasin de stockage des emballages et des articles de conditionnement est situé au niveau du deuxième étage. La surface du magasin est de $1590m^2$. Il est doté d'un système d'entreposage en rayonnages, **figures (1.4) et (1.5)**.

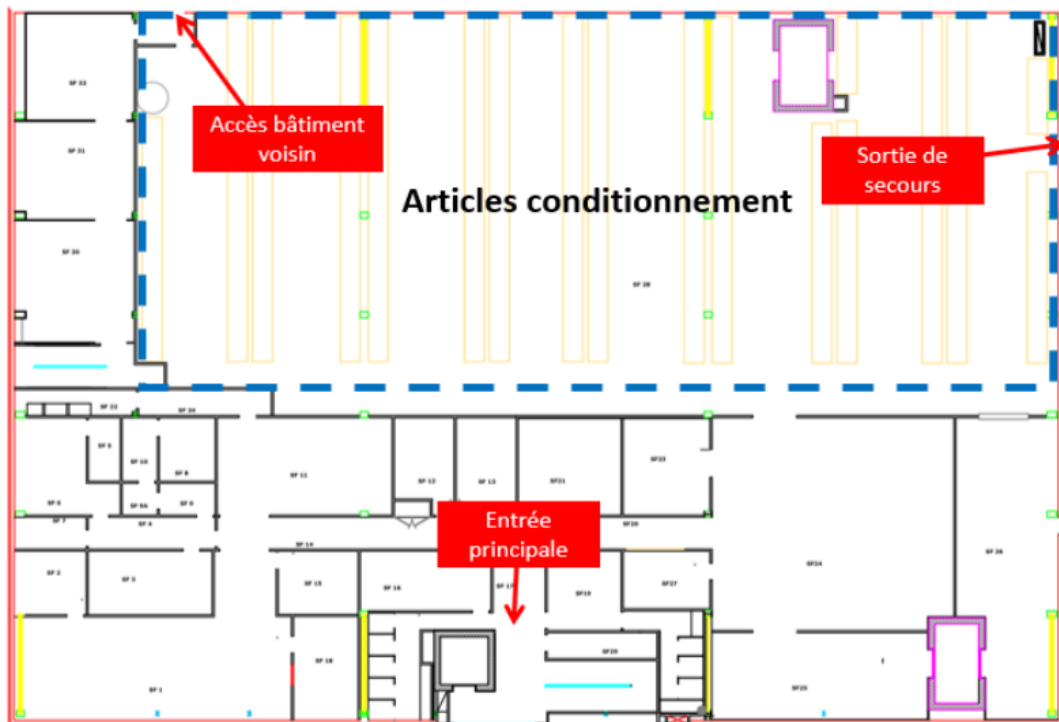


FIGURE 1.4 – Plan du magasin AC



FIGURE 1.5 – Entreposage des produits - Magasin AC

1.4 Sécurité incendie en place

Des extincteurs adaptés à la nature des risques sont installés dans tout le bâtiment. Le site est équipé d'un système de détection des fumées, d'un dispositif de robinet d'incendie armé (RIA) au niveau de tous les étages avec une réserve d'eau de $1590m^3$, en plus de 3 poteaux incendie de plus de $60m^3/h$ situés à l'extérieur.

Les magasins sont munis d'un système d'extinction automatique "sprinkleur" de type ESFR (Early Suppression Fast Response). La température de déclenchement du sprinkleur est calibrée à $68\text{ }^\circ\text{C}$. On recense 91 têtes de sprinkleur pour le magasin RDC et 61 têtes pour le magasin AC.

Les sprinkleurs servent autant de moyen de détection que d'extinction **figure(1.6)**. Il a été constaté qu'aucun système de désenfumage n'est en place dans les deux magasins.

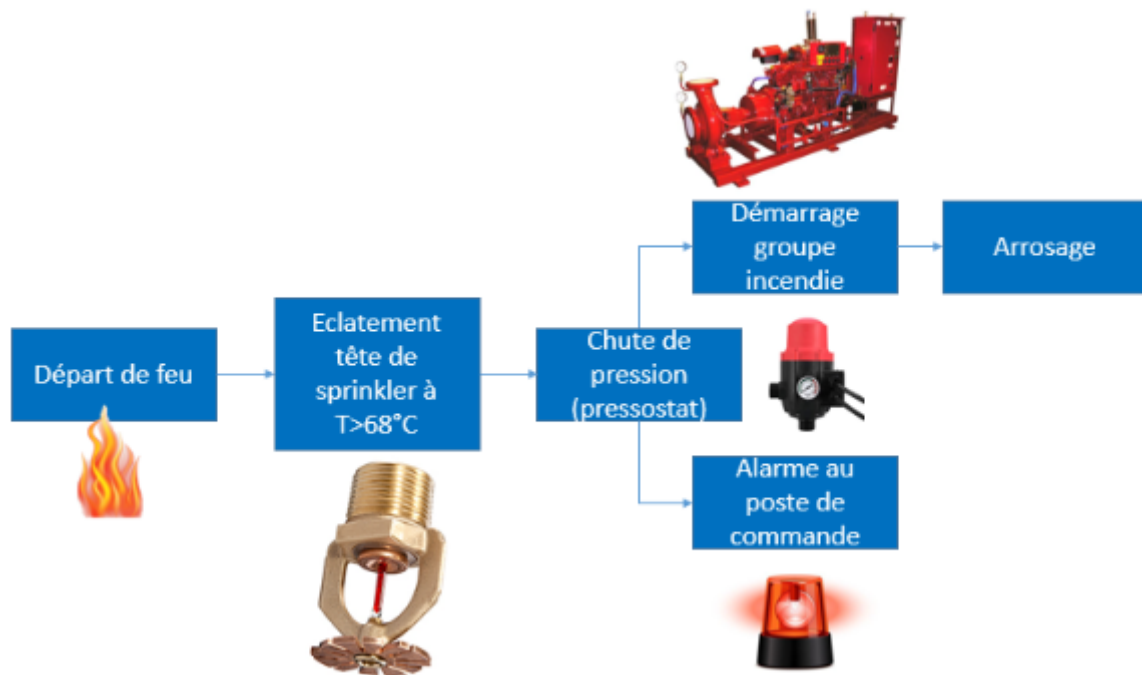


FIGURE 1.6 – Aperçu du système d'extinction automatique en place dans les magasins

Chapitre 2

Synthèse de l'étude de danger

2.1 Introduction

La synthèse de l'étude de danger est une étape essentielle dans notre démarche. Le choix des scénarios d'incendie qui seront simulés a été effectué à partir de celle-ci.

2.2 Objectifs de l'étude de dangers

L'étude de danger est une exigence réglementaire conditionnant l'exploitation des sites industriels classés. Elle s'inscrit dans la démarche de maîtrise des risques qu'un exploitant doit mettre en place en vue de sécuriser son établissement. Elle se présente sous la forme d'un document technique qui caractérise les risques par l'identification des scénarios d'accidents majeurs et les mesures nécessaires pour les maîtriser.

2.3 Présentation de l'étude de dangers d'EL KENDI

L'étude de dangers a été réalisée sous la responsabilité d'EL KENDI avec l'assistance de SGS QUALITEST ALGERIE, qui dispose d'un réseau mondial de plus de 2 600 bureaux et laboratoires [2]. Elle définit et justifie les mesures à mettre en place afin de réduire les risques à un niveau aussi bas que possible dans des conditions économiquement acceptables, en tenant compte de la vulnérabilité de l'environnement de l'usine [1].

2.4 Méthodologie de l'étude de dangers

L'étude est réalisée conformément aux exigences réglementaires en vigueur, notamment le décret exécutif 06-198 [1]. La méthodologie développée comporte trois étapes principales : l'identification des risques (HAZID), l'évaluation préliminaire des risques (EPR) et l'analyse détaillée des risques (ADR), **figure 2.1**.

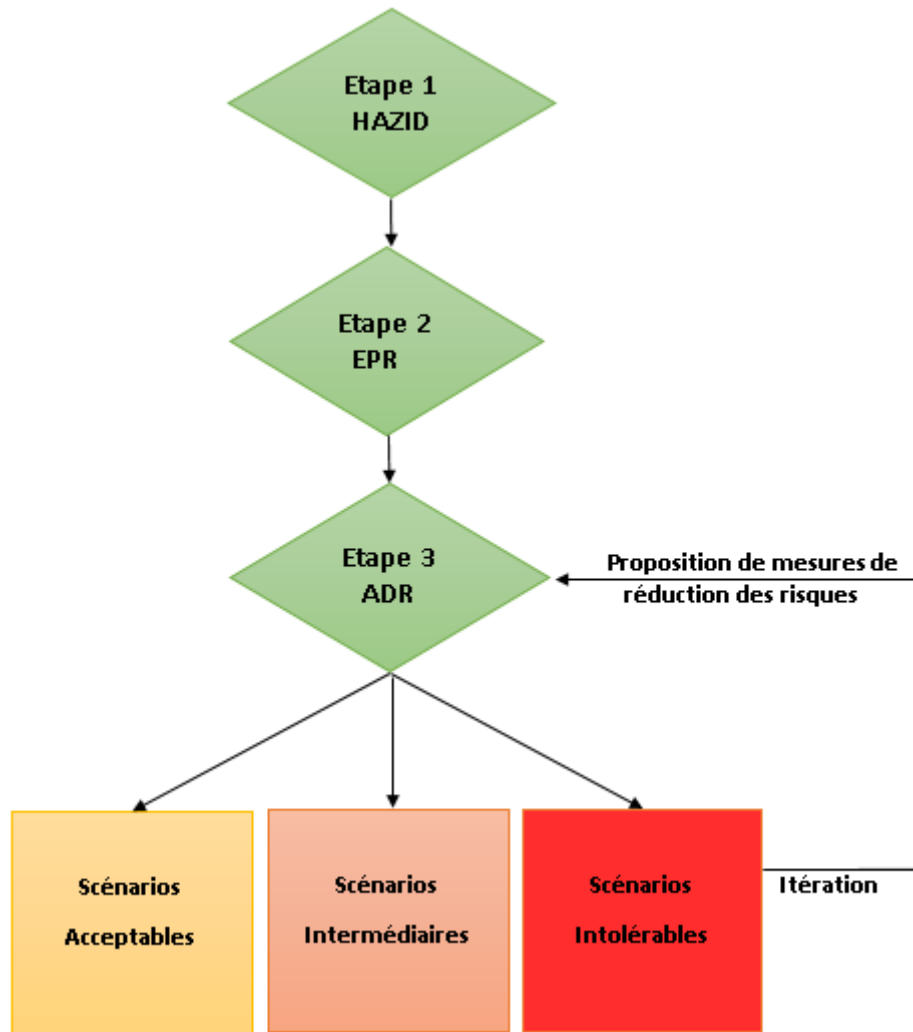


FIGURE 2.1 – Étapes de réalisation de l'étude de dangers

2.4.1 Identification des risques (HAZID)

Les objectifs de l'étape d'identification des risques (HAZID) sont :

1. Le découpage de l'installation en systèmes et sections.
2. L'identification des dangers liés aux produits, aux installations (procédés, conditions opératoires...), aux opérations particulières (arrêt/démarrage, maintenance), aux pertes d'utilité ou encore liés à l'environnement.
3. L'accidentologie : analyse des accidents s'étant produits sur des installations similaires par le passé, pour s'assurer que les barrières de prévention/protection adéquates sont mises en place sur le système étudié.
4. L'identification des éléments de l'environnement et du voisinage de l'établissement, à protéger (lieux de présence humaine, installations importantes du site) et les sources d'agressions (les unités voisines).
5. Construction du tableau HAZID.

6. Sélection des sections à étudier : Suite à la HAZID, certaines situations dangereuses seront sélectionnées afin d'être étudiées lors de l'Evaluation Préliminaire des Risques (EPR),[1].

Tableau (2.1) : Etape 1, HAZID

Nœud/ ligne	Unité/ activité	Mot clé	Développement potentiel et conséquences	Barrières existantes (Prévention/ Atténuation & Protection)

Recommandations / Action	Remarques	Priorité 1= Haute 2=Moyenne 3= Basse	Phase projet	Responsable

2.4.2 Évaluation Préliminaire des Risques (EPR)

Cette étape, basée sur la HAZID, permet une première sélection des scénarios les plus critiques identifiés par leur niveau de probabilité et de gravité. Ces scénarios critiques seront ensuite étudiés en détails dans l'Analyse Détaillée des Risques (ADR), Tableau (2.2).

Les critères pour la définition des classes de fréquences, de gravité et d'acceptabilité du niveau de risque lors de l'EPR sont :

1. L'estimation de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.
2. L'estimation de la gravité des conséquences du phénomène dangereux considéré.
3. L'attribution d'un niveau de probabilité et d'un niveau de gravité au scénario à partir d'échelles de cotation.
4. La sélection des scénarios critiques à étudier à l'étape 3 à l'aide d'une matrice de sélection des scénarios critiques.

Tableau (2.2) : Etape 2, Matrice de présentation des résultats de l'EPR

Gravité des conséquences	Fréquence (par an)				
	Extrêmement rare $P < 10^{-5}$	Rare $10^{-5} \leq P < 10^{-4}$	Peu fréquent $10^{-4} \leq P < 10^{-3}$	Occasionnel $10^{-3} \leq P < 10^{-2}$	Fréquent $10^{-2} \leq P$
Désastreux 5					
Catastrophique 4				Scénarios à étudier en détail (ADR)	
Majeur 3					
Modéré 2	Scénarios globalement acceptables				
Mineur 1					

2.4.3 Analyse Détaillée des Risques (ADR)


Cette partie consiste à étudier en détail les scénarios critiques identifiés par l'EPR afin de vérifier qu'ils sont bien maîtrisés, Tableau (2.3).


Elle suit les étapes suivantes :


1. L'évaluation de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté (arbres de défaillance, arbre d'événement, bases de données...).
2. L'évaluation des conséquences de l'accident (modélisation des scénarios).
3. L'évaluation de la gravité des conséquences du phénomène dangereux considéré.
4. L'attribution d'un niveau de probabilité et d'un niveau de gravité au scénario étudié à partir d'échelles de cotation.
5. L'évaluation du risque et de l'acceptabilité des scénarios à partir d'une matrice d'acceptabilité

Tableau (2.3) : Grille de criticité des scénarios majeurs

Gravité des conséquences	Fréquence (par an)				
	Extrêmement rare $P < 10^{-5}$	Rare $10^{-5} \leq P < 10^{-4}$	Peu fréquent $10^{-4} \leq P < 10^{-3}$	Occasionnel $10^{-3} \leq P < 10^{-2}$	Fréquent $10^{-2} \leq P$
Désastreux 5					
Catastrophique 4					
Majeur 3					
Modéré 2					
Mineur 1					

 Zone de risque acceptable, ne nécessitant pas la mise en place de mesures de réduction.

 Zone de risque intermédiaire. Pour ces scénarios, une démarche d'amélioration continue est pertinente en vue d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible (ALARP)

 Zone de risque intolérable, la mise en place de mesure de réduction est nécessaire.

2.5 Conclusion

L'étude de danger retient deux scénarios d'incendie préoccupants :

- Scénario 1 : Incendie dans le magasin de stockage des matières premières et des produits finis situé au rez-de-chaussé.
- Scénario 2 : Incendie dans le magasin d'emballage et articles de conditionnement du 2ème étage.

Ces deux scénarios ont été évalués comme étant les plus critiques en raison de la grande quantité de matière combustible disponible dans les magasins, leur configuration qui favorise la propagation de l'incendie, l'absence d'évacuation pour les fumées et la difficulté d'accès pour les équipes d'intervention.

Une démarche d'amélioration continue est donc requise pour arriver à un niveau de risque aussi bas que possible, d'où le choix de ces deux pour la suite de notre étude.

Chapitre 3

Simulation numérique de l'incendie

3.1 Introduction

Comprendre la dynamique du feu est primordial pour la réussite d'une étude d'ingénierie de la sécurité incendie. Dans ce travail, une approche déterministe a été retenue pour évaluer le comportement de l'incendie. A cet effet, une simulation a été préparée à l'aide du code "Fire dynamics simulator" (FDS) et exécutée sur une machine de calcul haute performance. Dans ce chapitre nous décrivons le code de calcul utilisé, la méthodologie suivie et les hypothèses retenues.

3.2 Objectifs et résultats attendus

La simulation CFD permet de suivre l'évolution des paramètres caractéristiques de l'incendie (graphiquement et analytiquement) au cours du temps. La simulation se base sur un scénario préalablement défini proche des conditions réelles. Elle nous permettra d'atteindre les objectifs suivants :

1. Comprendre le comportement de l'incendie et anticiper son développement (propagation, flashover ...)
2. Déterminer le temps **disponible** pour l'évacuation du personnel dans l'installation : en suivant l'évolution des paramètres clés de tenabilité, on peut déterminer le moment à partir duquel la survie des personnes dans le milieu n'est plus possible. Ce temps sera comparé à la durée nécessaire pour évacuer le personnel afin de vérifier que l'évacuation est faisable. Dans le cas contraire, des mesures d'amélioration seront proposées.
3. Évaluer l'effet de l'incendie sur la structure du bâtiment.
4. Vérifier la nécessité de mettre en place un système de désenfumage mécanique dans les magasins comme suggéré dans des rapports d'inspections remis à l'entreprise par des consultants.

3.3 Présentation du code de calcul retenu

L'outil de simulation employé dans cette étude est le code "Fire Dynamics Simulator (FDS)", version 6.7.4. Il a été développé par le National Institute of Standards and Technology (NIST), dépendant du Département du Commerce des Etats-Unis d'Amérique. FDS est largement utilisé dans le domaine de la sécurité incendie. Il a notamment servi pour l'enquête sur l'effondrement des tours du World Trade Center (11 sep 2001) [3].

FDS est un modèle de dynamique des fluides numérique (CFD) modélisant l'écoulement des fluides entraînés par le feu. Il résout numériquement une forme

des équations de Navier-Stokes appropriée pour un écoulement à faible nombre de Mach ($Mach < 0,3$). Il y associe des modèles chimiques (pour la combustion) et thermiques (transfert de chaleur par rayonnement, convection et conduction) [4]. Concrètement, le domaine 3D est divisé en sous volumes (maillages). Pour estimer l'évolution des différentes grandeurs (tels que la température, la pression, ou les concentrations des éléments chimiques) à intervalles réguliers dans le domaine, un ensemble d'équations de conservation discrétisées est appliqué :

1. La conservation de la quantité de mouvement (pour le calcul de la vitesse des fumées, pression).
2. La conservation de l'énergie, (échanges thermiques sous forme de conduction, de convection ou de rayonnement).
3. Le transport des espèces chimiques (réactions chimiques en fonction des bilans stœchiométriques et de la température).
4. Les réactions chimiques de pyrolyse et de combustion (taux de production de fumées et de chaleur).
5. La modélisation de la turbulence.
6. Les lois d'état du gaz qui déterminent la variation de densité de l'air et les effets convectifs.

FDS ne limite pas la plage des paramètres d'entrée. Le programme résout les équations fondamentales de conservation [5]. La validité de FDS a été établie avec succès par des expériences ayant comparé les résultats numériques et les données expérimentales [6]. On considère donc les résultats des simulations effectuées dans cette étude comme dignes de confiance.

3.4 Méthodologie

La préparation d'une simulation incendie sur FDS passe par les étapes suivantes [4] :

1. Sélection des scénarios pour étude.
2. Construction du modèle : Définition des matériaux, surfaces, éléments combustibles, réaction de combustion, plans de mesure...
3. Définition des conditions initiales et aux limites, avec notamment la taille du maillage et la durée de la simulation.
4. Exécution du code.
5. Visualisation et interprétation des résultats.

3.5 Scénarios retenus

La synthèse de l'étude de danger préalablement réalisée dans le **Chapitre 2** a permis d'identifier deux scénarios d'incendie :

1. Un incendie dans le magasin de stockage de la matière première et des produits finis situé au rez-de-chaussée du bâtiment.
2. Un incendie dans le magasin des articles de conditionnements (AC) situé au deuxième étage

Ainsi, nous avons opté pour la réalisation des simulations numériques sur ces deux scénarios afin de mettre en évidence leur gravité par rapport à l'installation. Il s'agira de simuler des scénarios-modèles, qui soient représentatifs, majorants et critiques (cas les plus défavorables) afin de mettre à l'épreuve le système de sécurité et les critères de tenabilité [7].

Par rapport aux hypothèses relatives aux dispositifs de sécurité, on suppose l'échec de l'extinction automatique afin de favoriser le développement de l'incendie (cas le plus défavorable). De plus, il n'y a pas de système de désenfumage en place à ce jour dans les deux magasins, ce qui favorise l'accumulation et la propagation des fumées et les gaz toxiques et affecte grandement la survie des personnes dans le milieu.

3.6 Construction du modèle

3.6.1 Maquette 3D

La maquette 3D du bâtiment a été construite à partir des plans fournis par El Kendi. L'ensemble des niveaux ont été restitués, **figure(3.1)**. Cependant, les simulations seront uniquement réalisées sur les magasins AC et RDC.

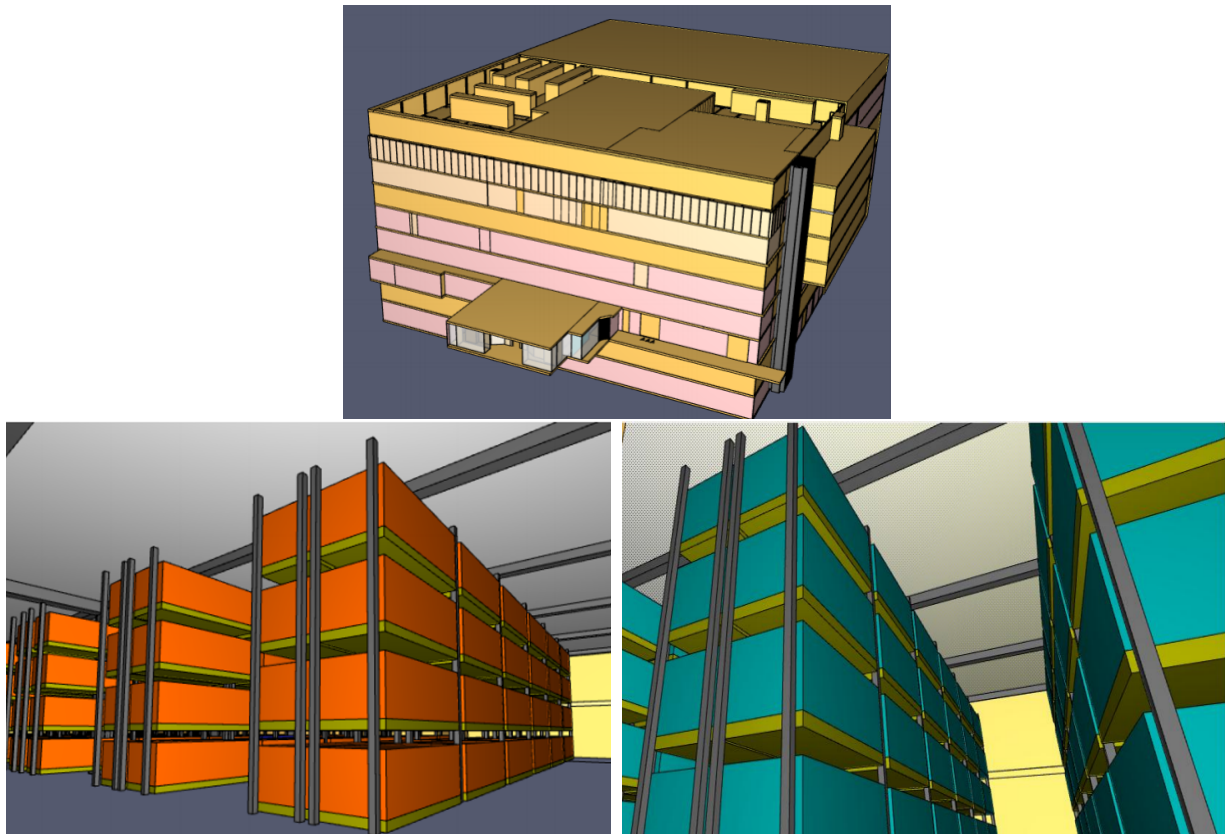


FIGURE 3.1 – Rendus 3D de l'usine El KENDI. Respectivement, Vue extérieur du bâtiment, maquette 3D du magasin RDC, maquette 3D du magasin AC

3.6.2 Définition des matériaux

Les propriétés des obstructions ont été définies pour que FDS puisse déterminer les conditions aux limites de celles-ci.

Une obstruction est tout élément solide imperméable : mur, plancher, séparations, palette, étagères, etc. Dans FDS, les propriétés requises pour définir un matériau sont :

- La masse volumique (kg/m^3),
- La chaleur spécifique ($kJ/(kg.K)$)
- La conductivité ($W/(m.K)$)
- L'émissivité
- La chaleur de combustion (kJ/kg)

Ces propriétés permettent en particulier de connaître à quelle vitesse les matériaux chauffent et comment ils brûlent. Le **tableau (3.1)** présente les matériaux considérés dans notre étude.

Tableau 3.1 – Résumé de quelques propriétés définies dans FDS [8]

Propriété	Acier	Mousse de polyuréthane	Bois	Polyethylene	Carton ondulé
Masse volumique (kg/m^3)	7850	28	640	900	23.6
Chaleur spécifique ($kJ/(kg.K)$)	0.46	1.70	2.58	1.50	1.45
Conductivité ($W/(m.K)$)	45.8	0.05	0.30	0.50	0.30
Emissivité	0.95	0.90	0.90	0.90	0.90
Chaleur de combustion (kJ/kg)	NA	25400	17700	40000	14200

3.6.3 Définition des surfaces

Une surface est composée d'un ou plusieurs matériaux (en couches). La surface ainsi créée sera assignée à une obstruction. A partir des propriétés des matériaux définies précédemment, FDS peut simuler le comportement de la surface exposée au flux de chaleur. Dans cette étude, les surfaces suivantes ont été définies : panneaux sandwich, palettes en bois, plancher en béton, murs en béton, poutres et poteaux en acier.

3.6.4 Définition des éléments combustibles

Les éléments potentiellement combustibles dans les deux magasins ont été répertoriés. Les palettes et articles de stockage ont été retenus. Étant donné la variété d'articles entreposés dans chacun des deux magasins et l'impossibilité de tous les inclure, des éléments combustibles représentatifs sont définis pour chaque magasin. Les caractéristiques d'un élément combustible type (dynamique de combustion, température d'inflammation...) sont tirées de la littérature [8].

