

République Algérienne Démocratique 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

**Conception d'un logiciel de management
du risque incendie et modélisation du feu
par un modèle à zones**

Rania DJELAL

Sous la direction de :

M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A à l'ENP
M. M'hamed BOUSBAI	Maître de Conférences B à l'ENP
M. Badreddine BOUSBAI	EHS Country Lead à SiemensEnergy

Présenté et soutenu publiquement le 9 Juillet 2024

Composition du Jury:

Président	M. F. LEGUEBEDJ	Maître de Conférences B à l'ENP
Examineurs	Mme. S. BENTAALA	Maître de Conférences B à l'ENP
Encadrants	M. A. DJILI	Maître Assistant A à l'ENP
	M. M. BOUBAKEUR	Maître Assistant A à l'ENP
	M. M. BOUSBAI	Professeur à l'ENP
	M. B. BOUSBAI	EHS Country Lead à SiemensEnergy

ENP 2024

République Algérienne Démocratique 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

**Conception d'un logiciel de management
du risque incendie et modélisation du feu
par un modèle à zones**

Rania DJELAL

Sous la direction de :

M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A à l'ENP
M. M'hamed BOUSBAI	Maître de Conférences B à l'ENP
M. Badreddine BOUSBAI	EHS Country Lead à SiemensEnergy

Présenté et soutenu publiquement le 9 Juillet 2024

Composition du Jury:

Président	M. F. LEGUEBEDJ	Maître de Conférences B à l'ENP
Examineurs	Mme. S. BENTAALA	Maître de Conférences B à l'ENP
Encadrants	M. A. DJILI	Maître Assistant A à l'ENP
	M. M. BOUBAKEUR	Maître Assistant A à l'ENP
	M. M. BOUSBAI	Professeur à l'ENP
	M. B. BOUSBAI	EHS Country Lead à SiemensEnergy

ENP 2024

ملخص: الهدف من هذا العمل هو تحسين إدارة مخاطر الحرائق من خلال دراسة دقيقة وعلمية للظاهرة، لتحل محل النهج الوصفي المستخدم حالياً. وتحقيقاً لهذه الغاية، تم تطوير برنامج لمحاكاة الحرائق لكل منطقة. لتسهيل الوصول إلى المعلومات، تم بناء قاعدة بيانات للعديد من أنواع الوقود. يشتمل النموذج على حسابات متقدمة تجمع بين نظام المعادلات التفاضلية والارتباطات التجريبية وتفسير آثار الظاهرة، مما يسمح للمستخدم بقراءة اللحظات الرئيسية بسهولة، مثل وقت حدوث الوميض وفقدان الرؤية والوقت المتاح للإخلاء. ولتشغيل البرنامج، تم تطوير خوارزمية باستخدام عدة لغات برمجة. تم اختبار نتائج العمل مع أنواع مختلفة من الوقود لتحديد مجال صلاحية النموذج وتحديد مجالات التحسين في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: نمذجة الحرائق، هندسة السلامة من الحرائق، نموذج المنطقة

Abstract: The aim of this work is to improve fire risk management through a rigorous and scientific study of the phenomenon, replacing the descriptive approach currently used. To this end, a zonal fire simulation software package has been developed. To facilitate access to information, a multi-fuel database was built. The model incorporates advanced calculations combining a system of differential equations, empirical correlations and an interpretation of the effects of the phenomenon, enabling the user to easily read off key moments, such as flashover time, loss of visibility and time available for evacuation. To make the software operational, an algorithm using several programming languages was developed. The results of the work were tested with different fuels to determine the model's range of validity and identify areas for future improvement.

Keywords: Fire modeling, Fire safety engineering, Zone model

Résumé : Ce travail vise à améliorer la gestion du risque incendie par une étude rigoureuse et scientifique du phénomène, en remplacement de l'approche descriptive actuellement utilisée. Pour ce faire, un logiciel de simulation d'incendie par zones a été développé. Afin de faciliter l'accès à l'information, une base de données de plusieurs combustibles a été construite. Le modèle intègre des calculs avancés combinant un système d'équations différentielles, des corrélations empiriques et une interprétation des effets du phénomène, permettant à l'utilisateur de lire aisément les moments clés, tels que le temps d'occurrence du flashover, la perte de visibilité et le temps disponible pour l'évacuation. Pour rendre le logiciel opérationnel, un algorithme utilisant plusieurs langages de programmation a été élaboré. Les résultats des travaux ont été testés avec différents combustibles pour déterminer le domaine de validité du modèle et identifier les points d'amélioration futurs.