— **Magasin AC** : Les articles de conditionnement sont principalement en plastique. Ainsi, pour ce magasin, le foyer type est constitué de bacs comprenant des articles en polyéthylène (PE) empilés sur des palettes en bois, **figure (3.2)**.

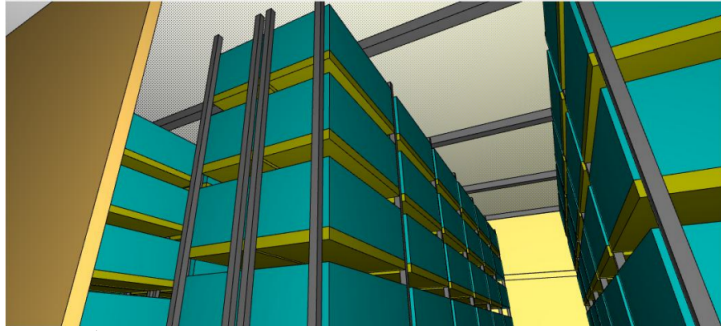


FIGURE 3.2 – *Étagères du Magasin d'articles de conditionnement*

- **Magasin RDC** : Pour le magasin du rez de chaussée qui abrite la matière première et les produits finis, les bacs sont en carton et empilés sur des palettes en bois. La fraction de combustible de la matière première et des produits finis étant de nature organique, elle est donc représentée par le carton (la cellulose), **figure (3.3)**.

Pour les deux magasins, la masse d'un seul bac est définie à 1500 kg qui est la charge maximale supportée par une palette européenne (EPAL) [9].

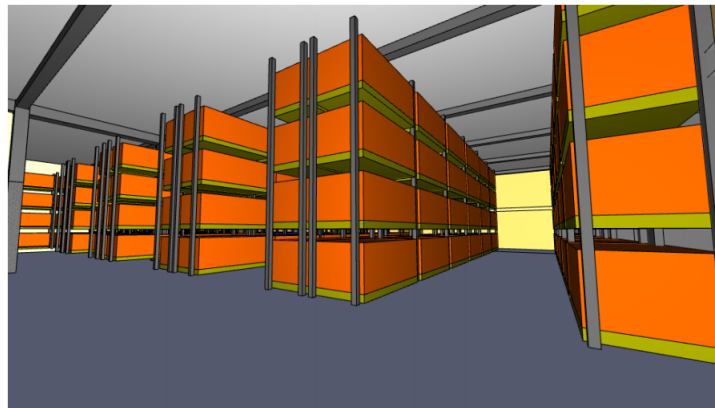


FIGURE 3.3 – *Étagères du Magasin RDC*

3.6.5 Hypothèses relatives à la combustion

Dans FDS, la combustion survient en deux étapes (**figure (3.4)**) :

1. La décomposition du combustible solide par pyrolyse permet de générer de la vapeur combustible à la surface du solide. Dans cette étude, on suppose que la vapeur combustible générée est du méthane CH_4 .
2. La réaction de combustion en phase gazeuse : réaction entre la vapeur combustible et l'oxygène de l'air.

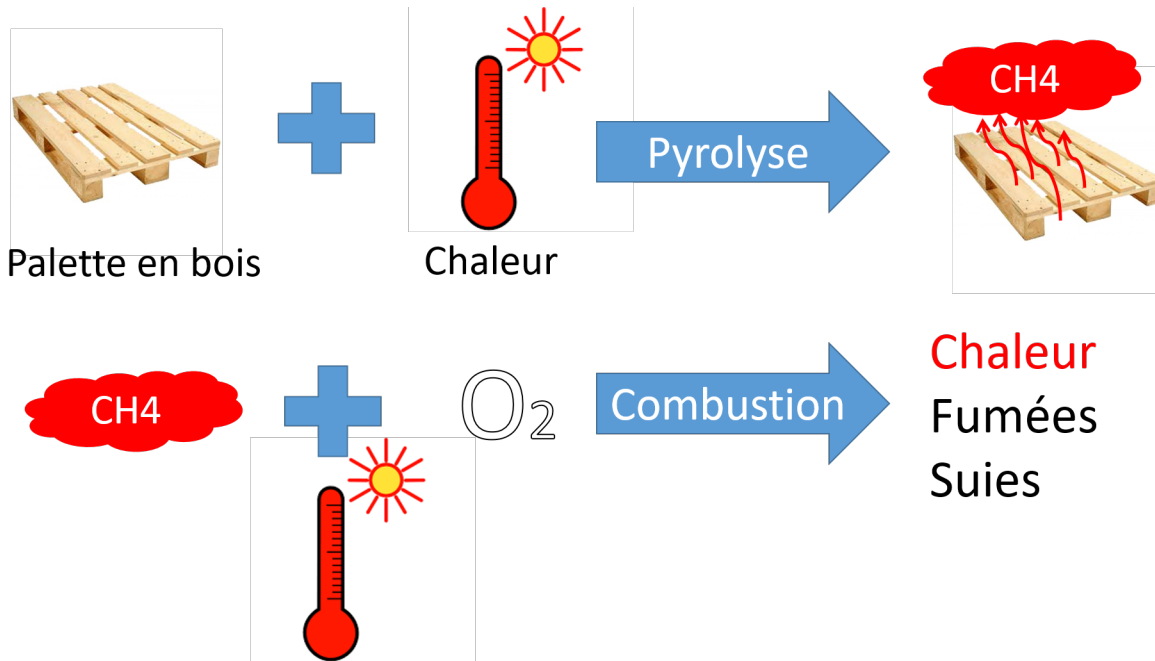


FIGURE 3.4 – Schéma simplifié de la pyrolyse et de la combustion

Dans ce travail, un modèle simplifié de pyrolyse a été retenu. FDS commande le débit de la vapeur combustible libérée à la surface du foyer depuis l'allumage jusqu'à ce qu'il soit totalement consommé. Pour cela, il est nécessaire de définir les courbes de pyrolyse de chaque article.

On trouve ces courbes dans la littérature. De plus, il faut inclure un modèle de combustion qui définit la réaction entre le combustible (généré par la pyrolyse) et l'oxygène pour produire de la chaleur et des produits de combustion (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, suies ...).

3.6.5.1 Débit de pyrolyse et taux de chaleur "HRR"

Le débit massique de pyrolyse ($MLR, [kg/s]$) est le débit de la vapeur combustible libérée à la surface du foyer. Il est possible de l'exprimer en équivalent de chaleur ($HRR, [kW]$) : c'est le taux de chaleur dégagée par la combustion de ces vapeurs. Les deux paramètres sont liés par la relation suivante [8] :

$$HRR = \Delta H_c \times MLR \quad (3.1)$$

Avec ΔH_c chaleur de combustion kJ/kg .

Le HRR varie selon la nature des matériaux, la configuration géométrique, la hauteur du stockage, etc. Le **tableau (3.2)** présente les taux de chaleur des articles combustibles retenus dans cette étude [8].

Tableau 3.2 – Valeurs expérimentales du débit de pyrolyse

Article	HRR maximal [kW]	Pic (temps) [s]	Température d'allumage [°C]
Bouteilles en PE dans des cartons	4810	190	300
Cartons	2470	144	250

Les courbes de pyrolyse (3.5) et (3.6) sont définies dans FDS .

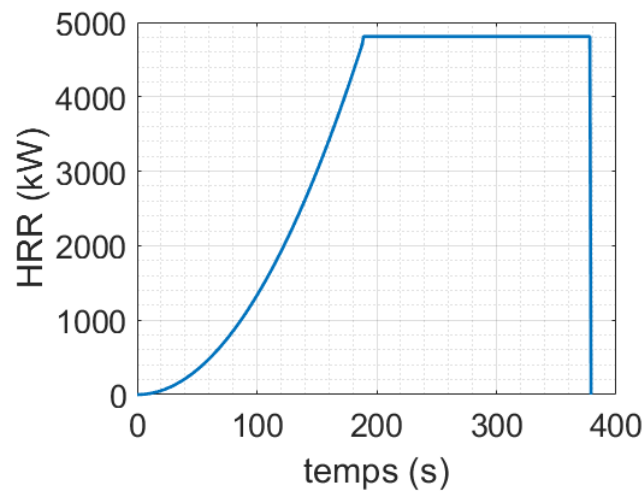


FIGURE 3.5 – Courbe de pyrolyse pour des articles en PE dans des boîtes en carton

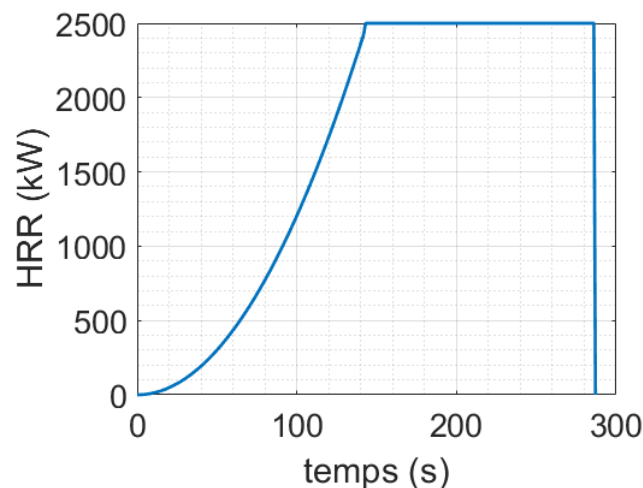
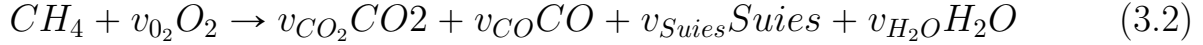


FIGURE 3.6 – Courbe de pyrolyse pour des boîtes en carton

Pour les deux courbes, le HRR croît, atteint un régime permanent ou la pyrolyse est constante puis décroît. Lorsque le foyer est épuisé, la pyrolyse s'arrête.

3.6.5.2 Réaction de combustion en phase gazeuse

On considère la vapeur combustible produite par la pyrolyse comme étant constituée majoritairement de méthane [10] [11]. Ce dernier réagit avec l'oxygène de l'air suivant une réaction de combustion non complète (3.2)



On retrouve dans la littérature les taux de suie et de monoxyde de carbone produits par la combustion de différentes substances (**tableau (3.3)**). Un calcul est réalisé par la suite pour déterminer les coefficients stoechiométriques à partir de ces taux.[8].

Tableau 3.3 – Taux de CO et de suie pour les combustibles retenus

Taux	Carton	Bois	PE	Magasin AC	Magasin RDC
y_{CO}	0.050	0.050	0.026	0.042	0.05
y_{suies}	0.015	0.015	0.102	0.132	0.015

Pour le magasin RDC, le combustible est constitué de bois et de carton dont les fractions sont considérées équivalentes. A cet effet, on prend les taux moyens de monoxyde de carbone et de suies, soit :

$$\begin{cases} y_{CO}^{RDC} = 0.5 \times y_{CO}^{BOIS} + 0.5 \times y_{CO}^{CARTON} = 0.05 \\ y_{suies}^{RDC} = 0.5 \times y_{suies}^{BOIS} + 0.5 \times y_{suies}^{CARTON} = 0.015 \end{cases} \quad (3.3)$$

Pour le magasin AC, le combustible est constitué de fractions égales de polyéthylène, bois et carton. On prend donc la moyenne des taux de ces trois constituants.

Calcul des coefficients stoechiométriques - Magasin AC

On considère les taux de suies et de monoxyde de carbone respectifs de **0.132** et **0.042**. La conservation des atomes, en supposant que les suies sont composés de 90 % de carbone et de 10 % d'hydrogène [8], donne :

$$\begin{cases} x_C = v_{CO_2} + v_{CO} + v_{suies} \times 0.9 \\ y_H = 0.1 \times v_{suies} + 2v_{H_2O} \\ z_O + 2v_{O_2} = 2v_{CO_2} + v_{CO} + v_{H_2O} \end{cases} \quad (3.4)$$

$x, y,$ et z représentent respectivement le nombre d'atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Pour le méthane CH_4 , on a $x_C = 1$, $y_H = 4$ et $z_O = 0$.

Les coefficients stoechiométriques v_{CO} et v_{suies} sont obtenus à partir des fractions massiques des suies et du monoxyde de carbone.

on a $y_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_{CH_4}}$, avec $m_{CO} = v_{CO} \times W_{CO}$ et $m_{CH_4} = v_{CH_4} \times W_{CH_4}$. Or $v_{CH_4} = 1$.
 $\Rightarrow y_{CO} = \frac{W_{CO}}{W_{CH_4}} \times v_{CO} \Rightarrow v_{CO} = y_{CO} \times \frac{W_{CH_4}}{W_{CO}}$

De même, $v_{suies} = y_{suies} \times \frac{W_{CH_4}}{W_{suies}}$, avec W_i les masses molaires en g/mol , y_i les fractions massiques et v_i les coefficients stoechiométriques.

$$\begin{cases} W_{CO} = W_C + W_O = 28 \\ W_{CH_4} = W_C + 4W_H = 16 \\ W_{suies} = 0.9 \times W_C + 0.1 \times W_H = 10.9 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow v_{suies} = 0.132 \times \frac{16}{10.9} = 0.194 \text{ et } v_{CO} = 0.024$$

Les coefficients v_{CO_2} , v_{H_2O} et v_{O_2} sont déterminés par la résolution du système (3.4). On réarrange les termes du système :

$$\begin{cases} v_{CO_2} = x_C - v_{CO} - v_{suies} \times 0.9 \\ 2 \times v_{H_2O} = y_H - 0.1 \times v_{suies} \\ 2 \times v_{CO_2} + v_{H_2O} - 2v_{O_2} = -v_{CO} \end{cases} \quad (3.6)$$

On l'écrit sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 2 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{CO_2} \\ v_{H_2O} \\ v_{O_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C - v_{CO} - 0.9v_{suies} \\ y_H - 0.1v_{suies} \\ -v_{CO} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La résolution du système nous donne $v_{CO_2} = 0.8$, $v_{H_2O} = 1.99$ et $v_{O_2} = 1.81$.

L'équation de combustion du méthane pour la simulation du magasin AC (3.8) est définie dans FDS .



Calcul des coefficients stoechiométriques - Magasin RDC

On considère les taux de suies et de monoxyde de carbone respectifs de **0.015** et **0.05**. En appliquant le même calcul que précédemment, on retrouve l'équation de combustion du méthane pour la simulation du magasin RDC (3.9).



3.6.5.3 Position du foyer initial (départ de feu)

Le foyer initial de l'incendie est l'élément qui brûle en premier, provoquant un début d'incendie s'il n'est pas rapidement éteint. Le départ de feu peut avoir

lieu à différents endroits dans le magasin. Il peut être positionné de sorte à ce que la contrainte thermique appliquée à des éléments structurels adjacents soit maximale, ou bien favoriser une propagation rapide de l'incendie (en le plaçant au centre par exemple), ou alors de manière à gêner l'évacuation du personnel (à proximité des voies d'évacuation) [12].

Afin de satisfaire les 3 critères à la fois et ainsi choisir le scénario le plus contraignant, le départ de feu aura lieu au centre du magasin, au pied d'un poteau sur l'étagère la plus basse (la distance verticale vis à vis de la tête de sprinkleur est plus grande), **figures (3.7) et (3.8)**.

On place la source d'inflammation à la position désignée. Elle est définie comme un point matériel (désigné dans FDS comme une particule) qui génère de la chaleur et provoque le départ de feu au niveau du bac adjacent. La particule chauffe à une température de 1000°C pendant 5sec [13].

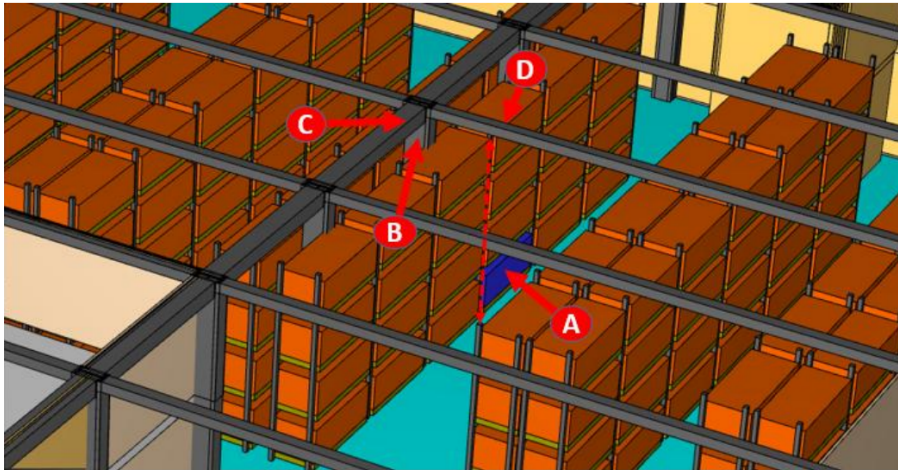


FIGURE 3.7 – *Positionnement du départ de feu dans le magasin RDC. A : foyer initial. B : poteau. C,D : poutres*

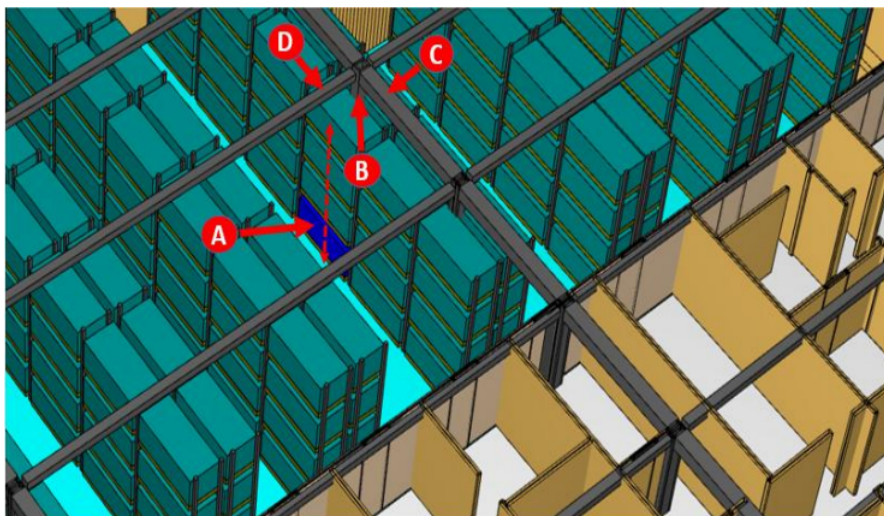


FIGURE 3.8 – *Positionnement du départ de feu dans le magasin A/C. A : foyer initial. B : poteau. C,D : poutres*

3.6.6 Critères de tenabilité

La définition des critères de tenabilité permet le choix des plans de mesures implantés dans les magasins. Nous avons retenu les trois critères suivants :

1. Visibilité : La distance de visibilité à partir d'un point particulier est calculée par FDS grâce à un algorithme embarqué. La valeur seuil retenue est de 10m (de l'échelle de visibilité) en dessous de laquelle la fumée est considérée comme opaque [14].
2. Effets thermiques :
 - La température à hauteur d'homme ne doit pas dépasser les $60^{\circ}C$, seuil à partir duquel les tissus pulmonaires risquent d'être endommagés [15]. Pour des agents d'intervention équipés d'appareils respiratoires individuels (ARI), ce seuil est relevé à $100^{\circ}C$ [12].
 - Le flux thermique radiatif ne doit pas dépasser $2kW/m^2$ pour le personnel [16] et $5kW/m^2$ pour les agents d'intervention équipés d'ARI [7].
3. Toxicité des fumées : On retient comme critère la concentration volumique du Monoxyde de Carbone (CO) avec comme valeur seuil $220ppm$. [12]

Ainsi le temps disponible pour l'évacuation est le temps pendant lequel ces critères se maintiennent en dessous des seuils définis.

Remarques

- Les mesures sont effectuées à hauteur d'homme ($1.75m$ du sol).
- Les seuils fixés ci-dessus ne prennent pas en compte le temps d'exposition. En effet, il ne s'agit pas d'évaluer la gravité des lésions / blessures. Ici, il s'agit seulement de déterminer l'instant à partir duquel la survie des personnes est remise en cause.
- L'un des aspects les plus redoutés lors d'un incendie, en raison des ses conséquences potentiellement désastreuses est l'embrassement généralisé éclair. En effet, l'incendie peut évoluer de 3 façons : (1) Étouffement par manque d'oxygène, (2) Extinction par épuisement de combustible, (3) Si la ventilation est suffisante et le combustible est en abondance, le feu peut évoluer vers un embrassement généralisé dont la survenue constitue une menace sérieuse pour la vie des équipes d'interventions à cause de l'intensité du flux thermiques libéré. La figure (3.9) montre les différentes évolutions d'un feu.

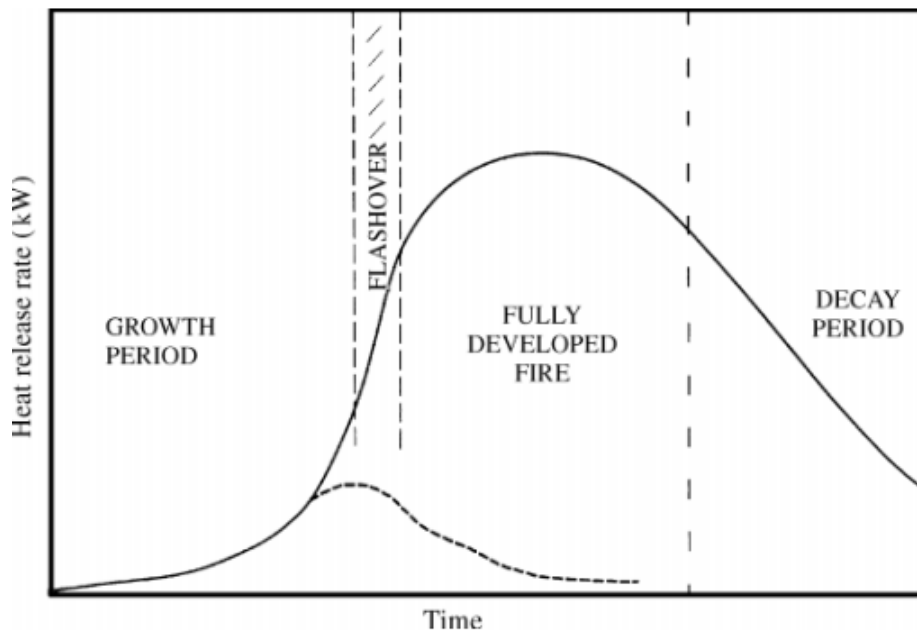


FIGURE 3.9 – Évolution d'un feu exprimé en taux de dégagement de chaleur en fonction du temps. La courbe en pointillés représente une extinction pouvant survenir par étouffement ou épuisement de combustible [17]

Concrètement, le flashover est défini comme le passage d'un feu localisé vers une conflagration généralisée dans le compartiment. Ce n'est pas le feu qui se propage, mais l'air chargé de combustible qui s'embrase brusquement. Il n'est pas possible de déterminer à l'avance le moment exact où le flashover va survenir, mais il existe des signes annonciateurs rapportés dans la littérature [17]. Un début de flashover peut être établi par différents critères : (1) Un flux thermique au sol supérieur à $20\text{kW}/\text{m}^2$ [18], (2) La température des couches supérieures de fumées (sous le toit) dépassant les 600°C .

Si l'apport en air frais cesse, l'embrasement ne peut plus être entretenu et l'incendie est étouffé. Mais un backdraft (explosion de fumées) peut survenir en cas d'apport d'air soudain (ouverture d'une porte, démarrage intempestif du système de ventilation, vitre brisée).

3.6.7 Définition des plans de mesure

Plusieurs plans de mesures suivant les directions verticale et horizontale du domaine ont été définis afin de mesurer l'évolution des différents paramètres du feu. Les mesures critiques sont présentées dans le **tableau (3.4)**.

Tableau 3.4 – Mesure des paramètres critiques à 1.75m du sol

Type	Qte mesurée	Unité	Nombre
Capteur	Concentration volumique de CO	<i>ppm</i>	Magasin AC : 61 Magasin RDC : 65
Capteur	Température	$^{\circ}C$	Magasin AC : 61 Magasin RDC : 65
Capteur	Flux de chaleur	kW/m^2	Magasin AC : 61 Magasin RDC : 65
Capteur	Concentration volumique de CO ₂	<i>ppm</i>	Magasin AC : 61 Magasin RDC : 65
Coupe 2D horizontale	concentration volumique de CO	<i>ppm</i>	Magasin AC : 1 Magasin RDC : 1
Coupe 2D horizontale	Température	$^{\circ}C$	Magasin AC : 1 Magasin RDC : 1
Coupe 2D horizontale	Flux de chaleur	kW/m^2	Magasin AC : 1 Magasin RDC : 1
Coupe 2D horizontale	Concentration volumique de CO ₂	<i>ppm</i>	Magasin AC : 1 Magasin RDC : 1
Coupe 2D verticale	Température	$^{\circ}C$	Magasin AC : 9 Magasin RDC : 28

Des détecteurs de chaleur et de fumées sont placés côte à côte sous le plafond. Les détecteurs de chaleur sont calibrés à $68^{\circ}C$ et permettent de simuler la réaction des têtes de sprinkleurs en place dans les magasins et d'estimer leur temps de déclenchement. Les détecteurs optiques de fumées servent de témoins et permettent de comparer la rapidité des deux modes de détection (fumées et chaleur), **tableau (3.5)**.

Tableau 3.5 – Mesure des conditions 30cm sous le plafond

Type	Qte mesurée	Nombre
Capteur	Détecteur de chaleur	Magasin AC : 70 Magasin RDC : 54
Capteur	Détecteur de fumées photo-électrique	Magasin AC : 70 Magasin RDC : 54

Des coupes 3D ont été définies afin de visualiser la distribution volumique de la température et des concentrations de CO et CO_2 ainsi que l'envahissement du local par les fumées. La puissance thermique incidente est mesurée pour chaque poutre et poteau et servira d'entrée à l'analyse thermique de la structure (**Chapitre 4**). Le calcul est réalisé par FDS qui enregistre les résultats dans des fichiers pour une exploitation ultérieure, **équation 3.10**.

$$P_{in} = \int q''_{net} dA \quad (3.10)$$

$$q''_{net} = \epsilon_s(q''_{rad} - \sigma T_s^4) + h(T_{gaz} - T_s) \quad (3.11)$$

Avec ϵ_s l'émissivité, h le coefficient de transfert convectif, T_{gaz} la température des gaz chauds et T_s la température à la surface de la poutre/poteau.

3.6.8 Définition du maillage

L'un des paramètres numériques les plus importants dans FDS est la taille des cellules du maillage car l'erreur associée à la discrétisation des dérivées partielles en dépend. En théorie, la réduction de la taille des cellules de la grille d'un facteur de 2 réduit l'erreur de discrétisation d'un facteur de 4 mais cela augmente le temps de calcul d'un facteur de 16 [5].

Une étude de sensibilité au maillage a donc été effectuée afin de déterminer la taille optimale de la cellule. On teste un maillage relativement grossier (faible résolution), puis on l'affine progressivement jusqu'à l'absence de différences appréciables dans les résultats (l'amélioration de la qualité des résultats est dépassée par l'augmentation du coût du calcul).

La résolution du maillage à proximité du feu est exprimée par le nombre adimensionnel $D^*/\delta x$ où D^* est le diamètre caractéristique du feu et δx la taille nominale d'une cellule. D^* est définie comme [6]

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{air} c_p T_{air} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3.12)$$

Avec \dot{Q} [kW] le taux de chaleur, ρ_{air} la masse volumique de l'air ambiant ($1.204 kg/m^3$), c_p la capacité calorifique de l'air ambiant ($1.005 kJ/kg.K$), T_{air} la température ambiante ($293K$) et g l'accélération de la gravité ($9.81 m/s$).

Une résolution de maillage comprise entre 4 et 16 est recommandée dans la littérature [11].

Des tests ont été effectués en variant la résolution de la grille. La qualité

des résultats est évaluée en comparant les courbes du taux de chaleur "HRR" obtenues par FDS aux courbes expérimentale, **figures (3.5), (3.6)**.

Pour les bacs en carton (Magasin RDC), le taux de chaleur maximal est de $2470kW$. D'après l'équation (3.12), $D^* = 1.3 m$. Le **tableau (3.6)** présente les résolutions testées.

Tableau 3.6 – Variation de la résolution du maillage

Résolution $D^*/\delta x$	Taille nominale δx [cm]
5 (maillage grossier)	25
10	13
12	11
16 (maillage affiné)	8

La cellule est de dimension uniforme ($\delta x = \delta y = \delta z$) et le flux de chaleur diffuse de manière égale dans toutes les directions. Les résultats des tests sont résumés dans la **figure(3.10)**.

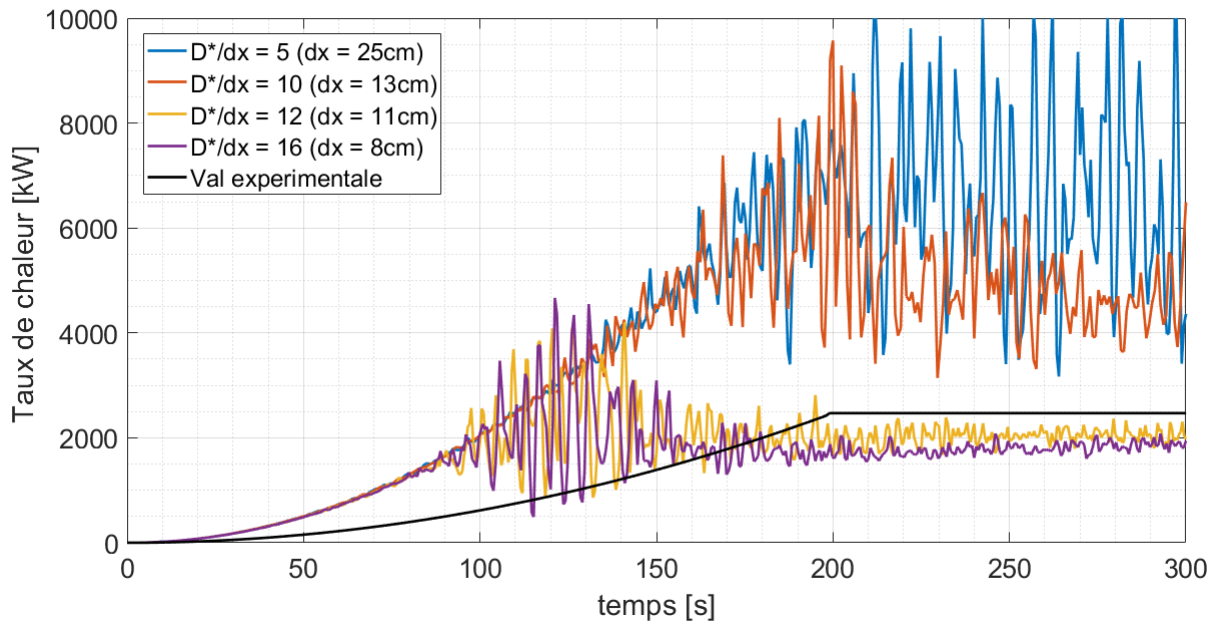


FIGURE 3.10 – Comparaison des taux de chaleurs pour des maillages de différentes résolutions

Les courbes de taux de chaleur pour les maillages de faible résolution ($D^*/\delta x$ de 5 et de 10) divergent fortement par rapport à la courbe expérimentale (référence), en plus d'être instables lorsque la pyrolyse passe au régime permanent (à partir de $t > 200s$). Les maillages de résolution égale à 12 et 16 présentent des résultats de meilleure qualité et le taux de chaleur suit bien la référence. Cependant, on ne note pas d'amélioration sensible en augmentant la résolution de 12

à 16 malgré un temps de calcul plus important. On retient donc une résolution $D^*/\delta x = 12$ pour la construction du maillage du magasin RDC (soit une taille nominal $\delta x = 11cm$).

Pour les bacs d'articles en plastique dans des cartons (Magasin AC), le taux de chaleur maximal est de $4810kW$. D'après l'équation (3.12), $D^* = 1.8 m$. Le **tableau (3.7)** présente les résolutions testées.

Tableau 3.7 – Variation de la résolution du maillage

Résolution $D^*/\delta x$	Taille nominale δx [cm]
5 (maillage grossier)	36
10	18
12	15
16 (maillage affiné)	11

Les résultats des tests sont résumés dans la **figure(3.11)**. Les maillages de résolution 12 et 16 donnent des résultats de meilleur qualité et leur courbes sont presque superposées. On retient donc une résolution $D^*/\delta x = 12$ pour la construction du maillage du magasin AC (soit une taille nominal $\delta x = 15cm$).

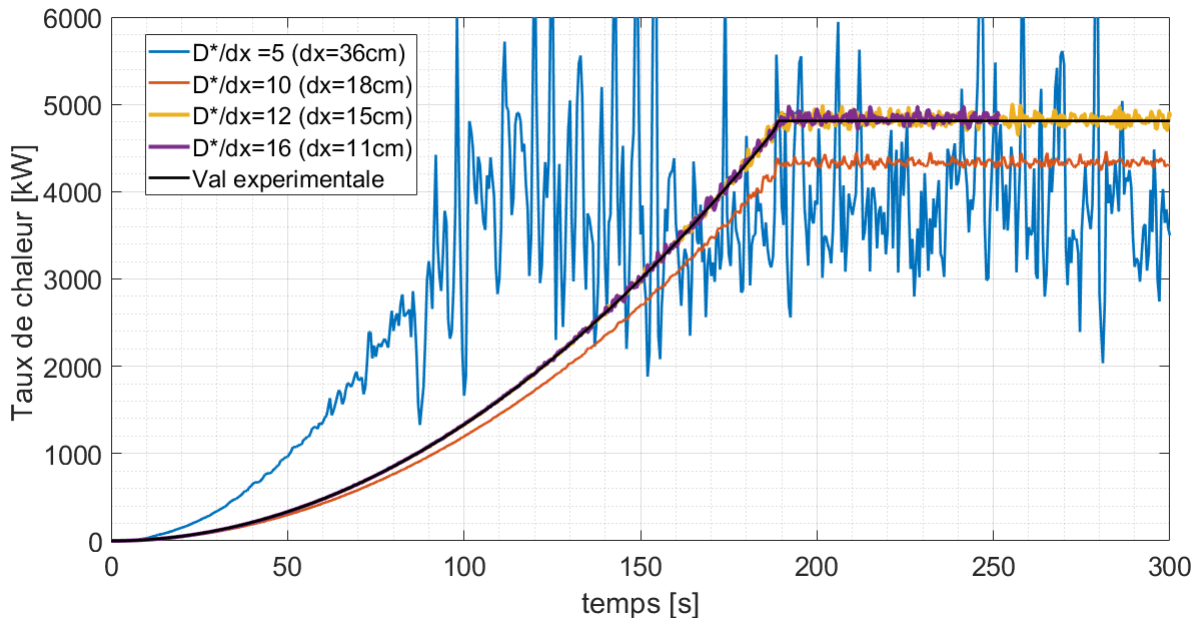


FIGURE 3.11 – *Comparaison des taux de chaleurs pour des maillages de différentes résolutions*

Ainsi, les deux domaines sont définis par un maillage unique constitué de cellules de taille uniforme (11cm pour le magasin RDC et 15cm pour le magasin AC). Les deux maillages ont les mêmes dimensions ($52m \times 35m \times 6m$).

3.6.8.1 Durée de la simulation et pas de temps

La durée de la simulation est fixée à 30 mn, le temps estimé d'arrivée des unités d'intervention de la protection civile pour le cas le plus défavorable.

Le pas de temps δt est variable. Il est ajusté automatiquement par FDS afin de vérifier la condition de stabilité de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)(3.13) [4] :

$$CFL = \delta t \frac{\|U\|}{\Delta} < 1 \quad (3.13)$$

U (m/s) : la vitesse d'advection des particules, $U = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ et Δ taille nominale d'une cellule du maillage.

3.6.8.2 Exécution sur une machine de calcul haute performance

Les deux simulations ont été exécutées à distance sur le cloud, sur une machine de calcul haute performance Amazon Elastic Cloud fournie par l'entreprise de services informatiques Amazon [19]. **La durée d'exécution a été de 21 h pour le magasin RDC et 18h pour le magasin AC.**



FIGURE 3.12 – Logo du service Elastic Cloud

Les caractéristiques de la machine sont :

Désignation : c5.xlarge. CPU : Intel Xeon Platinum 8000. Nombre d'unités de calculs : 4. Fréquence d'horloge : 3.4 GHz. Mémoire vive : 8 Go.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle considéré pour la simulation de l'incendie. Dans un premier temps, nous avons conçu la maquette 3D des magasins à partir des plans fournis par EL KENDI et nous y avons introduit les matériaux et les surfaces correspondants. Nous avons également défini les éléments combustibles, leurs caractéristiques et l'équation de combustion dans le code FDS. Aussi, nous avons défini des plans de mesures permettant de suivre l'évolution des différents paramètres critiques au cours du temps.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes efforcés d'optimiser le domaine de calcul des simulations FDS par une étude de sensibilité au maillage.

Les deux simulations ont été exécutées à distance sur le cloud, sur une machine de calcul haute performance. Afin de d'évaluer les effets des incendies sur les personnes et les structure, nous procéderons à l'interprétation des résultats obtenus des ces simulations dans le **Chapitre 4** .

Chapitre 4

Étude des effets de l'incendie

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations introduites dans le **Chapitre 3**.

Les effets de l'incendie seront évalués et comparés avec les seuils de tenabilité. Ainsi, nous pourrions déterminer le moment à partir duquel la survie des personnes dans le milieu n'est plus possible et le comparer avec le temps nécessaire pour l'évacuation. Ce dernier sera déterminée à l'aide du logiciel de simulation Pathfinder. Enfin, nous procéderons à l'étude des effets de l'incendie sur la structure des magasins par le logiciel Solidworks.

4.2 Résultats des simulations FDS

4.2.1 Magasin RDC

L'incendie se déclenche sur un bac situé au centre du magasin, en bas d'un rack de stockage, à $t = 0$. Puis, il se propage aux bacs voisins par transfert de chaleur. Les bacs sont constitués d'une palette en bois sur laquelle des cartons sont empilés. Le taux de chaleur développé par la combustion d'un seul bac atteint son seuil maximum de $2470kW$ au bout de $144s$. La puissance totale de l'incendie est la somme des puissances de tout les bacs ayant brûlés. Un maillage unique recouvrant tout le volume du magasin RDC est considéré. La taille de la cellule est fixée à $11cm$ suivant les trois directions. La durée simulée est de $30mn$ à partir du départ de feu. Le système d'extinction automatique est supposé inactif ce qui permet à l'incendie de se développer rapidement.

4.2.1.1 Puissance développée

La **figure(4.1)** illustre l'évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse dans tout le magasin.

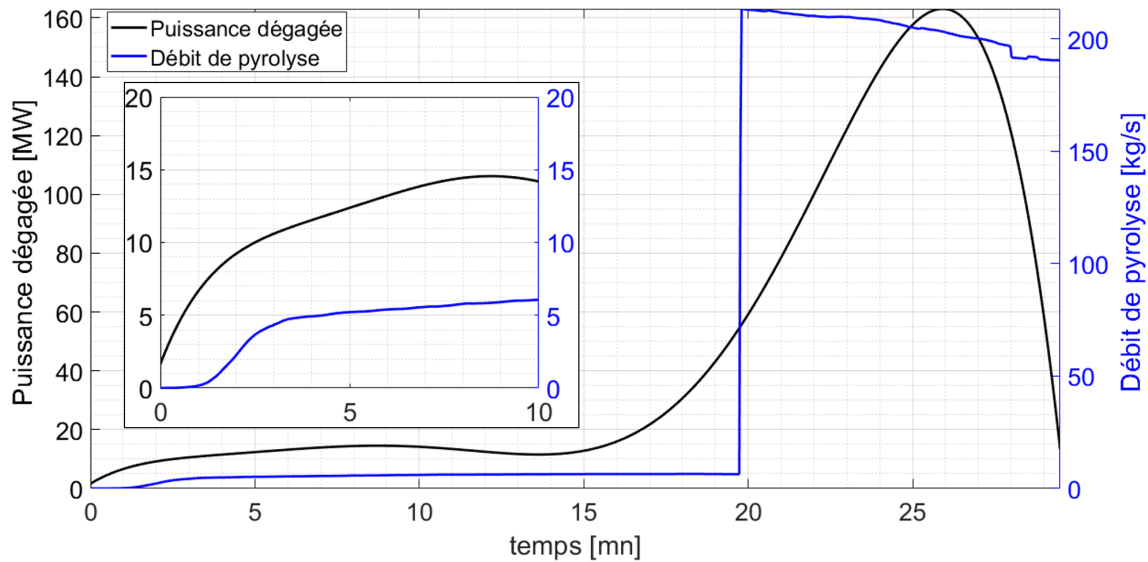


FIGURE 4.1 – Évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse -
Magasin RDC

La courbe de puissance suggère l'occurrence d'un flashover à $t > 20mn$. La puissance maximale de $160MW$ est atteinte après $26mn$. Juste après ce pic, elle décroît progressivement. Cette décroissance peut être due soit à un manque d'oxygène dans le compartiment soit à un épuisement du combustible. Cependant, l'évolution du débit de pyrolyse justifie la première interprétation. En effet, la courbe de pyrolyse suit la même évolution que la courbe de puissance, mais à la 26e minute, alors que la puissance commence à décroître, le débit de pyrolyse se maintient (le combustible est donc toujours produit en quantité). L'étouffement de l'incendie peut s'expliquer par l'occupation du domaine par de la fumée qui vient remplacer l'oxygène, l'obturation des amenées d'air mais aussi une hausse de la pression dans le compartiment qui provoque un écoulement vers l'extérieur.

La puissance développée dans cette simulation est comparée à la puissance obtenue par Drysdale à travers le modèle "T-square fire" ($P_{drysdale} = \alpha \times t^2$) [17]. Le coefficient α est présenté dans le **tableau (4.1)**. Les régimes de croissance rapide et très rapide sont considérés, **figure(4.2)**.

Tableau 4.1 – Coefficients correspondant à différents régimes de croissance

Régime de croissance	α
Lente	0.00293
Moyenne	0.001172
Rapide	0.0469
Très rapide	0.1876

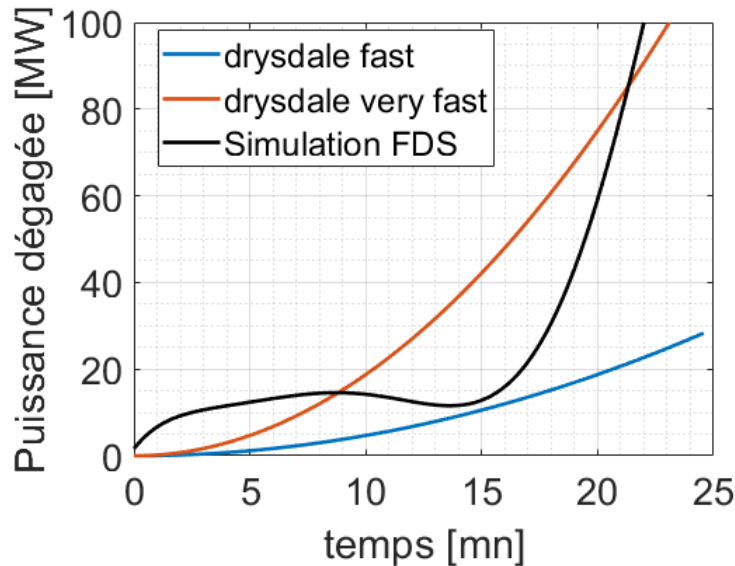


FIGURE 4.2 – Comparaison entre l'évolution de la puissance théorique et celle obtenue par FDS

La puissance obtenue se situe globalement entre les résultats définis pour les régimes rapide et très rapide dans la plage de temps [8 – 23mn]. On en déduit que l'incendie simulé obéit à une évolution en régime de croissance rapide. **Cette croissance rapide est due en premier lieu au confinement dans le magasin et l'absence de voies d'évacuation pour les fumées.**

Afin d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur de la puissance dégagée, on se réfère à des simulations d'incendies effectuées sur FDS par le "Centre de recherche technique de Finland" (VTT) [20]. Une de ces simulations (**figure(4.3)**) a porté sur un rack de matière cellulosique (papier, cartons) dont les propriétés sont proches du combustible considéré dans le magasin RDC, **tableau(4.2)**. Le taux de chaleur (HRR) est rapporté à la surface exposée du bac :

$$HRRPUA = \frac{HRR[kW]}{\text{Surface exposée}[m^2]} = \frac{2470}{12.4} = 200[kW/m^2] \quad (4.1)$$

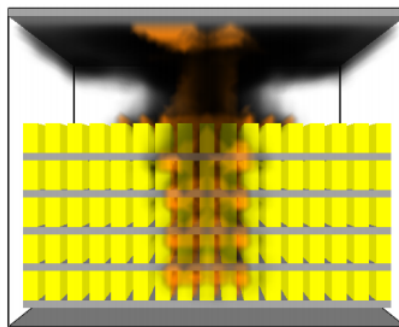


FIGURE 4.3 – Simulation réalisée par le VTT [20]

Tableau 4.2 – Comparaison des propriétés du combustible pour les deux simulations

Propriétés	Simulation réalisée	Simulation de VTT [20]
Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	1.45	1.5
Conductivité (W/m.K)	0.3	0.2
Chaleur de combustion (kJ/kg)	14.2	20
Taux de chaleur par unité de surface HRRPUA (kW/m ²)	200	300
Taille nominale du maillage (cm)	11	10

La puissance dégagée après 10 minutes dans la simulation réalisée par le VTT est d'environ 10MW **figure(4.4)**, alors que celle obtenue dans notre cas est de 14MW. Les ordres de grandeur sont donc similaires. L'écart s'explique par la configuration géométrique et la ventilation qui diffèrent dans les deux travaux.

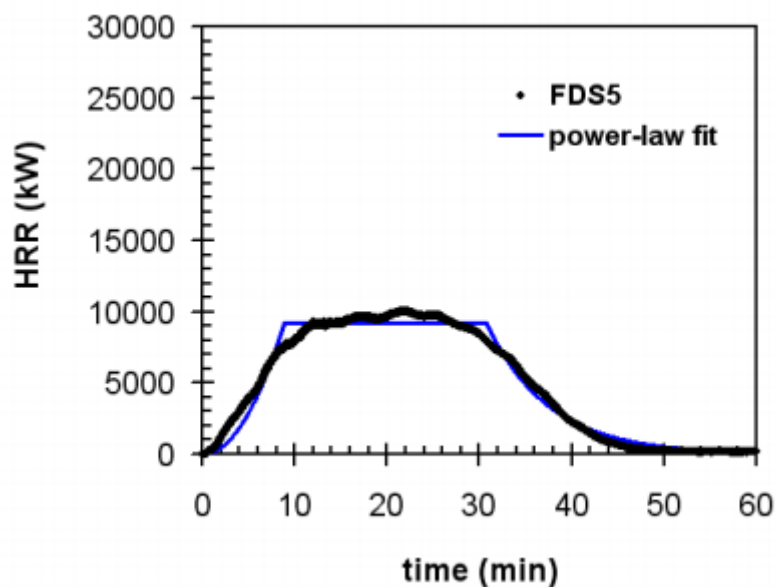


FIGURE 4.4 – Puissance dégagée - Simulation du VTT [20]

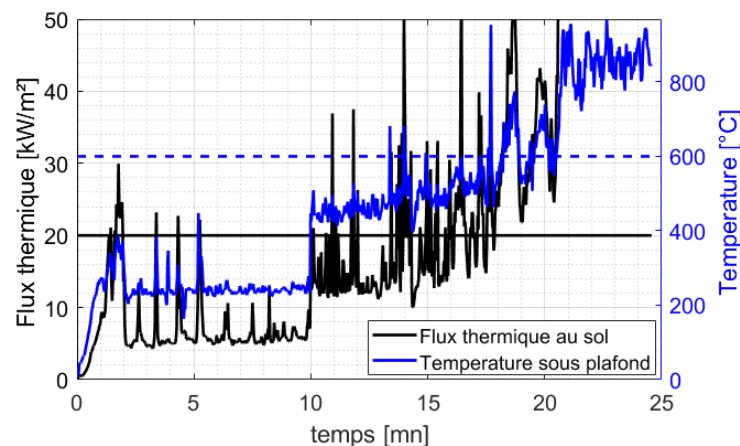
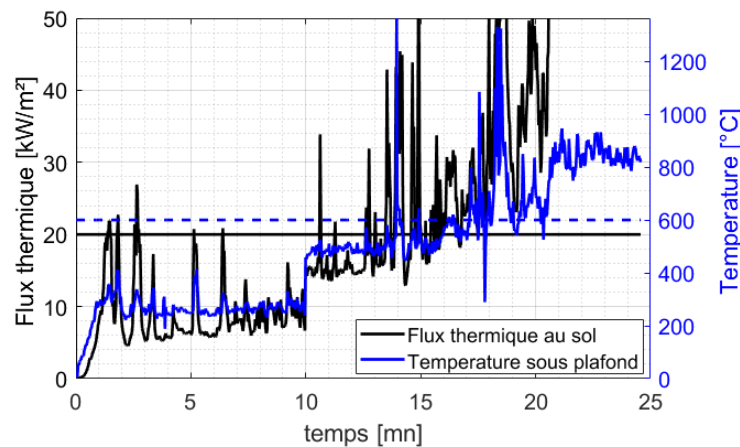
Le **tableau (4.3)** donne quelques valeurs caractéristiques de puissance dégagée ou générée par diverses sources [21].

Tableau 4.3 – Puissance générée par diverses sources

Source	Puissance générée
Une cigarette qui brule	5W
Ampoule à bulbe	60W
Un être humain en exercice	100W
Corbeille à papier en feu	100kW
Nappe de gasoil (1m ²)	2.5MW
Palettes en bois empilées sur 3m	7MW
Une camionnette	10 – 15MW
Réacteur nucléaire	1GW

4.2.1.2 Occurrence d'un flashover/backdraft

Afin de déterminer s'il y a occurrence d'un flashover ou d'un backdraft, on a analysé les relevés de température des gaz chauds sous le plafond et du flux thermique au sol obtenus par FDS en 3 points au voisinage de la source de l'incendie (**figure 4.5**). Pour rappel, il y a possibilité de flashover si la température des couches supérieures des gaz chauds dépasse les 600°C et si le flux thermique au sol dépasse les 20kW/m².



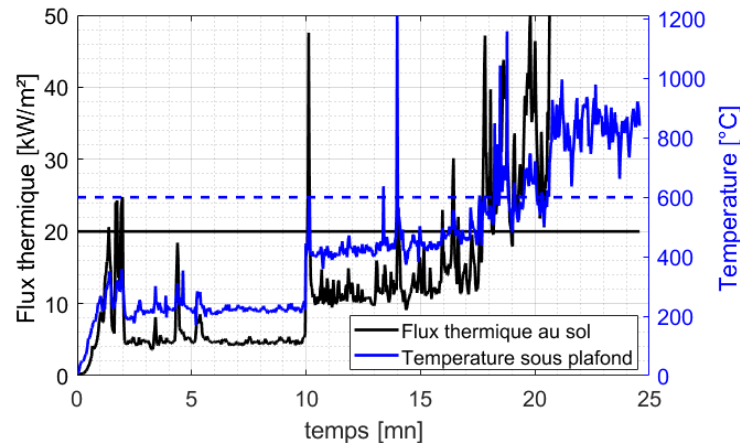


FIGURE 4.5 – Évolution des paramètres critiques d'un flashover - Magasin RDC

Les résultats dans la **figure(4.5)** montrent bien qu'il y a dépassement des seuils pour les deux paramètres entre $t = 15mn$ et $t = 19mn$. Ceci correspond au pic de puissance obtenu par FDS. La probabilité d'occurrence d'un flashover est ainsi confirmée.

Suite au flashover, le compartiment devient sous-ventilé (car l'oxygène disponible est consommé) mais reste surchargé en gaz combustibles imbrûlés (issus de la pyrolyse qui se poursuit), il y a donc un fort risque de **backdraft** (explosion de fumée) en cas d'apport d'air soudain (ouverture d'une porte, vitre brisée...). En l'absence d'un système de désenfumage efficace, la vie du personnel et des agents d'intervention est mise en danger.

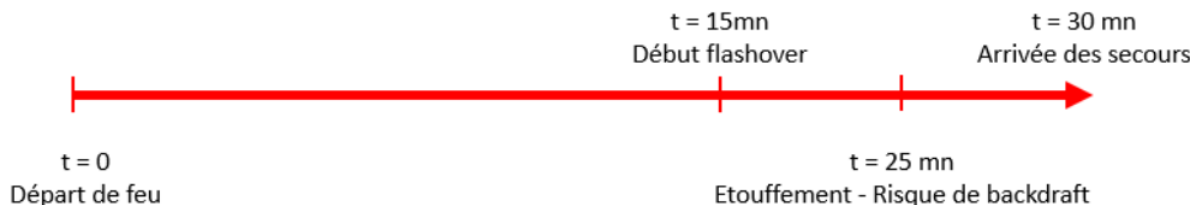


FIGURE 4.6 – Chronologie de l'incendie - Magasin RDC

Au vu de la dynamique de l'incendie, toute intervention locale doit avoir lieu au plus tard 300s après le départ de feu afin de le contenir, d'où l'importance d'un système d'extinction automatique parfaitement opérationnel.

4.2.1.3 Critères de tenabilité

L'évolution des fumées dans le local est illustrée sur la **figure (4.7)**. En l'absence de système de désenfumage, elles se propagent rapidement, pour atteindre une emprise générale au bout de **10 mn**.

Aussi, un détecteur optique de fumées est placé dans la cage d'escaliers principale pour déceler l'enfumage des escaliers correspondant à une obscuration de 25%. On constate un début d'infiltration après 10mn, puis une bonne emprise

au bout de 20mn, **figure(4.8)**. L'enfumage de la cage d'escaliers est redouté car cela peut gêner l'évacuation du personnel ainsi que les opérations de recherche et d'intervention.

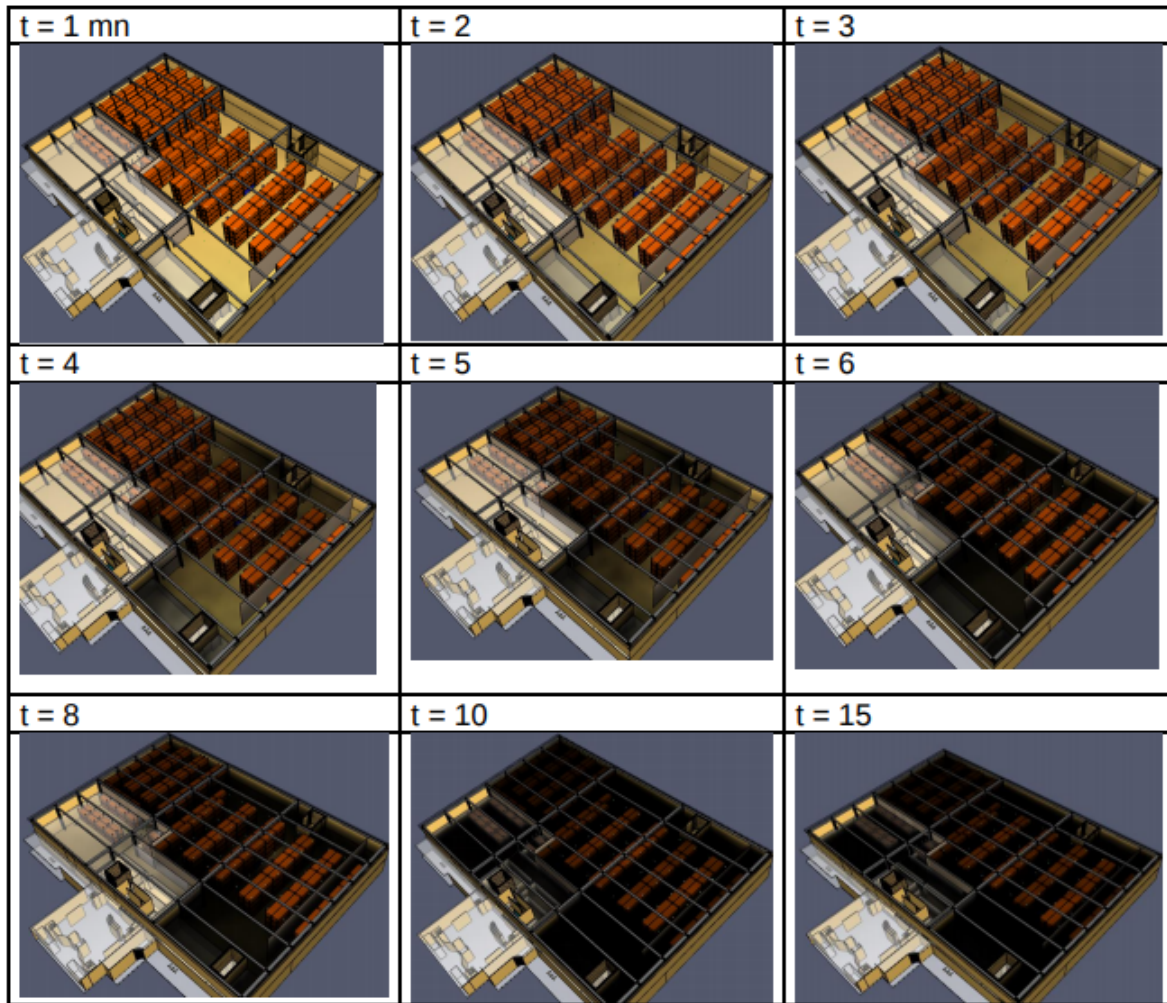


FIGURE 4.7 – Évolution de l'emprise des fumées dans le magasin RDC

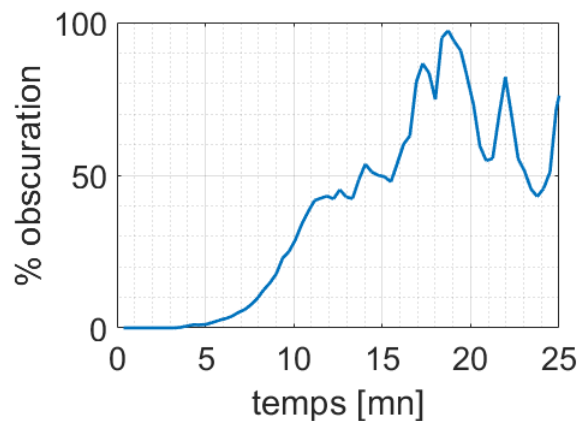


FIGURE 4.8 – Enfumage des escaliers - Magasin RDC

A Visibilité

La visibilité est évaluée en distance (m). L'échelle s'étend de 0 (visibilité nulle, en noir) à 30 m (parfaite, en rouge). La **figure (4.9)** illustre l'évolution de

la visibilité à hauteur d'homme au cours du temps. Pour rappel, le seuil minimal retenu est de 10 m. On dispose d'un temps de **8 mn** avant que la visibilité passe sous ce seuil dans la plus grande partie du magasin.

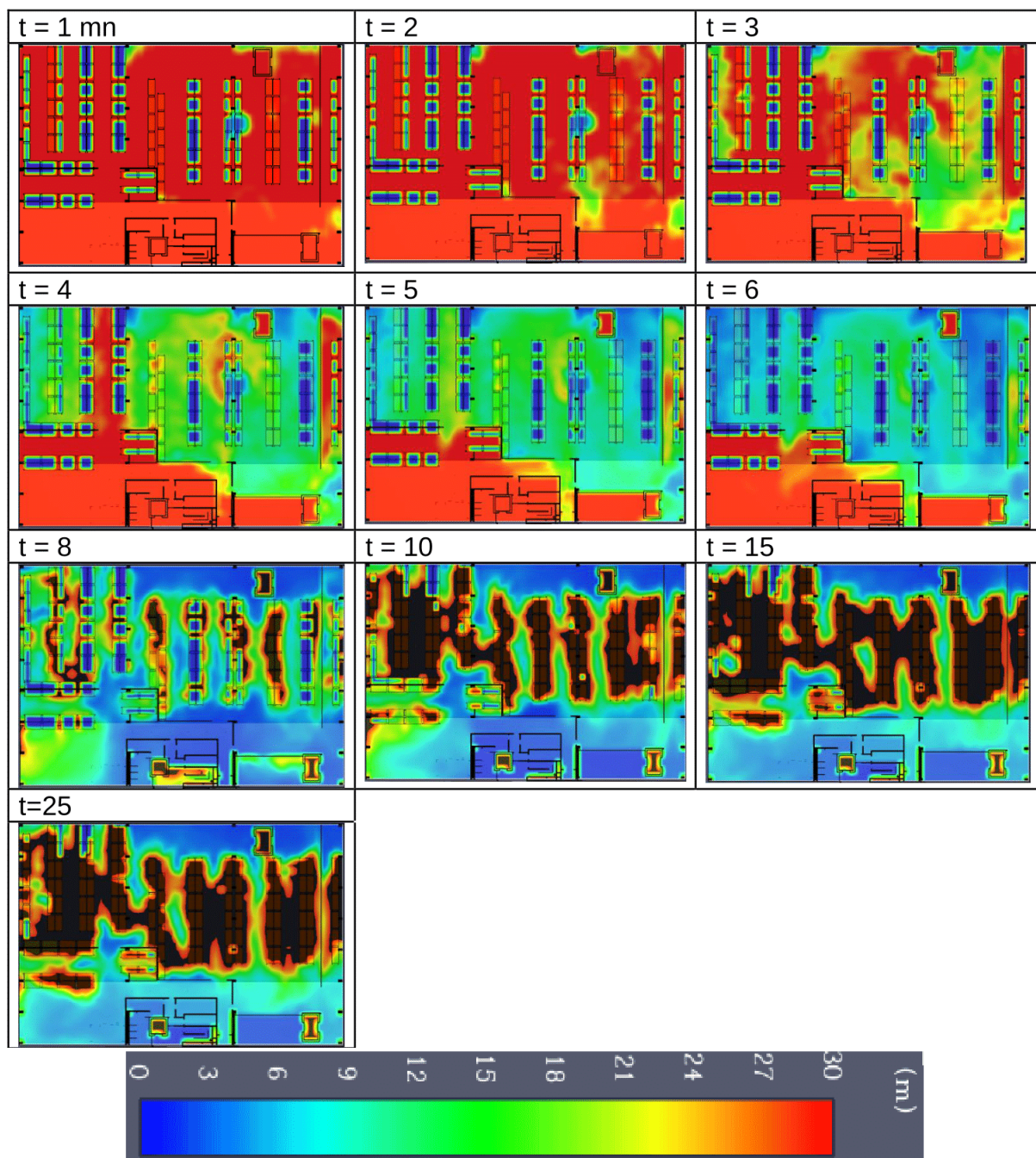


FIGURE 4.9 – Évolution de la visibilité à hauteur d'homme - Magasin RDC

B Effets thermiques

1. Température :

La **figure (4.10)** illustre l'évolution du champ de température à hauteur d'homme (1.75m). Pour rappel, le seuil de tenabilité est de 60°C pour les usagers et 100°C pour les agents équipés d'ARI. La **figure(4.12)** illustre l'évolution de la température à hauteur d'homme, à des emplacement jugés critiques :

(A,B et C) : Accès vers le bâtiment adjacent - F : sortie de secours - G : Porte principale (sortie) - E,D : passage pour évacuation, **figure(4.11)**. Les résultats montrent que les seuils de température sont dépassés dès la **7ème mn** pour le personnel et à partir de la **9ème mn** pour les agents d'intervention équipés d'ARI (appareils respiratoires individuels).

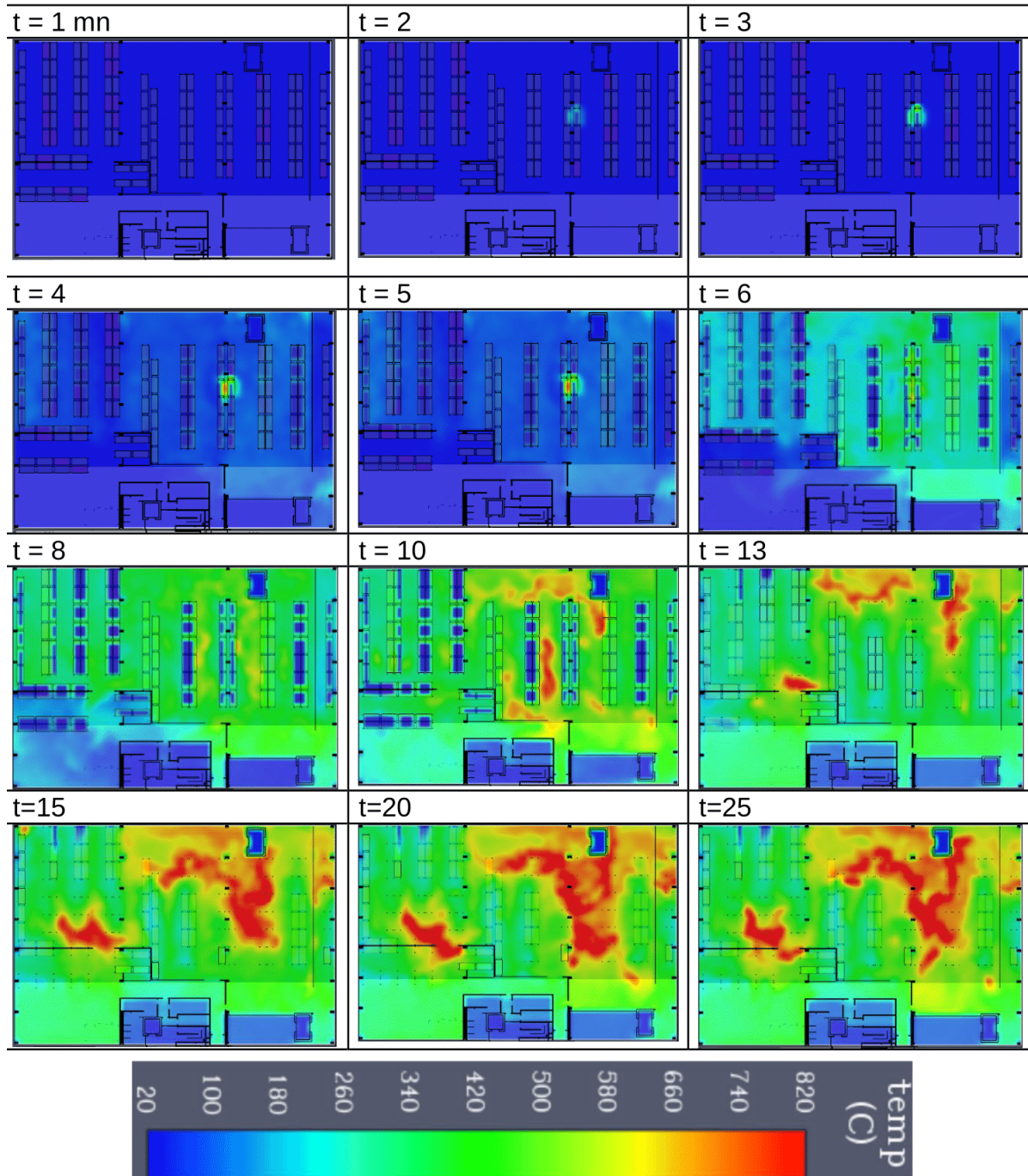


FIGURE 4.10 – Évolution de la température à hauteur d'homme -Magasin RDC

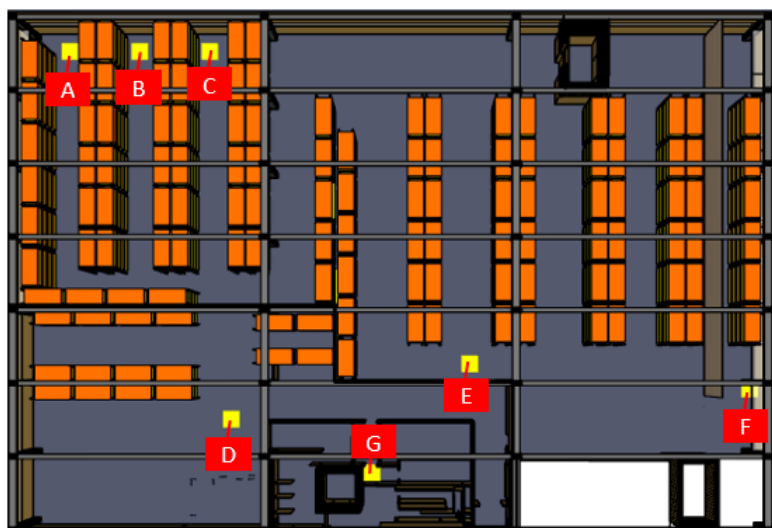


FIGURE 4.11 – Localisation des points critiques de relevés de température

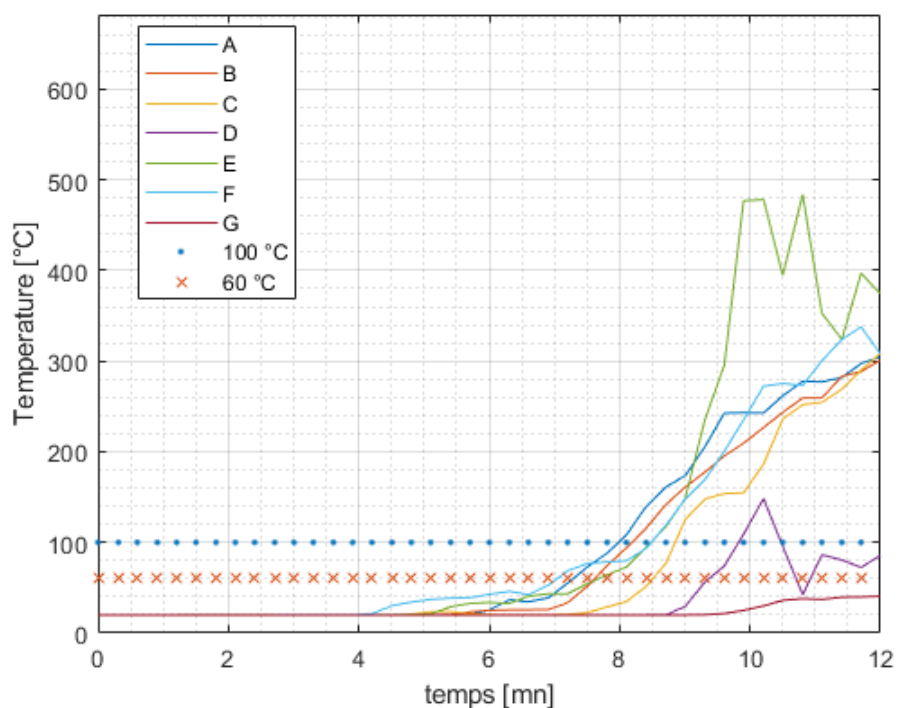


FIGURE 4.12 – Évolution de la température aux points critiques - Magasin RDC

2. Flux thermique :

La **figure (4.14)** illustre l'évolution du flux net dans le magasin RDC. On remarque un début d'extinction de l'incendie aux environs de $t = 25mn$. La **figure(4.13)** présente les relevés effectués à hauteur d'homme en différents points clés (voir la **figure(4.11)**).

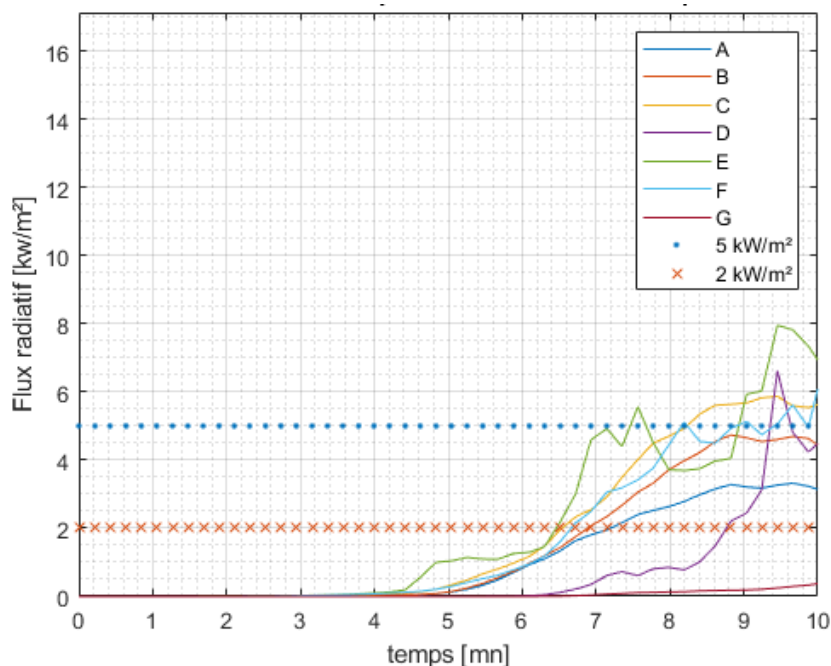


FIGURE 4.13 – Évolution de la température aux points clés - Magasin RDC

Si on ne tient pas compte du voisinage du feu qui enregistre des valeurs élevées dès le départ, le flux thermique reste sous le seuil acceptable de $2\text{kW}/\text{m}^2$ jusqu'à la **7ème mn**. Pour les agents d'intervention, le seuil de $5\text{kW}/\text{m}^2$ est dépassé après **10 mn**. Il est à noter que la **figure (4.14)** représente le flux net incident (radiatif + convectif) tandis que la **figure(4.13)** n'illustre que le flux radiatif, ainsi les valeurs sont légèrement différentes.

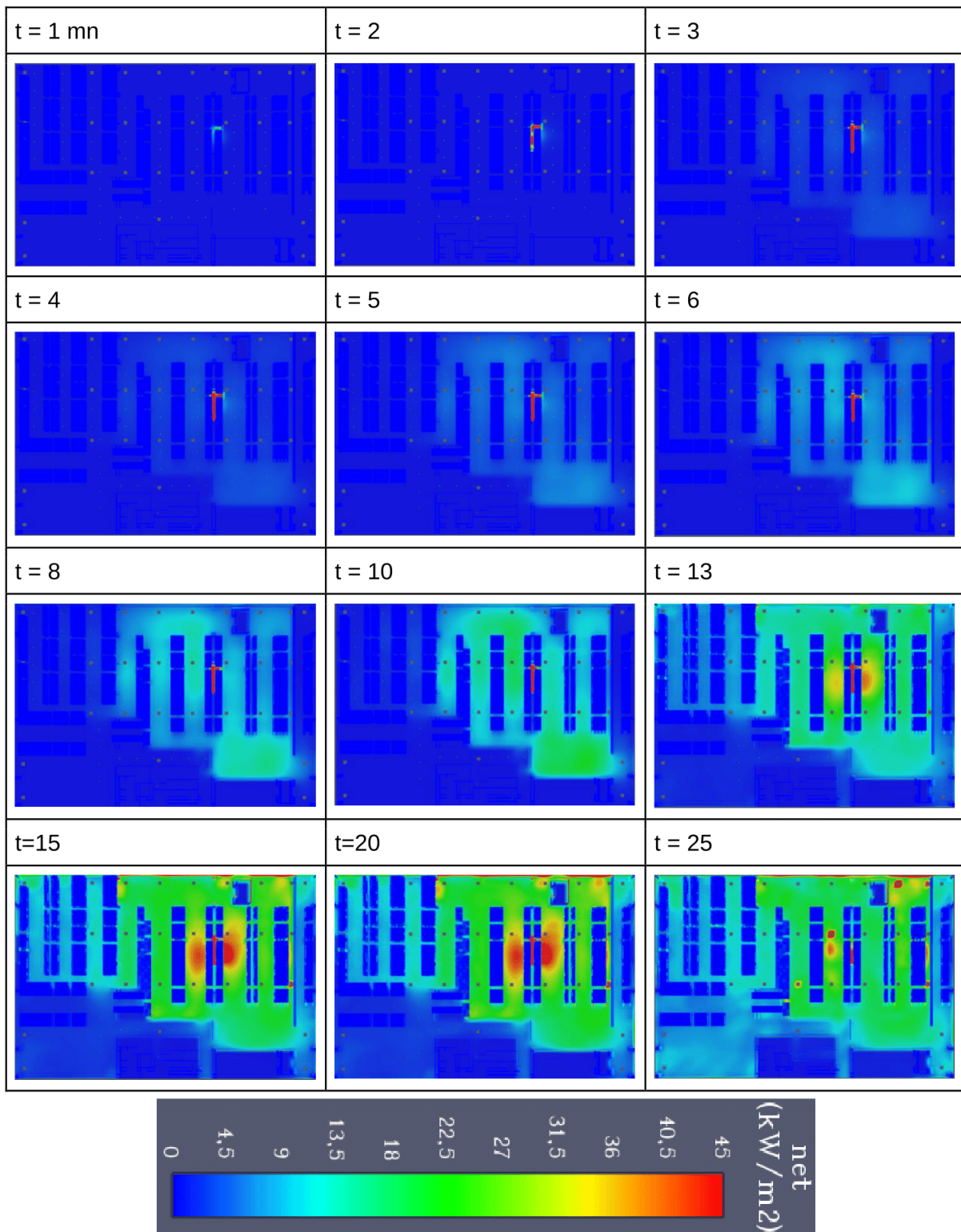


FIGURE 4.14 – Évolution du flux thermique net- Magasin RDC

C Toxicité des fumées

Dans cette étude, on évalue la toxicité des fumées en fonction de la concentration de monoxyde de carbone qu'elles contiennent, **figure (4.15)**. Celle-ci ne doit pas dépasser 220 *ppm*. L'échelle est présentée par FDS en $\frac{mol\ CO}{mol\ Air}$, tel que $1\ ppm = 10^6\ mol/mol$. L'échelle varie donc de 0 à 300 *ppm*. La **figure(4.16)**

présente les relevés effectués à hauteur d'homme en différents points clés (voir **figure(4.12)**). Dans l'ensemble, la toxicité reste inférieure au seuil critique jusqu'à la **7e mn.**

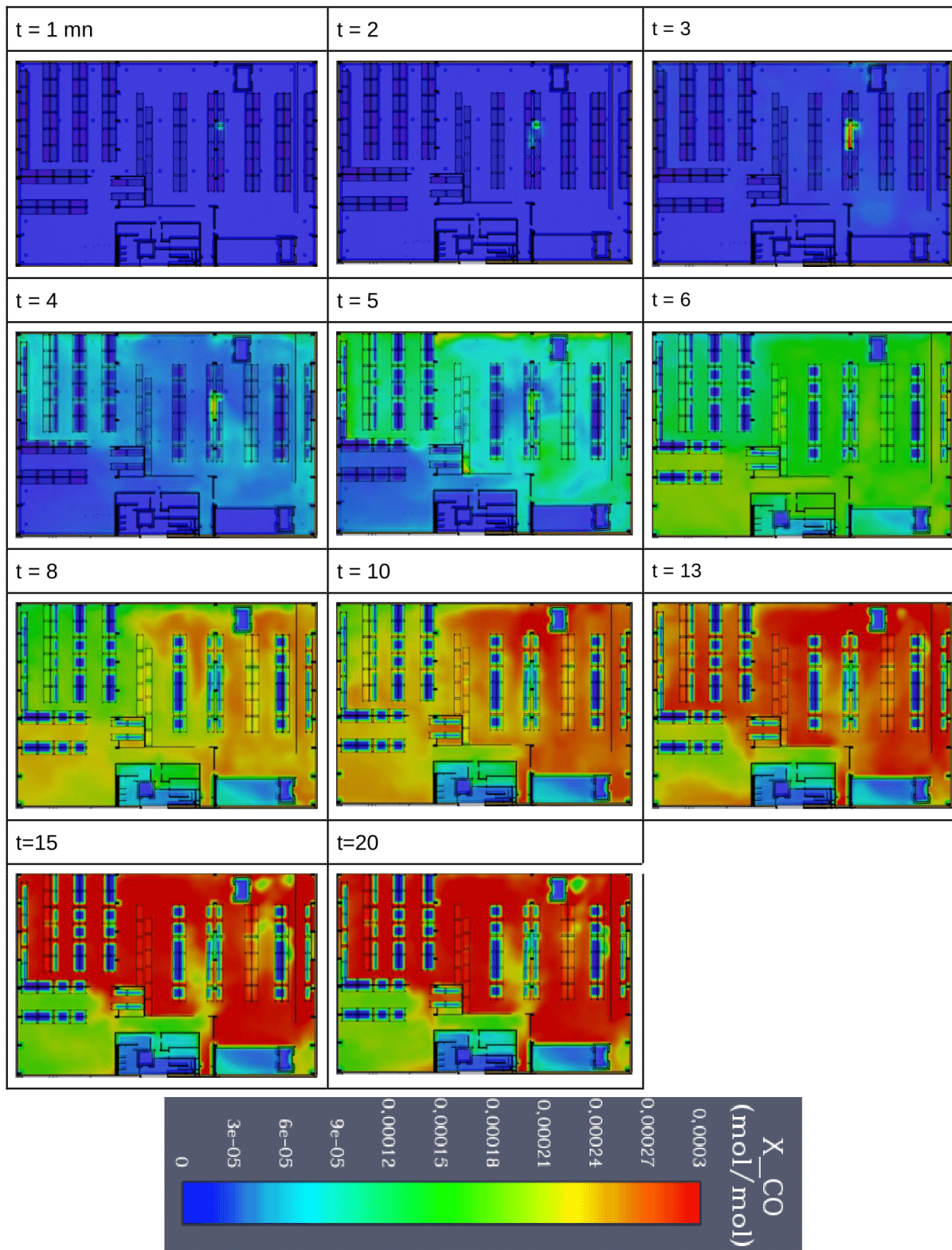


FIGURE 4.15 – Évolution de la toxicité à hauteur d'homme - Magasin RDC

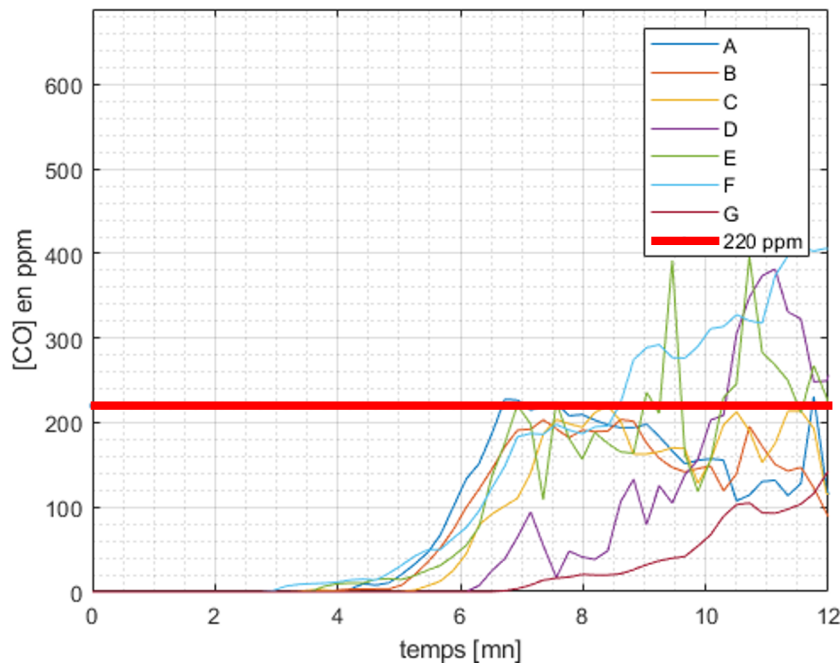


FIGURE 4.16 – Évolution de la concentration aux points critiques - Magasin RDC

4.2.1.4 Comparaison entre détection de fumées et détection de chaleur

Des détecteurs de fumées et de chaleurs ont été placés dans le magasin, en paire, 30 cm sous le plafond, afin d'étudier leur comportement au cours de la simulation et comparer leur temps de réponse. Les détecteurs de chaleurs simulent le comportement des têtes de sprinklers automatiques (ampoules à réponse rapide, calibrées à 68°C).

A partir de nos résultats, on remarque que la détection de fumées précède la détection de chaleur pour 93% des paires. Elle est donc plus **rapide**. Ceci s'explique par la nature solide du combustible. En effet, la production de suie est plus rapide que la génération de chaleur (on voit la fumée avant de sentir la chaleur). La première alarme de fumées a eu lieu 37s après le départ de feu alors que le premier détecteur de chaleur ne se déclenche qu'après 56s. Ainsi, on peut supposer que le système d'extinction automatique se déclenche au mieux une minute après le départ de feu.

Le retard de la détection de chaleur par rapport à la détection de fumée, pour l'ensemble des capteurs, est de 13s en moyenne, avec un maximum de 30s. Cette information sera utile pour le dimensionnement du système de désenfumage qui sera commandé par des détecteurs de fumées. Afin d'éviter qu'il ne se déclenche **avant les sprinklers**, il sera temporisé de 30s. Dans le cas contraire, l'efficacité des sprinklers est susceptible d'être compromise [22]. Aussi, cette temporisation permet d'assurer l'ouverture correcte des volets d'extraction avant le

démarrage des ventilateurs d'aspiration.

4.2.2 Magasin AC

4.2.2.1 Puissance développée

Comme pour la précédente simulation, l'incendie se déclenche sur un bac situé au centre du magasin, en bas d'un rack de stockage, à $t = 0$. Puis, il se propage aux bacs voisins par transfert de chaleur. Les bacs sont constitués d'une palette en bois sur laquelle des cartons d'articles en plastique (polyéthylène) sont empilés. Le taux de chaleur développé par la combustion d'un seul bac atteint son seuil maximal de $4810kW$ au bout de $190s$. Un maillage unique recouvrant tout le volume du magasin RDC est considéré. La taille de la cellule est fixée à $15cm$ suivant les trois directions. La durée simulée est de $30mn$ à partir du départ de feu. Le système d'extinction automatique est supposé inactif ce qui permet à l'incendie de se développer rapidement.

La **figure(4.17)** illustre l'évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse. La puissance maximale dégagée et le débit de pyrolyse sont relativement inférieurs à ceux enregistrés dans la simulation du magasin RDC. Mais la dynamique et l'évolution de l'incendie sont assez similaires. La courbe de puissance suggère l'occurrence d'un flashover à $t > 15mn$. La puissance maximale de $90MW$ est atteinte après $24mn$. Juste après ce pic, la puissance décroît progressivement. De même que pour le magasin RDC, l'incendie subit un étouffement car la chute de puissance précède la baisse du débit de pyrolyse.

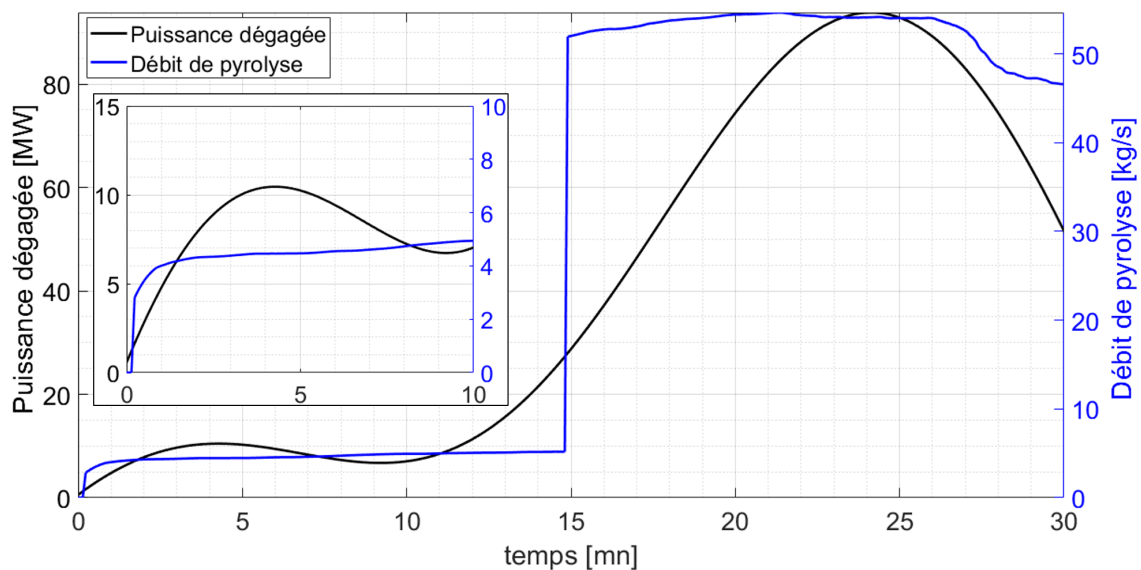


FIGURE 4.17 – Évolution de la puissance dégagée et du débit de pyrolyse - Magasin AC

Comparé au modèle "T-square fire" de Drysdale, l'incendie évolue de manière

rapide (Drysdale fast), **figure(4.18)**

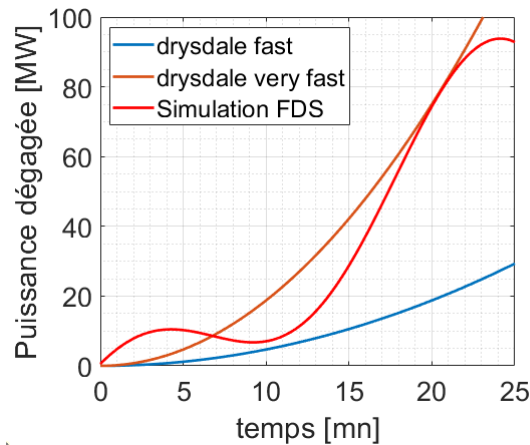


FIGURE 4.18 – Comparaison entre l'évolution de la puissance théorique et celle enregistrée par FDS

On compare la puissance obtenue dans ce travail à celle rapportée par le VTT dans l'une de leurs simulations FDS [20] ayant porté sur un mélange de matière cellulosique et de plastique. Les propriétés de ce combustible sont très proches de celui considéré dans notre travail, avec notamment, des taux de chaleur par unité de surface respectifs de $500kW/m^2$ et $389kW/m^2$. Ici encore, le taux de chaleur (HRR) est rapporté à la surface extérieure du bac ($12.4m^2$) :

$$HRRPUA = \frac{4810}{12.4} = 389[kW/m^2] \quad (4.2)$$

La puissance maximale dégagée après 10 minutes dans la simulation réalisée par le VTT atteint environ $12MW$, alors que celle obtenue dans notre simulation est de $10MW$, **figure(4.4)**. Les ordres de grandeur sont donc similaires et le faible écart peut s'expliquer par la configuration géométrique et la ventilation qui différent dans les deux travaux.

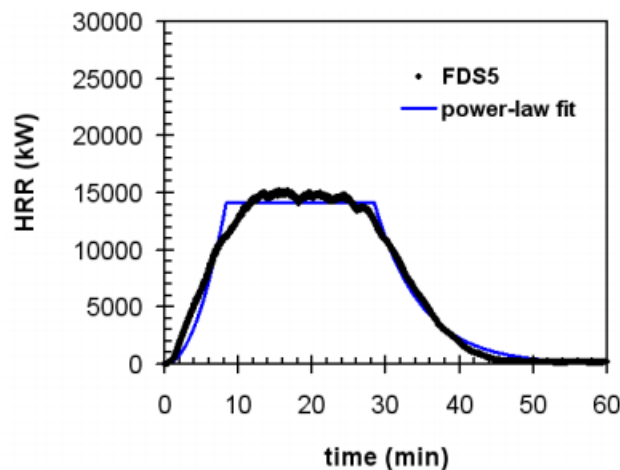


FIGURE 4.19 – Résultat de la puissance dégagée par la simulation du VTT [20]

4.2.2.2 Occurrence d'un flashover/backdraft

A partir des relevés du flux thermique au sol et de la température des gaz chauds sous le plafond (**figure(4.20)**) la probabilité d'occurrence d'un flashover est confirmée. Les seuils retenus ($20\text{kW}/\text{m}^2$ et 600°C respectivement) sont dépassés entre $t = 15$ mn et $t=17$ mn.

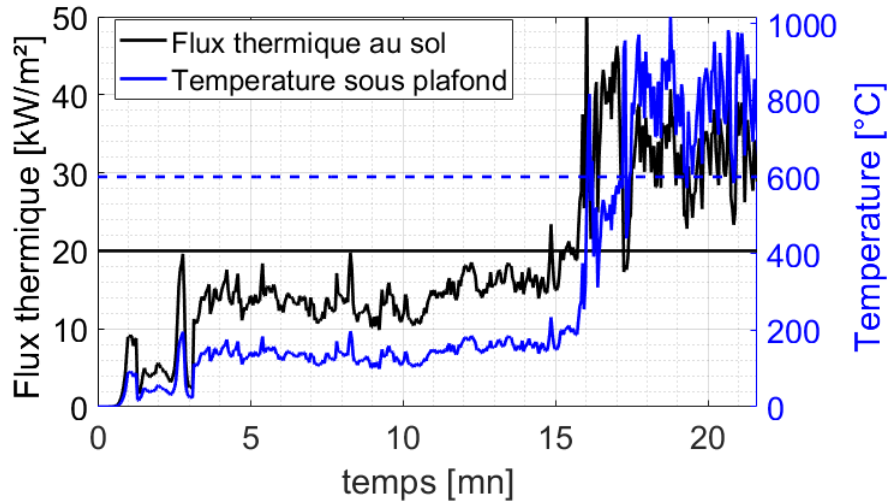


FIGURE 4.20 – Évolution des paramètres clés d'un flashover - Magasin AC

Comme pour le magasin RDC, un backdraft potentiel est à redouter après le flashover, car l'air chaud est appauvri en oxygène mais surchargé de gaz combustibles imbrûlés, **figure(4.21)**.

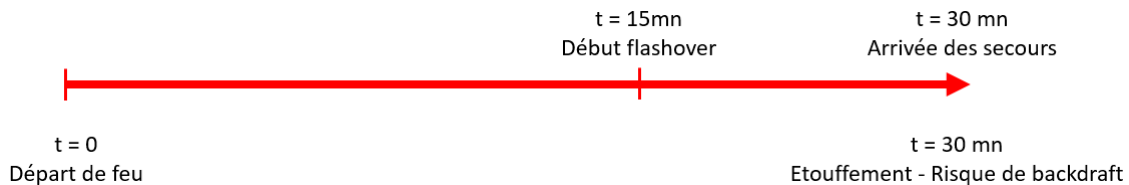


FIGURE 4.21 – Chronologie de l'incendie - Magasin AC

4.2.2.3 Critères de tenabilité

L'évolution des fumées dans le local est illustrée sur la **figure (4.23)**. En l'absence de système de désenfumage, les fumées se propagent rapidement, pour atteindre une emprise générale au bout de 25 mn. Aussi, un détecteur de fumées est placé dans la cage d'escaliers principale pour déceler l'enfumage des escaliers. On constate une infiltration vers 20 mn (obscurité de 25%), menant à une emprise générale quelques minutes après, **figure(4.22)**.

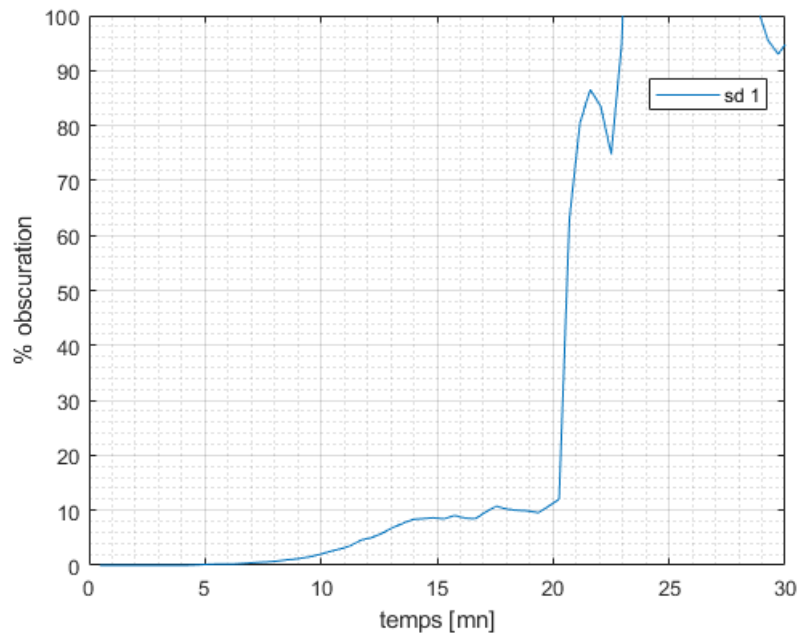
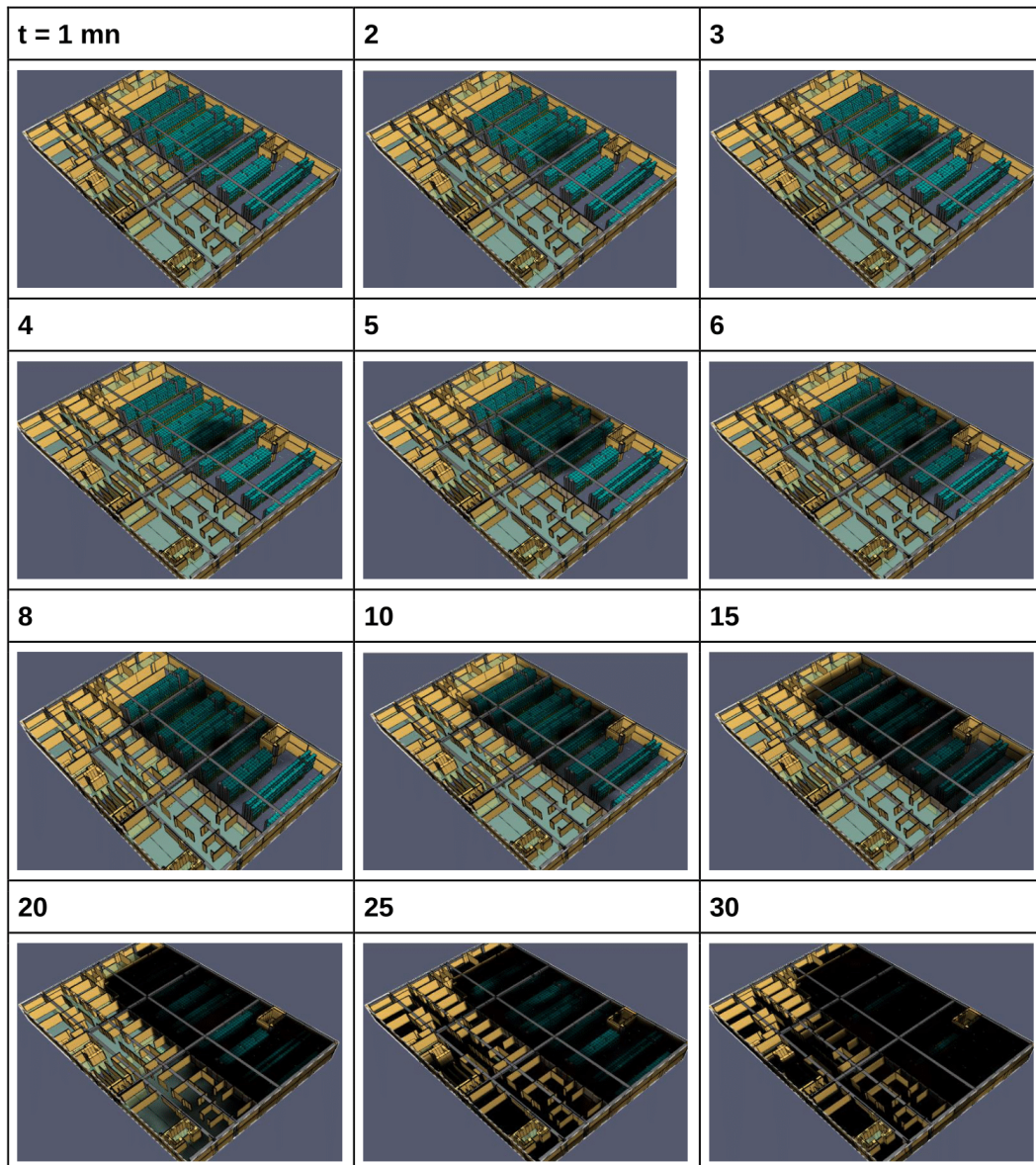


FIGURE 4.22 – Évolution de l'envahissement des escaliers - Magasin AC



Les temps de remise en cause des différents critères sont présentés dans le tableau (4.4).

4.2.2.4 Comparaison entre détection de fumées et détection de chaleur

Comme pour la première simulation, des paires détecteur de fumées - détecteur de chaleur ont été disposées dans tout le magasin. A partir des relevés effectués par FDS, on note que la détection de fumées précède la détection de chaleur pour 98% des paires. La première alarme de fumées a eu lieu 25s après le départ de feu. Le premier détecteur de chaleur se déclenche après 47s. Le retard de la détection de chaleur par rapport à la détection de fumée, pour l'ensemble des capteurs, est de 31s en moyenne. **Ainsi, le système de désenfumage commandé par détection de fumée devra s'enclencher avec une temporisation de 30s.**

4.3 Synthèse des résultats

Les tableaux (4.4) et (4.5) résument les temps de remise en cause des différents critères de tenabilité retenus pour le personnel et les agents d'intervention.

Tableau 4.4 – Résumé des temps de remise en cause des critères de tenabilité pour le personnel

Critère de tenabilité	Seuil	Temps de dépassement Magasin RDC [mn]	Temps de dépassement Magasin AC [mn]
Température	$T < 60$	7	8
Visibilité	$V > 10m$	8	7
Toxicité des fumées	$[CO] < 220ppm$	7	8
Flux thermique	$Q_{net} < 2kW/m^2$	7	9

Tableau 4.5 – Résumé des temps de remise en cause des critères de tenabilité pour des agents d'intervention équipés d'ARI

Critère	Seuil	Temps de dépassement Magasin RDC [mn]	Temps de dépassement Magasin AC [mn]
Température	$T < 100^{\circ}C$	9	10
Flux thermique	$Q_{net} < 5kW/m^2$	10	13
Possibilité de Flashover	-	$t > 15$	$t > 15$
Possibilité de Backdraft	-	$t > 25$	$t > 30$

On retient donc un temps de remise en cause de la tenabilité dans les deux magasins (RDC et AC) de **7 mn** pour le personnel et de **9 à 10 mn** pour les agents d'intervention, soit les valeurs minimales. Ces intervenants doivent prendre leurs précautions puisque il y a une possibilité d'occurrence d'un flashover 15 minutes après le départ de feu.

4.4 Évacuation des usagers

Afin de vérifier que l'évacuation des usagers est faisable avant que les critères de tenabilité ne soient remis en cause, on détermine le temps nécessaire pour quitter les lieux. Dans notre travail, nous avons adopté le logiciel Pathfinder.

4.4.1 Présentation du logiciel Pathfinder

Pathfinder est un simulateur d'évacuation d'urgence qui comprend une interface utilisateur intégrée et des résultats 3D animés. Il permet d'évaluer les modèles d'évacuation rapidement et de produire des résultats jugés réalistes. Il comporte trois modules principaux : une interface graphique, un simulateur, et une visionneuse de résultats en 3D [23].

4.4.2 Méthodologie

Pour la simulation Pathfinder ; nous avons suivi les étapes suivantes :

1. Construction du modèle
2. Définition des occupants
3. Visualisation des résultats

4.4.3 Construction du modèle

La maquette 3D du bâtiment précédemment construite dans FDS a été réutilisée avec quelques ajustements.

4.4.4 Définition des occupants

Dans Pathfinder, les occupants sont intégrés en deux étapes : définition du profil puis du comportement. Le profil détermine les caractéristiques des occupants (vitesse maximale, hauteur...). Le comportement définit une séquence d'actions que l'occupant entreprendra tout au long de la simulation (sortir par une porte définie, prendre les escaliers au lieu des ascenseurs...).

4.4.5 Résultats

En plus de la visualisation 3D, Pathfinder fournit des graphes qui montrent l'évolution du nombre d'occupants en fonction du temps. **Les figures(4.24) et (4.25)** montrent que l'évacuation des usagers se fait en 2,15 minutes (129 secondes) au niveau du rez-de-chaussé et en 5,5 minutes (330 secondes) au niveau du 2ème étage. On note que le 2ème étage comprend, outre le magasin AC, un laboratoire de contrôle qualité, un laboratoire de recherche et développement ainsi que l'administration. Le nombre d'occupants est donc plus important et l'évacuation nécessite plus de temps.

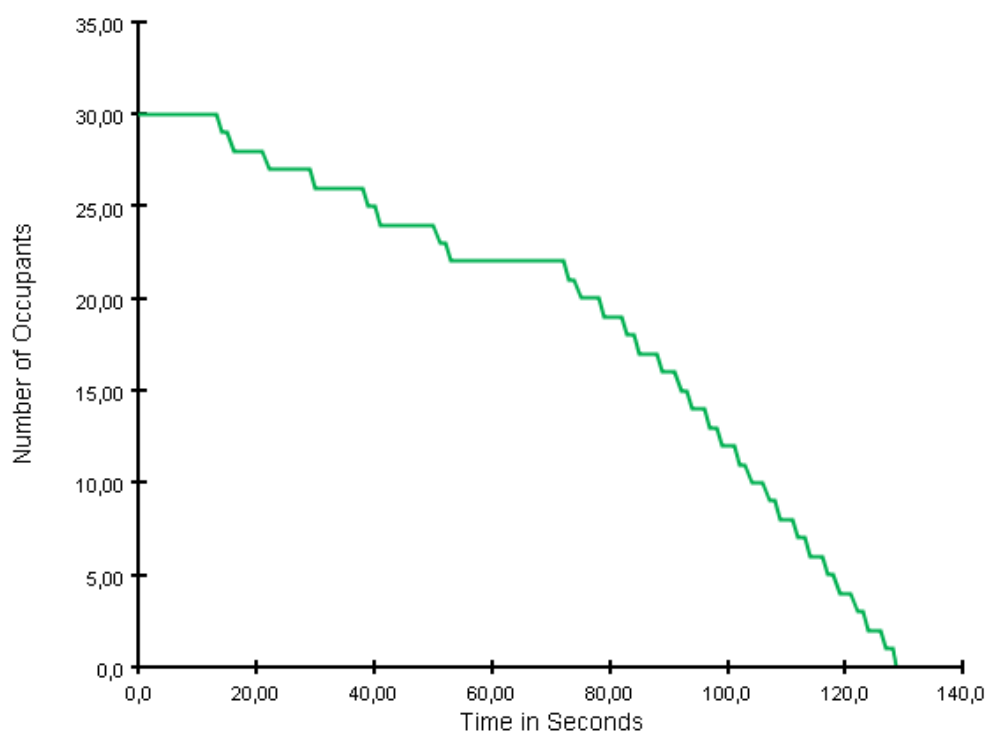


FIGURE 4.24 – *Evolution du nombre d'occupants en fonction du temps au niveau du rez-de-chaussée*

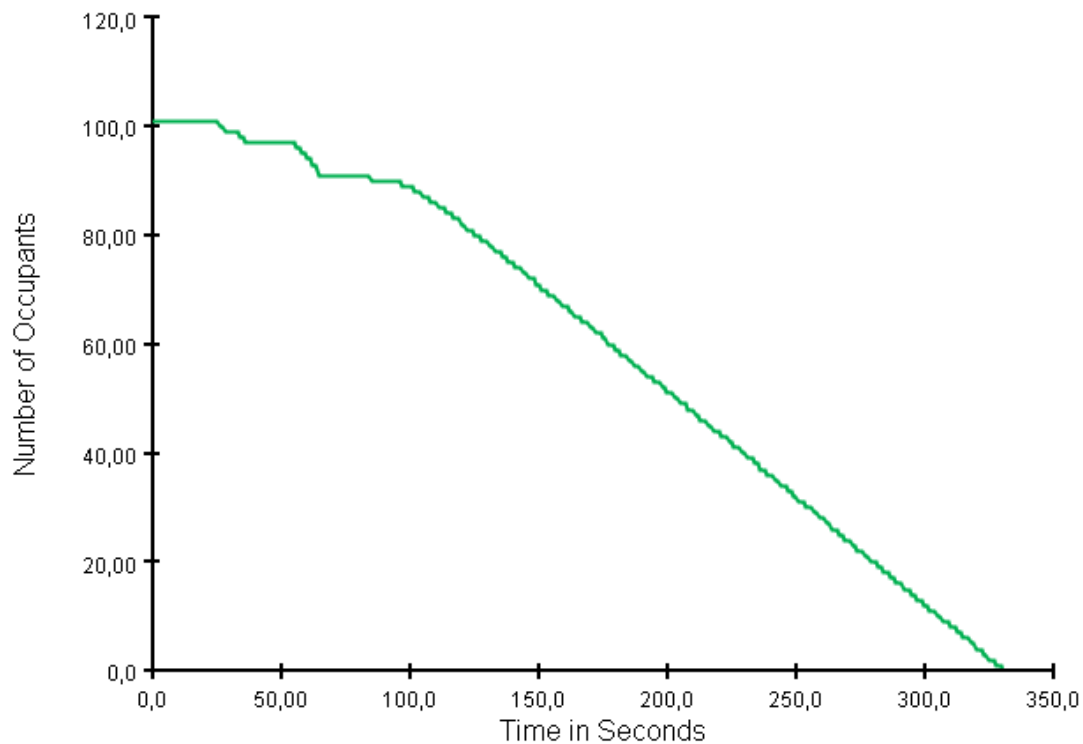


FIGURE 4.25 – Evolution du nombre d’occupants en fonction du temps au niveau du 2ème étage

4.4.6 Comparaison du temps d’évacuation avec la durée de tenabilité

La durée totale de l’évacuation (**figure(4.26)**) est la somme des trois temps : temps de détection (alarme incendie), temps de réaction des personnes (estimé à 1 min, [24]) et le temps de l’évacuation calculé par Pathfinder. La différence entre la durée totale de l’évacuation et la durée de tenabilité donne la marge de sécurité.

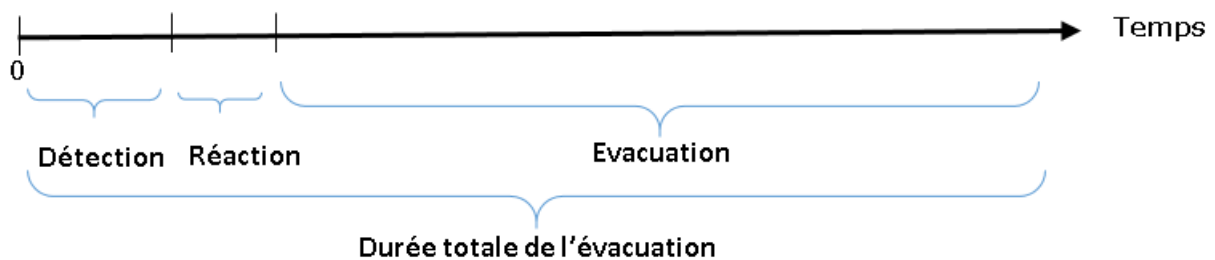


FIGURE 4.26 – Temps nécessaire pour l’évacuation

Tableau 4.6 – Bilan du temps nécessaire pour l'évacuation du personnel

	Magasin de RDC	Magasin AC
Temps de détection (fumée)	37 sec	25 sec
Temps de réaction	1 mn	1 mn
Temps d'évacuation (Pathfinder)	129 sec (2.15 mn)	330 sec (5.5 mn)
Durée totale de l'évacuation	229 sec (\simeq 4 mn)	415 sec (\simeq 7 mn)
Durée de tenabilité	7 mn	7 mn
Marge de sécurité	+3 min	0

Pour le magasins AC, le temps de dépassement des seuils de tenabilité est de 7min après le départ de feu. Si on le compare avec le temps nécessaire pour l'évacuation qui est **7 mn** dans le magasin AC la marge de sécurité est nulle. Ceci implique la nécessité de réduire le temps d'évacuation ou d'allonger le temps de survie. Pour le magasin RDC, la marge de sécurité (3 mn) est jugée confortable.

4.5 Effet de l'incendie sur la structure

La réponse de la structure à un incendie est généralement évaluée au travers d'une étude thermo-mécanique. Une élévation de la température d'un solide produit une dilatation. Ce phénomène a pour effet de produire des déformations dans les structures. Si une pièce est fixée rigidement à ses deux extrémités, une variation de température produit une contrainte dans la pièce.

Cependant, avant de se lancer dans un travail aussi détaillé, il est nécessaire de justifier qu'il y a bien possibilité de dommage causé par l'incendie. Une méthode rapide pour évaluer cette possibilité consiste à comparer la température maximale atteinte à la surface des éléments structurels à une température dite critique $T_{critique}[^{\circ}C]$. En effet, les dommages causés aux matériaux par la chaleur se divisent en deux catégories selon les effets observés [25] : des dommages au premier degré (destruction totale), et des dommages au second degré (dégradation superficielle matériaux).

Le critère retenu pour distinguer ces dommages est la température à la surface du matériau. Lorsqu'elle dépasse une température critique ($T_{critique}[^{\circ}C]$) donnée, des dommages au 1er ou au 2e degré seront observés. Le **tableau (4.7)** donne les valeurs de la température critique pour divers matériaux [25].

Tableau 4.7 – Température et flux critiques pour certains matériaux

	Dommage au 1er degré		Dommage au 2e degré	
	Flux critique kW/m^2	$T_{critique}$ $^{\circ}C$	Flux critique kW/m^2	$T_{critique}$ $^{\circ}C$
Acier	n.a	1126	n.a	207
Bois	15	407	2	97
Verre	4	117	n.a	n.a

Nous avons réalisé une étude thermique sur la structures des deux magasins à l'aide du logiciel Solidworks. Les flux thermiques obtenus dans nos simulations FDS ont été appliquées aux éléments structurels afin d'évaluer l'évolution de la température à la surface du matériau durant l'incendie. Cette étude thermique se limite à la structure métallique en acier, les éléments de maçonnerie ainsi que les revêtements ont été ignorés faute de données disponibles auprès de l'entreprise. La température critique pouvant causer des dommages de premier degré à l'acier est considérée, soit $T_{critique} = 1126^{\circ}C$.

Solidworks embarque un solveur par éléments finis utilisé pour les simulations thermiques et mécaniques. Le calcul analytique de la température d'un élément de structure est obtenu par l'équation 4.3 extraite de l'Eurocode 3 [26]. Celle-ci donne l'élévation de température $\Delta\theta$ de l'élément sur un intervalle de temps Δt

$$\Delta\theta = k \frac{A_m}{C_a \rho_a} \times h_{net} \times \Delta t \quad (4.3)$$

Avec

- $C_a [J/kg.K]$ chaleur spécifique de l'acier,
- $\rho [kg/m^3]$ masse volumique de l'acier
- $h_{net} [W/m^2]$ flux thermique total (radiatif + convectif),
- $A_m [m^2/m]$ la surface exposée de l'élément rapportée à l'unité de longueur,
- $V [m^3/m]$ le volume de l'élément rapportée à l'unité de longueur,
- $k = 1$ (hypothèse majorante, cas le plus défavorable).

4.5.1 Assemblage 3D

La description de la structure du bâtiment se base sur l'analyse des plans fournis par El Kendi et de prise de photos sur site. Elle est présentée dans l'an-

nexe A. A partir de celle-ci, nous avons réalisé la maquette 3D de la structure des deux magasins sur Solidworks grâce aux outils de dessin offerts par celui-ci. En l'absence d'informations plus précises sur les fixations, la condition aux limites appliquée aux poteaux est un encastrement aux sommets et aux pieds. De même, les extrémités des poutres seront considérées comme étant encastrees aux poteaux [24].

4.5.2 Chargement thermique

Les puissances thermiques incidentes relevées sur chacune des poutres et des poteaux seront injectées directement dans le modèle de Solidworks en tant que chargement thermique. A titre d'exemple, la puissance mesurée en fonction du temps au niveau d'un poteau est présentée dans la **figure(4.27)**. La durée simulée est de $30mn$ à partir du départ de feu pour les deux magasins.

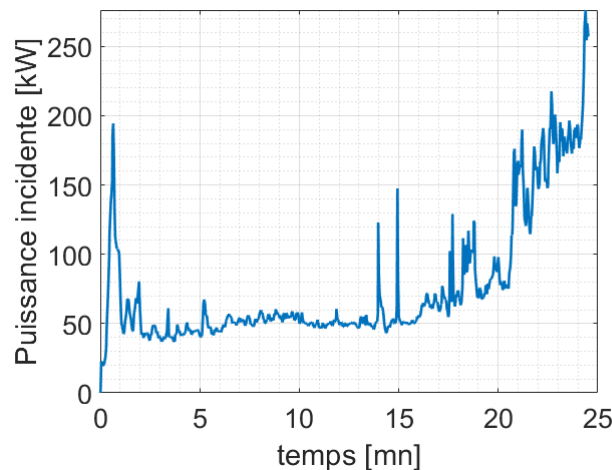


FIGURE 4.27 – Flux thermique incident sur un élément structurel

4.5.3 Résultats et interprétation

Les **figures (4.28) et (4.29)** illustrent les niveaux de température à la surface des éléments structurels à $t = 30mn$ dans les deux magasins. Quand on s'éloigne du foyer de l'incendie, la température est moins importante, car le transfert thermique est plus faible. Pour rappel, à partir de la 25e minute, la puissance de l'incendie dans les deux magasins décroît et par conséquent, le flux thermique affectant la structure, (**figures(4.1) et (4.17)**).

Les températures maximales enregistrées sur les structures sont de $1004^{\circ}C$ pour le magasin RDC et $991^{\circ}C$ pour le magasin AC. Elles sont inférieures à la température critique retenue de $1126^{\circ}C$. Le seuil à partir duquel des dommages importants sont censés survenir n'a donc pas été atteint. Ainsi, **l'intensité de l'incendie simulé n'affecte pas la structure des magasins**. De fait, il ne

sera pas nécessaire d'effectuer une étude de dynamique structurelle plus avancée.

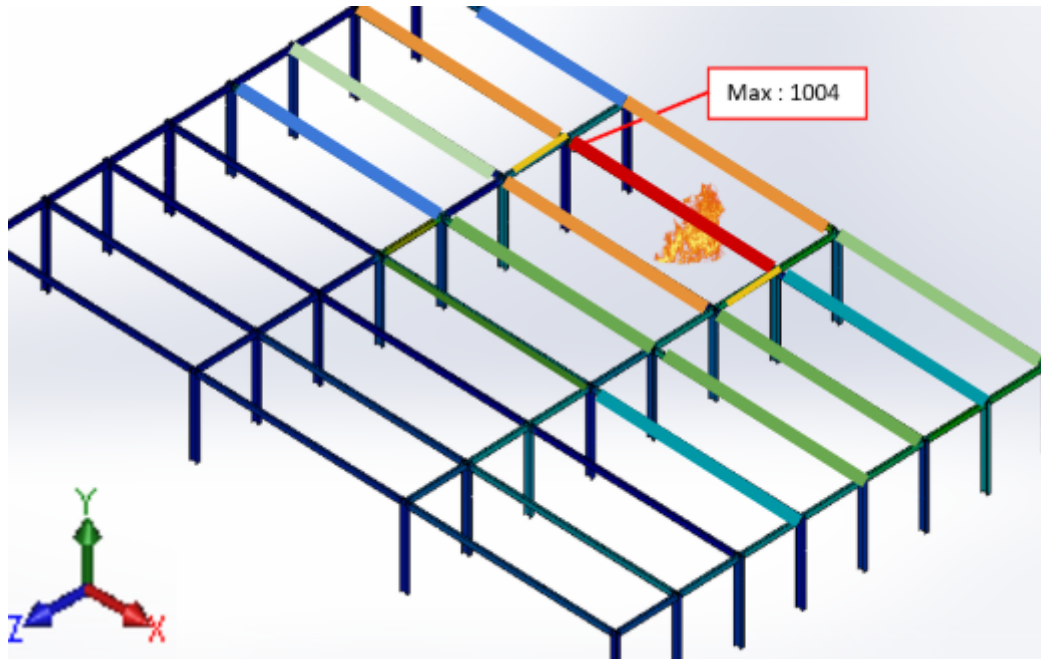


FIGURE 4.28 – Distribution de la température en °C à $t=30\text{ mn}$ - Magasin RDC

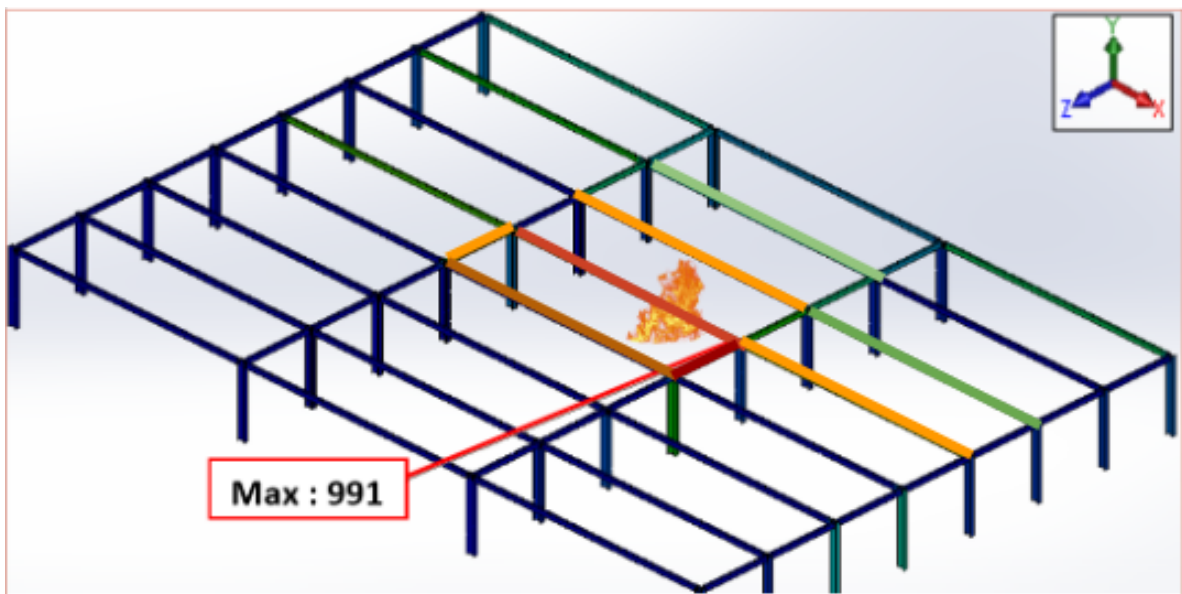
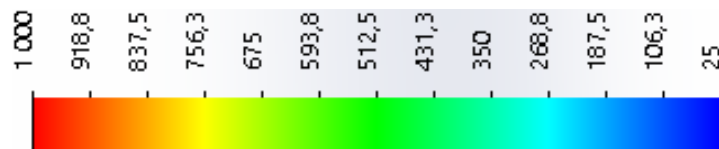


FIGURE 4.29 – Distribution de la température °C à $t=30\text{ mn}$ - Magasin AC

4.6 Conclusion

L'exploitation des résultats des simulations nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. L'évolution de l'incendie n'est pas compatible avec le temps d'évacuation du magasin AC (marge de sécurité nulle)
2. Pour le magasin RDC, l'étude permet de conclure que l'évacuation est faisable avant la remise en cause des critères de tenabilité, avec une marge de sécurité de $3mn$ jugée confortable.
3. Les conditions de température et de flux thermique dans les deux magasins sont jugées critiques pour les agents d'intervention, pouvant au mieux gêner leurs manoeuvres, et au pire, les empêcher d'intervenir. De plus, l'absence de système de désenfumage, l'abondance de combustible, le manque de séparation et la nature confinée des compartiments rendent l'occurrence d'un flashover suivi d'un backdraft très possible si l'incendie n'est pas maîtrisé rapidement.
4. L'analyse thermique de la structure démontre la bonne tenue de celle-ci pour la durée considérée de $30mn$ après le départ de feu.

Suite à l'étude effectuée, on suggère d'agir sur deux aspects : la réduction du temps nécessaire pour l'évacuation et l'allongement le temps de survie dans les compartiments (en retardant la remise en cause des critères de tenabilité).

1. **Allongement du temps de survie** Pour rappel les paramètres retenus pour évaluer la tenabilité sont : la température, la toxicité, la visibilité et le flux thermique. Les 3 premiers paramètres sont directement liés aux fumées. Lors d'un incendie, les fumées représentent un grand danger pour le personnel, pouvant causer des brûlures pulmonaires, asphyxie par manque d'oxygène, intoxication mais aussi gêner l'évacuation en réduisant la visibilité dans le local. Nous proposons donc la mise en place d'un système de désenfumage mécanique qui permettrait d'évacuer une partie des fumées produites par l'incendie et de refroidir le compartiment par l'apport d'air frais. De plus, une attention particulière doit être accordée à l'entretien des systèmes d'extinction (sprinkleur, RIA, extincteurs portatifs) afin d'éteindre l'incendie au plus tôt et éviter la propagation. Ces deux points seront développés dans le **chapitre 5**.
2. **Réduction du temps d'évacuation** En mettant en oeuvre : - Des exercices d'évacuation réguliers. - Une sensibilisation du personnel sur les risques incendie. - Un dispositif de signalisation des issues de secours adapté.

Chapitre 5

Evaluation et amélioration de la sécurité incendie

5.1 Introduction

La sécurité incendie englobe la protection passive et la protection active. La première a pour objet de fournir une intégrité structurelle aux éléments de construction en recourant à des matériaux résistants au feu. La seconde consiste à maîtriser l'incendie et recouvre donc le désenfumage et l'ensemble des techniques d'extinction (extincteurs, robinets d'incendie armés (RIA) et sprinkleurs).

Dans notre étude, on s'intéresse à la protection active pour deux raisons : (1) La disponibilité de données auprès de l'entreprise, (2) La possibilité d'apporter des améliorations concrètes et réalisables.

Dans ce chapitre, un framework (protocole) permettant d'évaluer la sécurité incendie en place chez EL KENDI est présenté. A partir de cette évaluation et des conclusions du **chapitre 4**, un plan d'amélioration a été établi. Enfin, un système de désenfumage mécanique est proposé.

5.2 Évaluation de la sécurité incendie

Afin de parer à toute menace, El KENDI s'efforce de maintenir les dispositifs de sécurité incendie en bon état. Un framework (protocole) a donc été proposé afin de répondre aux **attentes** suivantes : (1) Identifier les éventuelles non conformités (2) Suivre l'état de la sécurité incendie en continu (3) Planifier les opérations de vérification, maintenance et tests périodiques (4) Impliquer le personnel de l'entreprise en lui permettant de signaler d'éventuelles pannes ou non conformités (voies d'évacuation bloquées, extincteur manquant, fuite d'un RIA....).

5.2.1 Présentation du framework (protocole)

Le framework a été développé en concertation avec l'équipe HSE d'EL KENDI. Il prend la forme d'une application web. Celle-ci est hébergée sur un serveur informatique distant (cloud) fourni par la société de services informatiques Amazon Web Service. Elle est accessible via le réseau intranet d'El KENDI. Un aperçu de l'interface graphique est donné dans l'**annexe D**. L'application est organisée en six modules :

1. Un module de surveillance : il fonctionne en arrière plan afin de mettre à jour les indicateurs de performance à partir les données chargées par un opérateur. Ces indicateurs sont affichés dans un tableau de bord.
2. Un module de conformité : il permet de définir des exigences réglementaires

ou normatives puis de vérifier la conformité par rapport à celles-ci à travers des inspections ou des audits. Le framework est générique et n'impose pas de références particulières. **Dans ce travail, une documentation fournie par El Kendi est considérée.** Celle-ci s'inspire des normes APSAD et d'autres référentiels internes (rapports d'expertise, directives constructeurs ...).

3. Un module de journalisation : il permet de consigner toutes les opérations de vérification ou maintenance effectuées sur les systèmes incendie et fait office de registre électronique.
4. Un module pour les opérations périodiques : il permet la planification automatique des opérations de vérification et maintenance périodiques prévues dans les référentiels d'El Kendi.
5. Un formulaire de signalement mis à disposition du personnel de l'entreprise et accessible en ligne.
6. Un module de notifications : il permet de tenir informée l'équipe HSE d'El Kendi par l'envoi d'alertes ou de rappels par mail ou SMS (par exemple, lors d'un signalement par un membre du personnel ou à l'approche d'une opération périodique majeure).

Le bon fonctionnement du framework dépend de la qualité des données qui lui sont fournies et de la fréquence des mise à jour.

5.2.1.1 Indicateurs de performance

Les trois moyens de lutte incendie (extincteurs, sprinkleurs et RIA) sont évalués par rapport à leur niveau de conformité C (par ex : la maîtrise documentaire) et leur niveau opérationnel O . Pour chaque système i , le niveau de performance P_i est donné par :

$$P_i = \min(O_i, C_i) \quad (5.1)$$

Le niveau de conformité correspond au taux d'exigences satisfaites par rapport au total,

$$C_i = 100 \times \frac{\text{nombre de conformités}}{\text{nombre total d'exigences}} \quad (5.2)$$

Le niveau opérationnel correspond à l'entretien du système. Moins le système est entretenu, plus son niveau opérationnel baisse.

$$O_i = \frac{\text{tâches effectuées}}{\text{tâches prévues}} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{tâches en retard}}{\text{tâches prévues}}\right) = 100 \times \left(1 - \frac{O_i^D}{O_i^A}\right) \quad (5.3)$$

Avec O_i^D : le nombre de tâches en retard et O_i^A : le nombre de tâches prévues à la date actuelle. Si une tâche arrive à échéance (par exemple la vérification annuelle des extincteurs) et qu'elle n'est pas exécutée à temps, elle sera considérée comme retardée et l'application donne l'alerte. Le niveau remonte automatiquement dès que la tâche a été déclarée comme exécutée dans le module de journalisation.

Les niveaux de performance individuels des systèmes de lutte incendie sont ensuite consolidés en calculant la moyenne arithmétique :

$$P_{globale} = \frac{1}{3} \sum P_i \quad (5.4)$$

5.2.2 Résultats

Les résultats de l'évaluation sont présentés dans le **tableau (5.1)**. **Les données ont été recueillies en mars 2020**. L'extinction automatique enregistre la plus mauvaise performance en raison de l'obsolescence du dossier technique décrivant l'installation, la non conduite de l'épreuve hydraulique décennale, et le retard constaté dans l'exécution de certaines opérations périodiques comme la vérification et le remplacement des têtes de sprinkleurs.

Tableau 5.1 – Performance des systèmes de lutte incendie [Mars 2020]

Systeme	Extinction auto.	Extincteurs	RIA
Niv operationnel (%)	25	100	50
Niv de conformité (%)	29	75	63
Niv de performance (%)	25	75	50
Performance lutte incendie (%)	50		

5.3 Proposition d'un plan d'action

Au vu des résultats de l'évaluation, un plan d'action a été proposé afin d'améliorer l'état de la sécurité incendie. Une valeur cible minimale de 75% a été fixée pour les valeurs de performance. Le plan d'action s'étale sur 4 trimestres (Q4 2020, Q1 2021, Q2 2021, Q3 2021). Certaines actions nécessitent un financement et devront donc être retardées jusqu'à leur budgétisation. Les actions d'amélioration dans le **tableau (5.2)** seront considérées. Le **tableau (5.3)** donne une projection des niveaux de performance. A l'issue de ce programme, la performance de la lutte incendie passera de 50% à 87%.

Tableau 5.2 – Volet lutte incendie du plan d'action

Trimestre	Actions
Q4 2020	Établissement d'un programme de maintenance et vérification périodiques des systèmes hydrauliques
Q1 2021	Vérification / remplacement têtes de sprinkleurs Préparation du dossier technique de l'installation d'extinction automatique Ajout des extincteurs dans les magasins de stockage (protection complémentaire)
Q2 2021	Révision générale des pompes Augmentation de la capacité des réserves d'eau à 600m ³
Q3 2021	Epreuve hydraulique

Tableau 5.3 – Evolution des niveaux de performance de la lutte incendie

Échéance	Conformité extinction auto. %	Niv opérationnel extinction auto. %	Perf extinction auto. %	Perf RIA %	Perf Extincteurs %	Perf lutte incendie %
Q4 2020	25	29	25	50	75	50
Q1 2021	57	50	50	50	100	67
Q2 2021	86	75	75	75	100	83
Q3 2021	100	75	75	86	100	87

5.4 Proposition d'un système de désenfumage

L'installation d'un système de désenfumage au niveau des magasins a été proposée comme moyen pour allonger le temps de survie et évacuer le personnel dans de bonnes conditions. Le désenfumage consiste à évacuer une partie des fumées produites par l'incendie en créant une hauteur d'air libre sous la couche de fumée. Le but est de :

— Faciliter l'évacuation du personnel : maintenir une visibilité suffisante, dimi-

nuer la teneur en gaz toxiques, conserver un taux d'oxygène acceptable.

- Évacuer la chaleur produite par le foyer : limiter la propagation de l'incendie, permettre l'accès des locaux aux équipes d'intervention et de recherche.
- Eviter le flashover en limitant la hausse de température.
- Préserver la structure du bâtiment et éviter la ruine en réduisant la charge thermique.

La mise en route du désenfumage doit se faire de manière automatique et/ou manuelle. Dans cette section, nous présentons la description et le dimensionnement de l'installation de désenfumage proposée. Le fonctionnement du système a été testé au travers d'une simulation avec le code FDS.

5.4.1 Conception

5.4.1.1 Technique de désenfumage retenue

Le désenfumage mécanique a été retenu car le bâtiment comporte plusieurs niveaux, d'où l'impossibilité de mettre en place un désenfumage naturel (par ouvrant) au niveau du toit des deux magasins.

5.4.1.2 Principe de fonctionnement

Le désenfumage mécanique consiste évacuer les fumées et gaz chauds et apporter de l'air frais. L'amenée d'air neuf permet d'abaisser la température dans le local et de contrôler la pression (éviter le reflux des fumées) avec des débits bien étudiés. L'extraction et l'apport d'air s'effectuent à travers des bouches reliées à des ventilateurs.

Le dispositif de désenfumage mécanique est donc constitué d'un système de commande (avec un déclenchement manuel ou automatique par détection), du système d'extraction des fumées, et du système d'amenée d'air. Le déclenchement automatique est assuré par des détecteurs de fumée optiques reliés à une armoire de commande, **figure(5.1)**

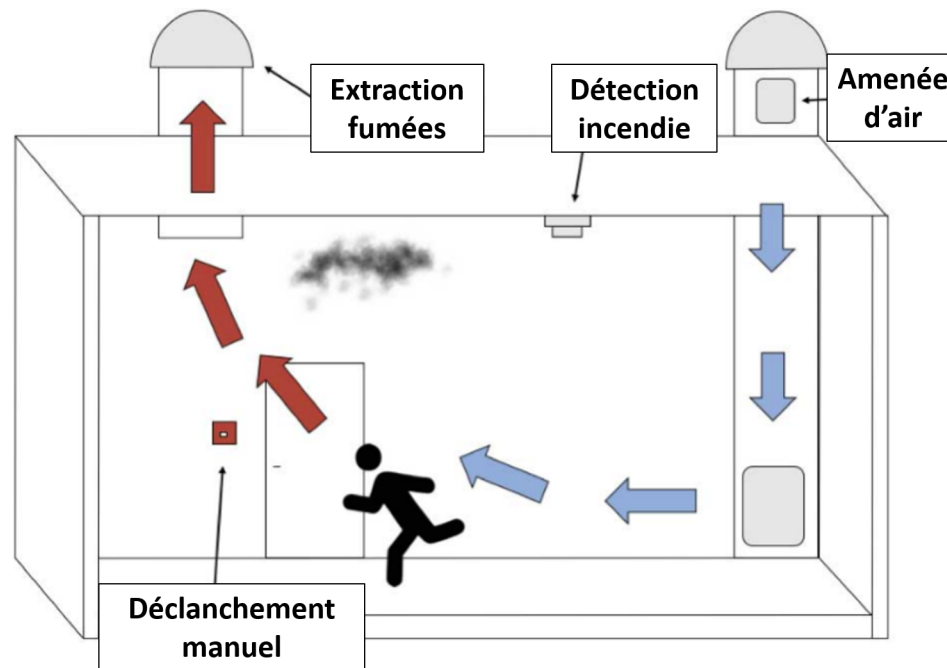


FIGURE 5.1 – Schéma d'un système de désenfumage mécanique type

Afin de ne pas gêner le déclenchement automatique des sprinkleurs [22] et permettre l'ouverture des volets, le démarrage des ventilateurs d'extraction est retardé de 30s (**Chapitre 4**).

5.4.1.3 Règles de calcul

Ce travail repose sur les règles de calcul suivantes extraites de l'instruction Technique IT 246 [27] :

1. Compartimentage du local :

La première contrainte à respecter pour une installation efficace est le compartimentage. Le compartimentage étant réalisé par les cloisons, les portes, clapets, et dans les grands volumes, des retombées ou écrans de cantonnement. Concernant la hauteur de l'écran de cantonnement h , Pour $H < 8m$, $h = 0.25 \times H$ avec H hauteur du local [m]. La superficie maximale du canton ne doit pas dépasser $1600m^2$, et la longueur maximale ne doit pas dépasser $60m$.

2. Calcul du débit d'extraction Q_{ext} :

L'air dans le local doit être renouvelé au moins 12 fois par heure, soit $Q = \frac{12 \times V}{3600}$. Le débit d'extraction est au minimum de $1.5m^3/s$ mais ne doit pas dépasser Q_1 , tel que $Q_1 = 0.03 \times S$ débit maximal d'extraction admis, calculé

empiriquement.

$$Q_{ext} = \begin{cases} 1.5 \text{ m}^3/\text{s} & \text{si } Q < 1.5 \\ Q & \text{si } 1.5 < Q < Q_1 \\ Q_1 & \text{si } Q > Q_1 \end{cases} \quad (5.5)$$

Avec V : volume de canton [m^3] et S : superficie du canton [m^2].

3. Choix du ventilateur d'extraction : Le débit nominal du ventilateur Q_v est donné par

$$Q_v = 1.2 \times Q_{ext} \quad (5.6)$$

Soit un surdimensionnement de 20%. Le ventilateur d'extraction doit être agréé avec une tenue de 1h à 400°C.

4. Disposition des bouches d'extraction :

La hauteur du magasin étant de 7m, il faut au moins une bouche pour chaque 300m² de superficie. La distance maximale entre une bouche d'extraction et le point plus éloigné du canton ne doit pas dépasser 4 fois la hauteur, dans notre cas elle est de 28m.

5. Amenée(s) d'air :

La vitesse de passage de l'air aux ouvertures est limitée à 5m/s (on prend une valeur de 2.5m/s). Le débit d'amenée d'air égale 0.6 fois le débit réel extrait du canton (Q_v). La section d'une grille d'amenée d'air est ainsi obtenue par $S = \frac{Q}{V}$.

Les résultats des calculs obtenus en appliquant les règles citées précédemment sont résumés dans les **l'annexe C**.

5.4.2 Vérification de l'efficacité du système de désenfumage proposé

Le fonctionnement du dispositif proposé est testé sur FDS à travers deux simulations (une pour chaque magasin). Afin de simplifier l'étude, l'incendie ne sera pas simulé. A la place, un événement placé sur le sol injectera dans le domaine de la fumée froide composée de suies, et de monoxyde de carbone. Ce dispositif est similaire aux générateurs de fumées froides employés pour les tests de mise en service des systèmes de désenfumage dans les tunnels et les parkings [28].

Des relevés sont effectués à l'aide de capteur et des plans de mesure afin de s'assurer que les niveaux de visibilité et de toxicité sont acceptables.

5.4.2.1 Calcul du débit d'injection de la fumée froide

Le combustible qui brûle génère de la chaleur et des produits de combustion (suies et gaz). Le **tableau (3.3)** du **Chapitre 4** donne les taux y_i de production des suies et du monoxyde de carbone. On en déduit les débits des suies et du monoxyde de carbone générés par la combustion d'une masse donnée de combustible (**section 3.6.5.2**).

$$y_i = \frac{m_i}{m_{combustible}} = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{Q}_{combustible}} \Rightarrow \dot{Q}_i = \dot{Q}_{combustible} \times y_i \quad (5.7)$$

Avec $m_{combustible}$ et $\dot{Q}_{combustible}$ respectivement la masse et le débit massique de combustible ayant brûlé, \dot{Q}_i débit de production des suies ou du monoxyde de carbone. Dans la simulation, le débit de fumées injectées à travers l'évent \dot{Q}_{event} est tel que

$$\dot{Q}_{event} = \dot{Q}_{suies} + \dot{Q}_{CO} \quad (5.8)$$

Le débit de combustible [kg/s] est déduit à partir de la puissance générée par l'incendie (**section 3.6.5.1**).

$$\dot{Q}_{combustible}(t) = \frac{P(t)}{\Delta h_c} \quad (5.9)$$

Avec $P[MW]$ puissance dégagée (**figures(4.1) et (4.17)**) et $\Delta h_c[MJ/kg]$ chaleur de combustion (**tableau (3.1)**).

Pour le magasin RDC, la chaleur de combustion moyenne du carton et du bois est considérée car le combustible est constitué de ces deux matériaux en proportions égales, soit

$$\Delta h_c = 0.5 \times \Delta h_c^{bois} + 0.5 \times \Delta h_c^{carton} = 0.5 \times 17.7 + 0.5 \times 14.2 = 16MJ/kg \quad (5.10)$$

La **figure(5.2)** présente l'évolution des débits considérés en fonction du temps dans le magasin RDC.

Pour le magasin AC, la chaleur de combustion moyenne du carton, du bois et du polyéthylène (PE) est considérée, soit les trois constituants du combustible. On considère leurs proportions en masse comme étant égales :

$$\Delta h_c = \frac{\Delta h_c^{carton} + \Delta h_c^{PE} + \Delta h_c^{bois}}{3} = \frac{40 + 14.2 + 17.7}{3} = 24MJ/kg \quad (5.11)$$

La **figure(5.3)** présente l'évolution des débits considérés en fonction du temps dans le magasin AC.

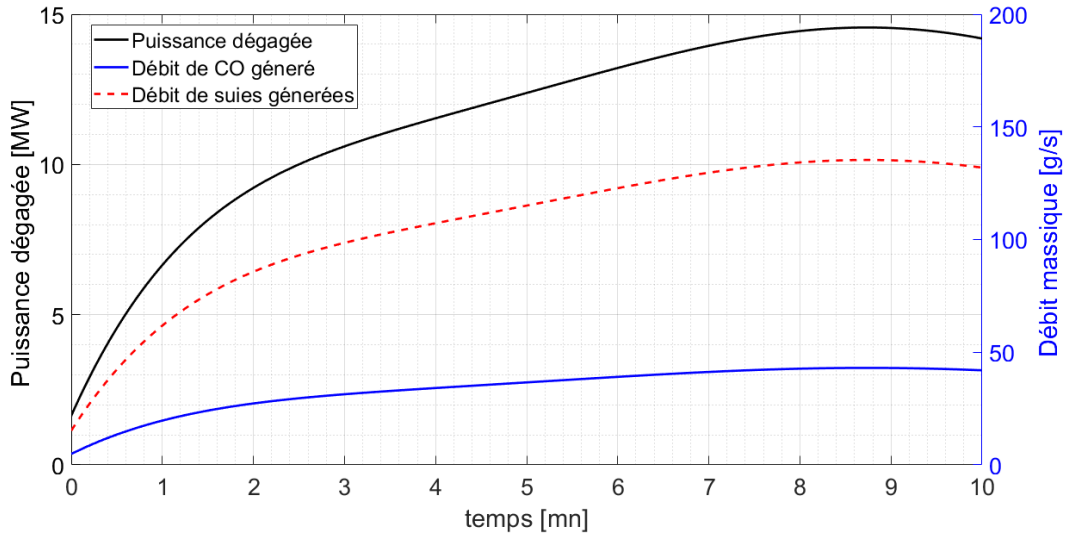


FIGURE 5.2 – Évolution des débits de CO et des suies à partir de la puissance - Magasin RDC

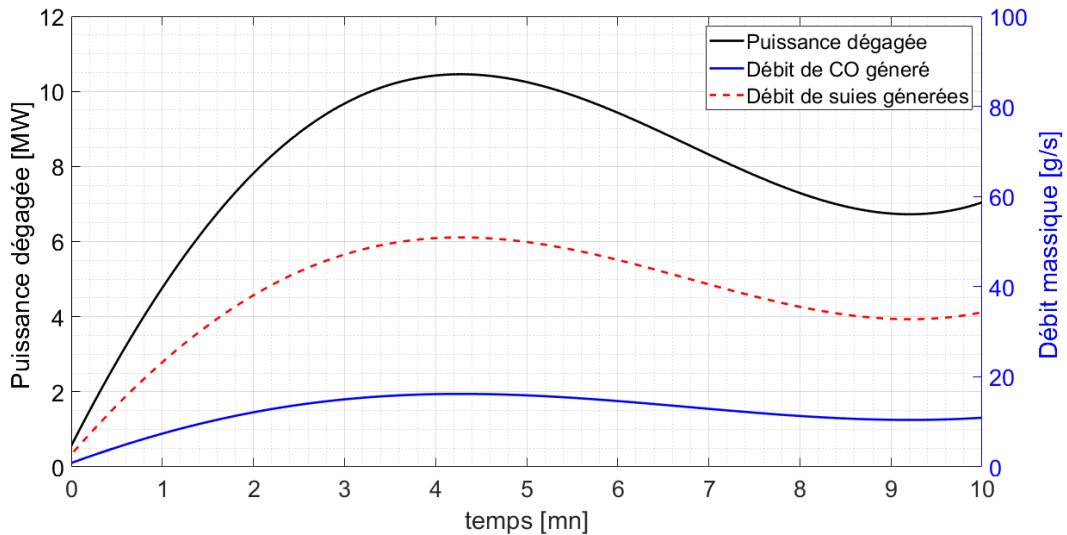


FIGURE 5.3 – Évolution des débits de CO et des suies à partir de la puissance - Magasin AC

Les débits de suie et de monoxyde de carbone calculés sont injectés dans le code FDS comme paramètres initiaux. Le domaine de calcul de chaque magasin est défini par un maillage unique constitué de cellules de taille uniforme ($25cm \times 25cm \times 25cm$). Le temps de simulation est de $10mn$.

Dans les **figures (5.4) et (5.5)** on présente l'évolution de la visibilité et de la toxicité des fumées (teneur en monoxyde de carbone). Les mesures sont effectuées par FDS à hauteur d'homme ($1.75m$). Les courbes tracées représentent selon le cas, la moyenne, le minimum et le maximum enregistrés par l'ensemble des capteurs dans l'un des magasins à chaque pas de temps. La valeur moyenne reflète la situation dans la plus grande partie du compartiment à un moment donné,

tandis que la valeur maximale / minimale est un cas particulier (à proximité de la source de fumées).

Pour rappel, le **seuil de visibilité minimal** retenu est de $10m$ et le **seuil maximal** pour la **teneur en monoxyde de carbone** est de $220ppm$. Pour le temps de simulation de $10mn$, les seuils établis pour la visibilité et la toxicité des fumées n'ont pas été dépassés. Au vu de ces résultats, le **fonctionnement** du système de désenfumage dans les deux magasins est jugé **satisfaisant**.

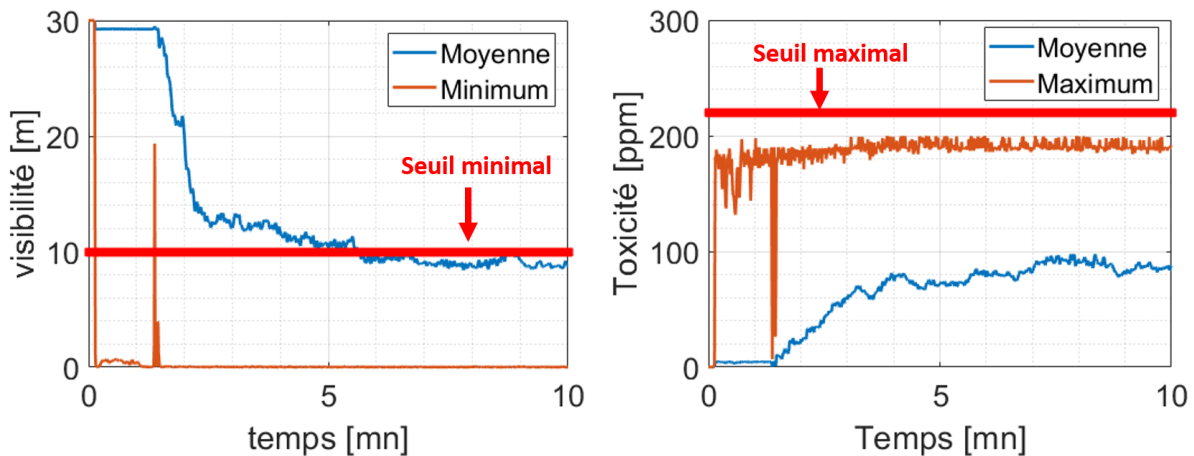


FIGURE 5.4 – Évolution des paramètres critiques - Magasin RDC

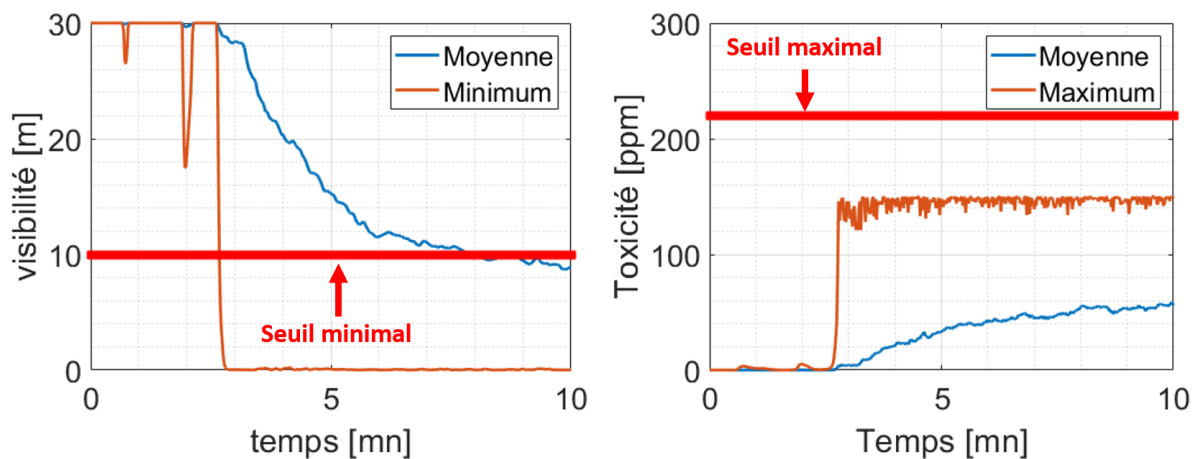


FIGURE 5.5 – Évolution des paramètres critiques - Magasin AC

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un outil d'aide à la décision a été proposé pour l'évaluation la sécurité incendie en place chez EL KENDI. Les résultats obtenus ont permis de préparer un plan d'action afin de bien orienter les efforts de l'entreprise.

Un déficit important a été constaté pour le système d'extinction automatique en raison des non conformités et du manque de maintenance. Le plan d'action proposé permettra d'augmenter son niveau de performance de 25 % à 75% tout en consolidant les autres moyens de lutte incendie.

La note de calcul présentée pour le système de désenfumage dans les deux magasins aidera l'entreprise a établir son cahier des charges.

Conclusion générale

Bilan

A travers le travail réalisé, nous avons pu répondre aux questions posés par l'entreprise, à savoir :

1. L'évacuation est-elle faisable si on tient compte de la dynamique de l'incendie ?
2. Les systèmes de lutte incendie sont-ils correctement exploités ?
3. Comment s'assurer que les systèmes de lutte incendie mis en œuvre par El Kendi restent performants et aptes à préserver l'intégrité de ses installations et la sécurité de son personnel dans la durée ?

Le travail s'est concentré sur les deux zones critiques recensés par l'étude de danger, à savoir, les deux magasins de stockage.

Pour la première question, l'étude a démontré que pour le magasin RDC, l'évacuation est faisable avant la remise en cause des critères de tenabilité, avec une marge de sécurité de $3mn$ jugée confortable. Ce qui n'est pas le cas pour le magasin AC (marge de sécurité nulle). Des mesures complémentaires seront donc nécessaire afin de rallonger le temps de survie et prévenir la propagation de l'incendie, dont la mise en place d'un système de désenfumage mécanique. Un dimensionnement a d'ailleurs été proposé et pourra aider l'entreprise à concevoir son cahier des charges.

Pour répondre à la seconde question, une évaluation des moyens de lutte incendie a été réalisée. Des insuffisances ont été relevées, notamment pour les systèmes d'extinction automatique. Elles portent sur la maîtrise documentaire et les opérations de maintenance et de vérification périodiques. Le plan d'action proposé permettra d'y remédier afin que les niveaux de performance de ces systèmes remontent.

Le protocole implémenté est une réponse à la troisième question. En effet, il permettra de suivre l'état de la sécurité incendie dans la durée pour qu'elle puisse remplir son rôle correctement. Il assure les fonctions de surveillance, planification des tâches et enregistrements des données.

Ainsi, les objectifs énoncés au début de ce travail ont été remplis avec succès.

Acquis

Ce travail nous a permis de nous familiariser avec l'ingénierie de la sécurité incendie et de toucher au vaste domaine du calcul numérique et plus précisément de la dynamique des fluides numérique. Nous avons été confrontés aux problématiques de l'optimisation du temps de calcul et la validité des résultats. Aussi, nos connaissances théoriques en sciences de l'ingénieur ont été enrichies en matière de thermodynamique, mécanique des fluides, chimie de la combustion...

De plus, nous avons pu nous exercer avec de nombreux logiciels et outils informatiques (calcul haute performance, cloud computing, développement web, dessin et conception assistés par ordinateur ...).

Perspectives

En guise de perspective, nous souhaitons l'adoption de l'application web proposée. Pour cela, un opérateur responsable de la mise à jour régulière des données doit être désigné et formé. En outre, nous suggérons d'encourager le personnel de l'entreprise à signaler les éventuels problèmes via le formulaire en ligne prévu. Ceci est de nature à renforcer la culture de la sécurité au sein d'EL Kendi et responsabiliser les collaborateurs car la sécurité est l'affaire de tous.

Enfin, et pour tirer pleinement parti des capacités de l'application, nous proposons d'y intégrer d'autres systèmes critiques pour la sécurité (tel que les chaudières) et d'élargir son champ d'intervention à la nouvelle usine d'EL Kendi.

Références bibliographiques

- [1] Etude de dangers de l'usine de production pharmaceutique avec sa nouvelle extension. *Préparée pour EL Kendi Industrie du médicament, filiale de MS Pharma, par le bureau d'étude SGS QUALITEST ALGERIE*. Alger, Nov 2017.
- [2] SGS QUALITEST ALGERIE. *SGS Algérie*[enligne].[consulté le 10/03/2020]. Disponible sur <https://www.sgs-algeria.com/>
- [3] Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster : Final Report. *National Construction Safety Team Act Reports (NIST NCSTAR)*. Dec 2005. <https://doi.org/10.6028/NIST.ncstar.1>
- [4] Kevin McGrattan et al. Fire Dynamics Simulator User's Guide. *National Institute of Standards and Technology*. Maryland, USA. NIST Special Publication 1019, Oct 2019. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>
- [5] Kevin McGrattan et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2 : Verification. *National Institute of Standards and Technology*. Maryland, USA. NIST Special Publication 1018-2, Oct 2019. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>
- [6] Kevin McGrattan et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3 : Validation. *National Institute of Standards and Technology*. Maryland, USA. NIST Special Publication 1018-3, Oct 2019. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>
- [7] Etude d'ingénierie de sécurité incendie pour GSE : Dans le cadre de la réhabilitation d'un bâtiment industriel. *Centre national de prévention et de protection (CNPP)*.
- [8] Morgan J. Hurley et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4th edition. *Society of Fire Protection Engineers*. New York, USA. Springer-Verlag. 2016. ISBN : 978-1-4939-2565-0. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- [9] European Pallet Association. Palette Europe EPAL. [en ligne]. [consulté le 15/03/2020]. Disponible sur <https://www.epal-pallets.org/eu-fr/porteur-de-charge/palette-europe-epal>
- [10] COUHERT, Carole. Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno-cellulosique et de ses composés : production de gaz de synthèse [en ligne]. Thèse de doctorat : Énergétique. Paris : École Nationale Supérieure des Mines, 2007. [Consultée le 4/02/2020]. Disponible à l'adresse <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00271260>

- [11] Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications (NUREG- 1824, EPRI 1011999). *U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), MD, USA* and *Electric Power Research Institute (EPRI), CA, USA*. 2007. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1824/> [consulté le 15/03/2020]
- [12] Lauris JOUBERT, Shihab RAHMAN. Étude spécifique d'ingénierie incendie pour le site FORD d'Estrées-Saint-Denis. *Institut national de l'environnement industriel et des risques*. Mars 2018. <https://www.ineris.fr> [consulté le 5/03/2020]
- [13] Thunderhead Engineering. PyroSim Fundamentals - Room fire. [en ligne]. [consulté le 15/03/2020]. Disponible sur : <https://support.thunderheadeng.com/files/RoomFireEx.pdf>
- [14] Norme ISO/TR 16738, Ingénierie de la sécurité incendie – évaluation du comportement et du mouvement des personnes. 2009
- [15] Norme ISO 13571 – composants dangereux du feu. 2012
- [16] Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage. Laboratoire central de la préfecture de police. Paris, 2017
- [17] Dougal Drysdale. An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley & Sons Ltd. Sep 2011. ISBN : 978-0-470-31903-1. <https://doi.org/10.1002/9781119975465.ch9>
- [18] T.E Waterman, Room flashover : Criteria and synthesis. *Fire Technology*. Vol 4, p25-31, 1968. <https://doi.org/10.1007/BF02588603>
- [19] Amazon Web Services - Fournisseur de machines de calcul haute performance. <https://aws.amazon.com/ec2/> [consulté le 20/01/2020]
- [20] Jukka Hietaniemi, Esko Mikkola. Design Fires for Fire Safety Engineering. *VTT Technical Research Centre of Finland*. 2010. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W139.pdf> [consulté le 12/06/2020]
- [21] Björn Karlsson, James G. Quintiere. Enclosure Fire Dynamics. USA : CRC Press, 2000. 336 pages. ISBN 9780429122675. <https://doi.org/10.1201/9781420050219>
- [22] Norme APSAD R1 : Règle d'installation extinction automatique à eau type sprinkler. Mars 2009

- [23] Pathfinder User's Guide. *Thunderhead Engineering*. Manhattan, KS 66502 USA. 2018.
- [24] Guillaume LEROY, Etienne CATRY. Etude de ruine d'un bâtiment de stockage sur la commune de Croissy-Beaubourg. *Institut national de l'environnement industriel et des risques*. Mai 2017.
- [25] Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos. Fires, explosions, and toxic gas dispersions : Effects calculation and risk analysis. FL, USA : CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 349 pages. ISBN 978-1-4398-2675. <https://doi.org/10.1002/prs.11496>
- [26] EN 1993-1-2, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu. Bruxelles : CEN, Novembre 2002.
- [27] Instruction technique relative au désenfumage des ERP. Arrêté du 22 Mars 2004, France.
- [28] Mohammad Tabarra, Davar Abi-Zadeh, Bulent Ozince. Verifying the performance of emergency ventilation systems by cold smoke tests. *16th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation Fire in Tunnels*. Sept 2009. Seattle, USA. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2895.5602>
- [29] Tables avec les constants mecanogeométriques des profils d'acier. *Projectes i disseny incafe, SLU*. [en ligne]. [consulté le 15/03/2020]. Disponible sur <https://www.incafe2000.com>

Liste des annexes

Annexe A : Description de l'usine El Kendi

Annexe B : Annexe B Exemple de fichier input du code FDS

Annexe C : Note de calcul pour le système de désenfumage

Annexe D : Aperçu de l'interface du framework

Annexe A : Description de la structure des magasins

La description de la structure du bâtiment se base sur l'analyse des plans fournis par El Kendi et de prise de photos sur site. Certains plans concernant les dimensions d'éléments structurels étant manquants, ces éléments ont été remplacés par des éléments de constitution proche dont les plans étaient à disposition. La structure métallique du bâtiment comporte 4 files dans le sens de la longueur du bâtiment et 8 files dans le sens de la largeur, **figures (A.1) et (A.2)**

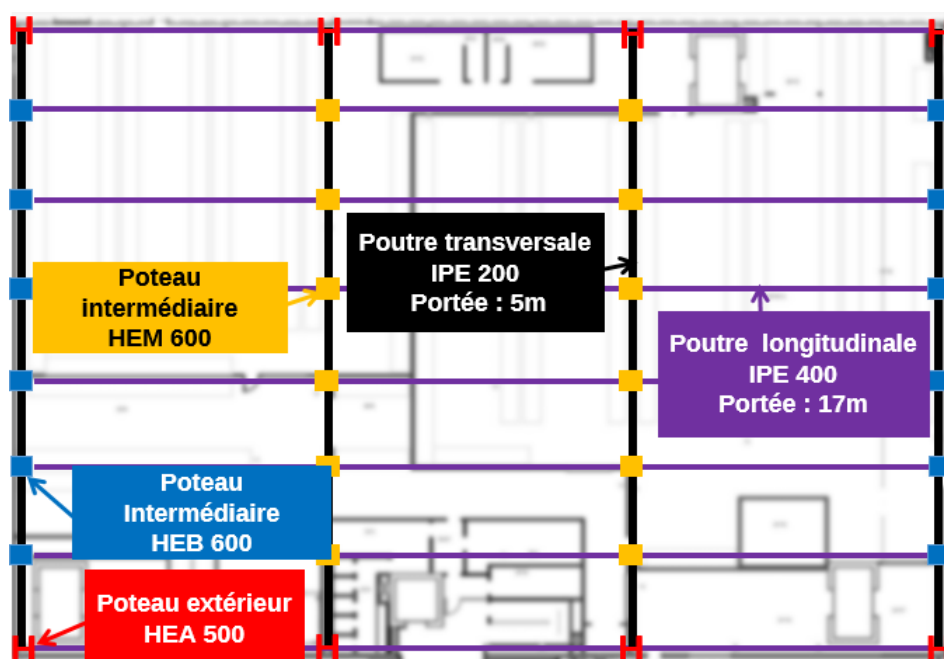


Figure A.1 - Aperçu de la structure métallique - Magasin RDC

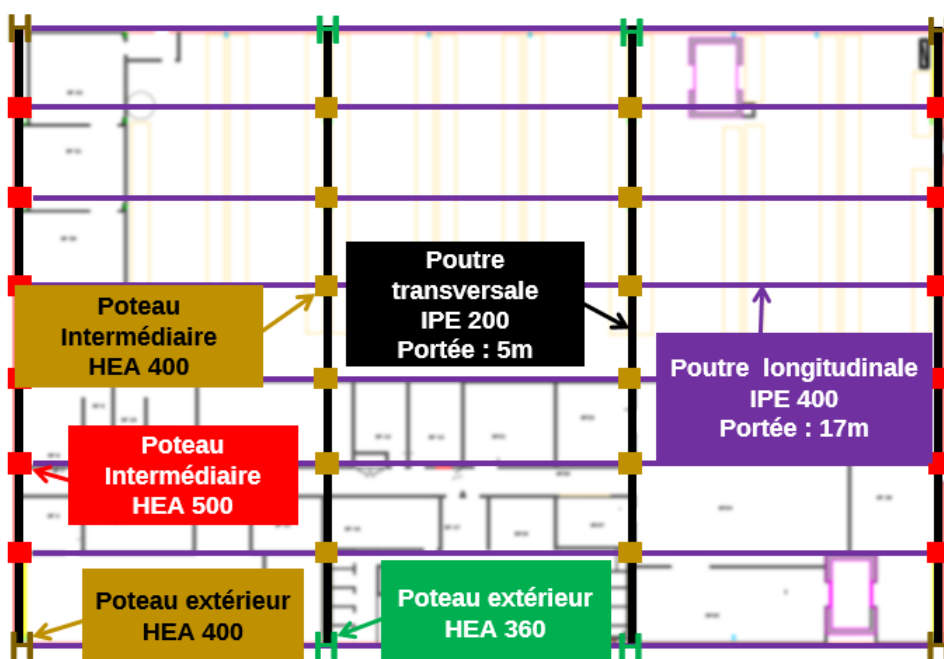


Figure A.2 - Aperçu de la structure métallique - Magasin AC

On donne les dimensions des différents profils, **figures (A.3) et (A.4)**, **tableaux (A.1) et (A.2)** [29]

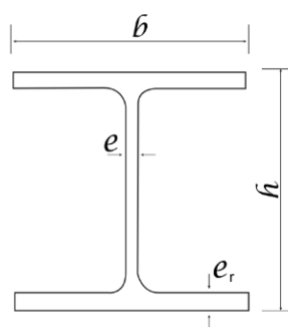


Figure A.3 - Cotation d'un profil en H

Tableau A.1 - Valeurs des cotations des profils en H

Profil	h (mm)	b (mm)	e (mm)	e_r (mm)	Poids (kg)
HEA500	490	300	12,0	23,0	159
HEA400	390	300	11,0	19,0	128
HEA360	300	350	10	17,5	115
HEB600	600	300	15,5	30,0	217
HEM600	620	305	21,0	40,0	292

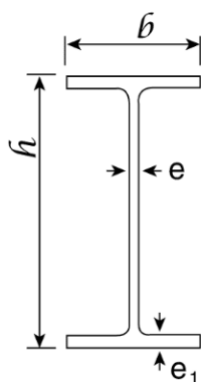


Figure A.4 - Cotation d'un profil en I

Tableau A.2 - Valeurs des cotations des profils en I

Profil	h (mm)	b (mm)	e (mm)	e_r (mm)	Poids (kg)
IPE400	400	180	8,6	13,5	68
IPE200	200	100	5,6	8,5	23

Annexe B : Exemple de fichier input du code FDS

```
1 ! ---- Dur e de la simulation et pas de temps initial ----
2 &TIME T_END=1800, DT=0.313/
3 ! ---- MAILLAGE ----
4 &MESH ID='mesh', IJK=477,325,57, ...
      XB=0.032436,52.532436,-35.749672,3.283588E-4,7.5,13.75/
5 ! ---- Reaction de combustion ----
6 &REAC ID='FUEL_COMBUSTION',
7     FUEL='REAC_FUEL',
8     FORMULA='C1H4',
9     SOOT_H_FRACTION=0.1,
10    CO_YIELD=0.042,
11    SOOT_YIELD=0.132/
12 ! ---- Tete de sprinkler ----
13 &PROP ID='Heat_11',
14     QUANTITY='LINK TEMPERATURE',
15     ACTIVATION_TEMPERATURE=68.0,
16     RTI=26.0/
17 ! ---- Detecteur de fumees ----
18 &PROP ID='Cleary Photoelectric P1',
19     QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION',
20     ALPHA_E=1.8,
21     BETA_E=-1.0,
22     ALPHA_C=1.0,
23     BETA_C=-0.8/
24 ! ---- Definition des capteurs ----
25 &DEVC ID='z_Device_T_00', QUANTITY='TEMPERATURE', ...
      XYZ=3.373351,-1.7525,9.25, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
26 ! ---- .... etc ----
27 &DEVC ID='z_Device_RAD_00', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', ...
      XYZ=3.373351,-1.7525,9.25, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
28 ! ---- .... etc ----
29 &DEVC ID='z_Device_CO_00', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON ...
      MONOXIDE', XYZ=3.373351,-1.7525,9.25, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
30 ! ---- .... etc ----
31 &DEVC ID='z_Device_CO2_00', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON ...
      DIOXIDE', XYZ=14.928,-19.051,9.25, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
32 ! ---- .... etc ----
33 &DEVC ID='y_SPK_T_sensor__00', QUANTITY='TEMPERATURE', ...
      XYZ=24.299703,-7.06989,13.72/
34 ! ---- .... etc ----
35 &DEVC ID='y_SPK_SD_sensor__00', PROP_ID='Smoke_00', ...
      XYZ=24.399703,-7.06989,13.72/
36 ! ---- .... etc ----
37 &DEVC ID='LAYER->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT', ...
      XB=38.0,38.0,-13.0,-13.0,7.5,13.75/
38 &DEVC ID='LAYER->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE', ...
      XB=38.0,38.0,-13.0,-13.0,7.5,13.75/
```

```

39 &DEVC ID='LAYER->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE', ...
    XB=38.0,38.0,-13.0,-13.0,7.5,13.75/
40 ! ---- .... etc ----
41 &DEVC ID='stairs_smk_detector_1', PROP_ID='Cleary Photoelectric P1', ...
    XYZ=28.723381,-33.42739,13.75, LATCH=.FALSE./
42 ! ---- .... etc ----
43 ! ---- Definition des mat riaux ----
44 &MATL ID='CONCRETE',
45     SPECIFIC_HEAT=1.04,
46     CONDUCTIVITY=1.8,
47     DENSITY=2280.0/
48 &MATL ID='PU_FOAM',
49     SPECIFIC_HEAT=1.7,
50     CONDUCTIVITY=0.05,
51     DENSITY=28.0/
52 &MATL ID='STEEL',
53     SPECIFIC_HEAT=0.46,
54     CONDUCTIVITY=45.8,
55     DENSITY=7850.0,
56     EMISSIVITY=0.95/
57 &MATL ID='Cardboard',
58     SPECIFIC_HEAT=1.45,
59     CONDUCTIVITY=0.3,
60     DENSITY=23.6/
61 &MATL ID='Wood',
62     SPECIFIC_HEAT=2.85,
63     CONDUCTIVITY=0.3,
64     DENSITY=640.0/
65 ! ---- Definition des surfaces ----
66 &SURF ID='Floor_slab',
67     RGB=255,255,255,
68     TRANSPARENCY=0.309804,
69     BACKING='VOID',
70     MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
71     MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
72     THICKNESS(1)=0.25/
73 &SURF ID='Sandwich_panels',
74     RGB=255,222,182,
75     BACKING='VOID',
76     MATL_ID(1,1)='PU_FOAM',
77     MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
78     THICKNESS(1)=0.1/
79 &SURF ID='Steel',
80     COLOR='GRAY 40',
81     BACKING='VOID',
82     MATL_ID(1,1)='STEEL',
83     MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
84     THICKNESS(1)=0.1/
85 &SURF ID='cardboard_boxes',
86     RGB=240,96,0,

```

```

87     HRRPUA=200.0,
88     TAU_Q=-144.0,
89     IGNITION_TEMPERATURE=250.0,
90     BURN_AWAY=.TRUE.,
91     BACKING='VOID',
92     MATL_ID(1,1)='Cardboard',
93     MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
94     THICKNESS(1)=0.1,/
95 &SURF ID='PE_cardboard_boxes',
96     RGB=0,153,153,
97     HRRPUA=389.0,
98     TAU_Q=-190.0,
99     IGNITION_TEMPERATURE=300.0,
100    BURN_AWAY=.TRUE.,
101    BACKING='VOID',
102    MATL_ID(1,1)='Cardboard',
103    MATL_ID(2,1)='PE',
104    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
105    MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
106    THICKNESS(1:2)=0.1,0.5/
107 ! ---- Definition des plans de mesure ----
108 &BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
109 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=9.25/
110 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=9.25/
111 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE', PBZ=9.25/
112 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', PBZ=9.25/
113 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=13.72/
114 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=-33.311749/
115 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=-33.311749/
116 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE', PBZ=-33.311749/
117 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', PBZ=-33.311749/
118 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=36.376351/
119 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=35.248/
120 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=29.900351/
121 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=27.552/
122 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=33.604/
123 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=23.853351/
124 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=40.235/
125 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=42.583351/
126 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=45.578/
127 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=22.665375/
128 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=22.500027/
129 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=21.375/
130 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=17.523736/
131 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=15.147915/
132 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=12.376266/
133 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=9.997915/
134 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=7.226266/
135 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.847915/
136 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=2.006351/

```

```

137 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-13.997827/
138 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-11.44725/
139 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-25.150717/
140 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-0.5/
141 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-28.192068/
142 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-32.574203/
143 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-20.439593/
144 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=-17.578173/
145 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, ...
      FYI='Temperature'/
146 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, FYI='O2'/
147 &SLCF QUANTITY='VISIBILITY', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, ...
      FYI='Visibility'/
148 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, FYI='CO2'/
149 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, FYI='CO'/
150 &SLCF QUANTITY='HRRPUV', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, FYI='HRRPUV'/
151 &SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='REAC_FUEL', ...
      XB=-0.032465,52.511027,-35.992232,1.104673E-4,7.502,13.75, ...
      FYI='REAC_FUEL'/
152 &DEVC ID='SURFACE INTEGRAL', QUANTITY='NET HEAT FLUX', ...
      SPATIAL_STATISTIC='SURFACE INTEGRAL', ...
      XB=0.331539,0.821539,-30.592383,-35.227313,13.35,13.75/
153 &TAIL /

```

Annexe C : Note de calcul pour le système de désenfumage

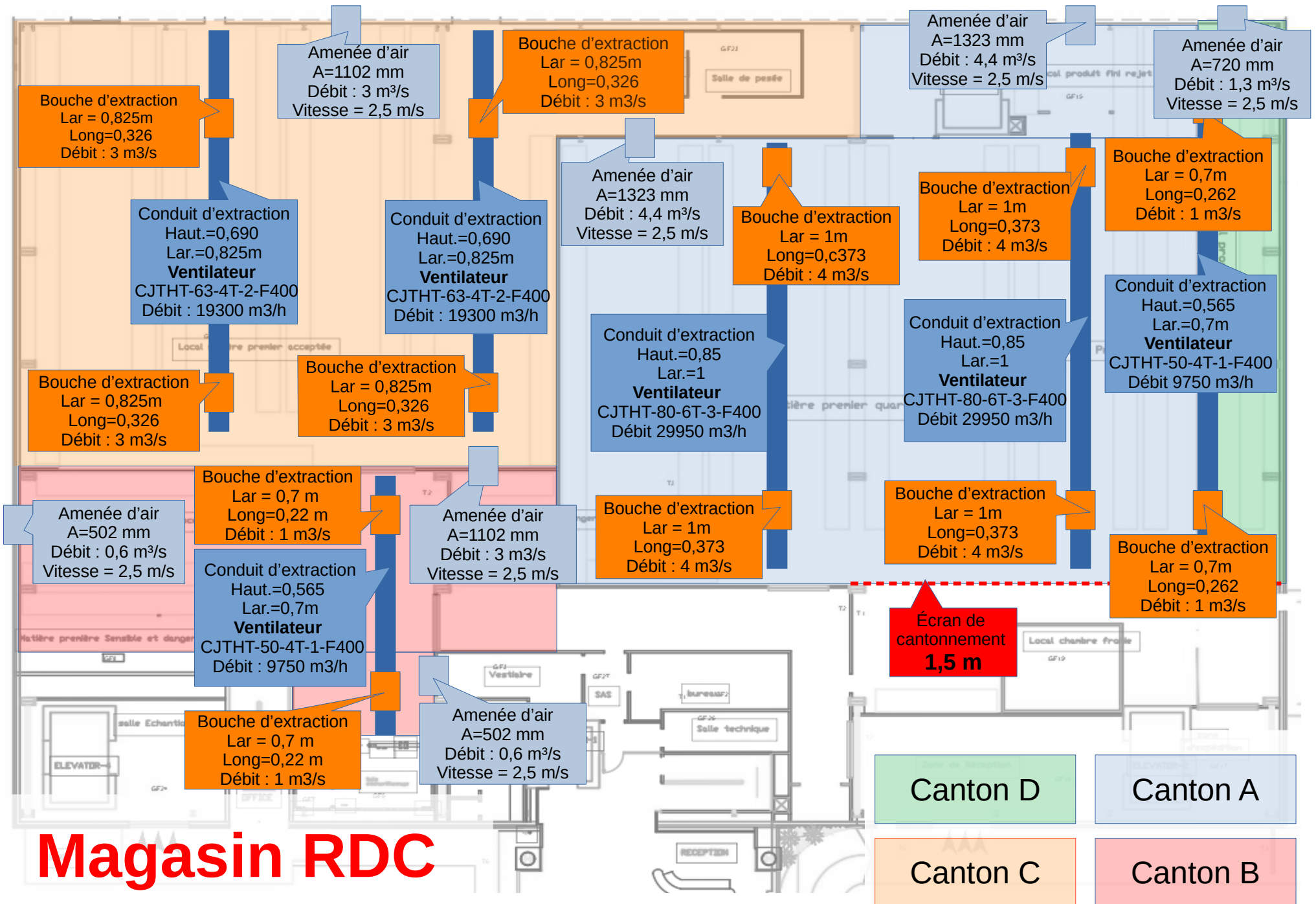
Les notes de calcul pour les deux magasins sont présentées dans les tableaux (C.1) et (C.2).

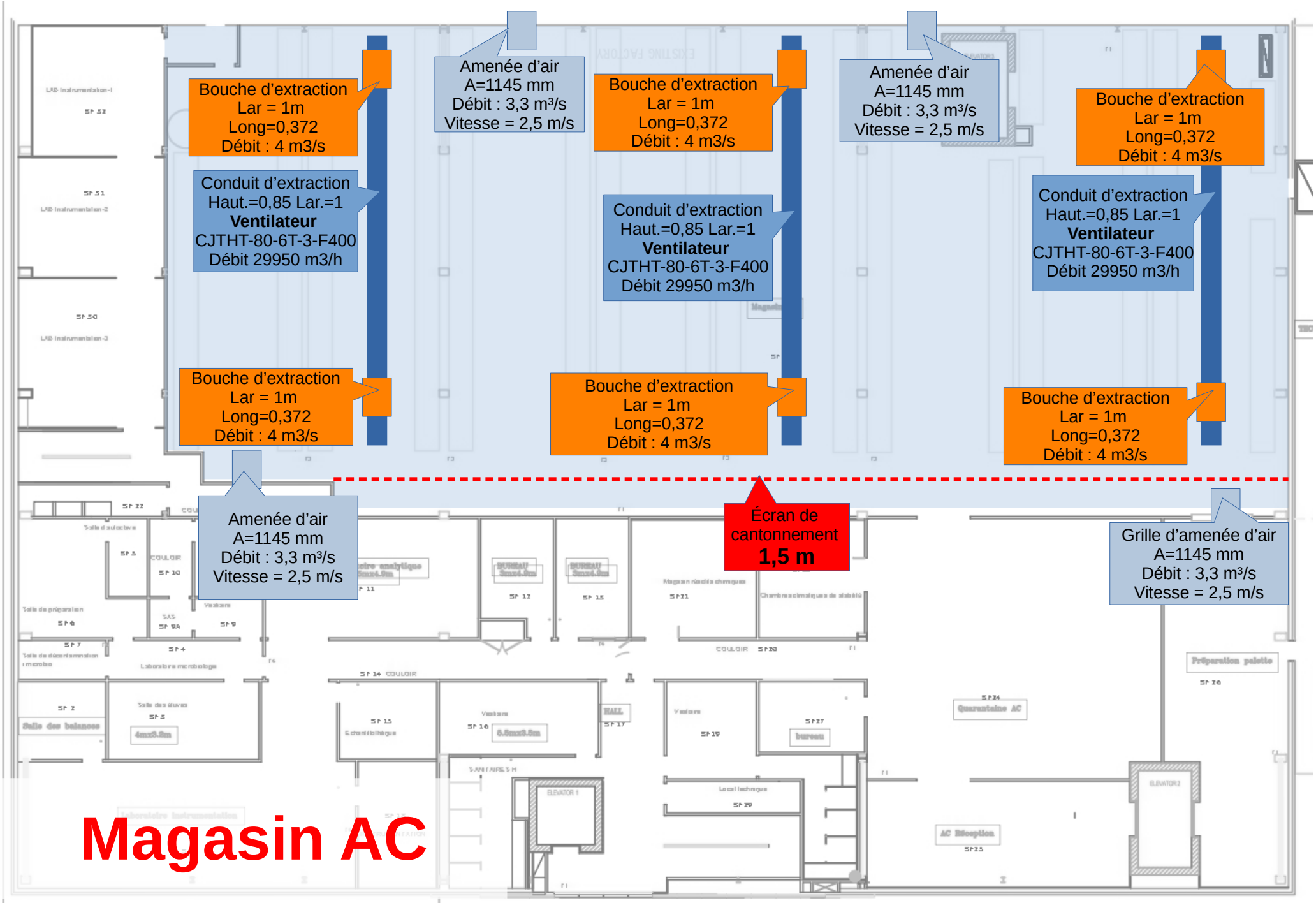
Tableau C.1 Note de calcul désenfumage - Magasin RDC

Magasin RDC				
	Canton A	Canton B	Canton C	Canton D
Surface [m ²]	608	90	422	175
Volume [m ³]	3648	540	2532	525
Débit extraction [m ³ /s]	12.16	1.8	8.44	1
Bouches extraction	Nb : 4 Section : 1000x373 [m ²] Débit : 4 [m ³ /s]	Nb : 2 Section : 700x262 [m ²] Débit : 1 [m ³ /s]	Nb : 4 Section : 825x326 [m ²] Débit : 3 [m ³ /s]	Nb : 1 Section : 700x220 [m ²] Débit : 1 [m ³ /s]
Election ventilateur	CJTHT-80 -6T-3-F400	CJTHT-50 -4T-1-F400	CJTHT-63 -4T-2-F400	CJTHT-50 -4T-1-F400
Débit amenée d'air [m ³ /s]	9	1	6	1
Grilles amenée d'air	Nb : 2 Vitesse 2.5 [m/s] Débit 4.4 [m ³ /s] Surface 1.8 [m ²]	Nb : 1 Vitesse 2.5 [m/s] Débit 1.3 [m ³ /s] Surface 0.5 [m ²]	Nb : 2 Vitesse 2.5 [m/s] Débit 3 [m ³ /s] Surface 1.2 [m ²]	Nb : 1 Vitesse 2.5 [m/s] Débit 1 [m ³ /s] Surface 0.3[m ²]

Tableau C.2 Note de calcul désenfumage - Magasin AC

Magasin AC	
	Canton A
Surface [m ²]	910
Volume [m ³]	5460
Débit extraction [m ³ /s]	18.2
Bouches extraction	Nb : 6 Section :1000x372 [m ²] Débit : 4 [m ³ /s]
Election ventilateur	CJTHT-80-6T-3-F400
Débit amenée d'air [m ³ /s]	13
Grilles amenée d'air	Nb : 4 Vitesse : 2.5 [m/s] Débit : 3.3 [m ³ /s] Surface :1.3 [m ²]





Annexe D : Aperçu de l'interface du framework