Mots-clés : Modélisation incendie, Ingénierie de la sécurité incendie, Modèle de zones

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, qui m'a toujours guidé et continue de me donner la force pour poursuivre mes objectifs.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, M. Boubakeur, Chef du département QHSE-GRI à l'ENP, et M. Bousbai, Maître de Conférences B à l'ENP, pour avoir cru en ce projet et m'avoir généreusement offert leur temps et leur expertise.

Je remercie chaleureusement M. Badreddine Bousbai, HSE Lead à Siemens qui n'a pas hésité à me donner cette belle opportunité de réaliser ce projet et qui m'a délégué cette motivation d'innover dans le QHSE.

Je saisis également cette occasion pour adresser mes profonds remerciements aux personnes qui m'ont été d'une grande aide durant ce projet de fin d'étude et qui leurs passions dans leurs domaines respectifs m'a été une source d'inspiration Mme. Fatima Belabbes et M. Younes TOUMI.

Mes remerciements vont aussi aux membres du Jury qui m'ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce travail M. Leguebedj, Mme. Bentaala et M. Djili.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les enseignants du département de QHSE-GRI de l'École Nationale Polytechnique, qui ont contribué à ma formation durant ces trois années. Grâce à eux, nous avons pu découvrir le vaste monde de cette spécialité. Merci pour tout ce que j'ai appris grâce à vous.

Dédicaces

Je dédie ce travail aux personnes qui ont cru en moi avant que je ne le fasse moi-même,

A ma petite maman, celle qui son regard seul me donne le courage de poursuivre le chemin,

A mon père, qui me soutient depuis le début,

A mes sœurs, Nesrine et Sissi, qui sans leur soutien ce parcours aurait été beaucoup plus difficile,

A mon frère, qui est loin des yeux mais très près du cœur,

A mon petit cœur, Enzo, qui me remet le sourire même dans les moments les plus durs,

A ma meilleure, Hadil, avec qui je partage mes doutes et mes succès,

A cette belle personne, Hiba, qui peut rendre des moments difficiles un magnifique moment,

À toutes ces belles âmes dont les chemins ont croisé le mien à Polytech ou ailleurs,

Et enfin, à Alilou, dont la gentillesse m'a marqué à tout jamais.

Table des matières

Introduction générale.....	14
Chapitre 1 Généralités et Contexte.....	16
1.1. Introduction :	17
1.2. Présentation de l'entreprise :	17
1.3. Siemens Energy :	17
1.4. L'Ingénierie de Sécurité Incendie :	18
1.4.1. Définition de l'Ingénierie de Sécurité Incendie :	18
1.4.2. Méthodologie de l'Ingénierie de Sécurité Incendie :	18
1.4.3. Définition générale de la combustion :.....	19
1.4.4. Les effets d'un Incendie :	20
1.4.5. Les feux Industriels :	20
1.5. Les seuils critiques d'après l'Ingénierie de Sécurité Incendie :	21
1.6. Phénoménologie d'un feu de compartiment :.....	22
1.6.1. Phénomènes redoutés :	23
1.7. Conclusion :.....	24
Chapitre 2 Synthèse Bibliographique.....	25
2.1. Introduction :	26
2.2. Modélisation du feu de compartiment :.....	26
2.3. Etat de l'art de la simulation numérique de l'incendie :.....	27
2.3.1. Modèles nominaux et paramétriques :	28
2.3.2. Modèles avancés :	30
Chapitre 3 Fondement mathématique du modèle à zones.....	36
3.1. Introduction :	37
3.2. Equations du modèle :	38
3.3. Combustion :.....	39
3.3.1. Taux de chaleur dégagée (HRR) :.....	39
3.3.2. Réaction de combustion en phase gazeuse :.....	43
3.3.3. Evolution du HRR en fonction du temps :.....	44

3.3.4.	<i>HRRconv</i> et <i>HRRrad</i> :	46
3.3.5.	Combustion sous-ventilé	47
3.3.6.	Combustion ventilée :	47
3.4.	Modèle du panache:	48
3.5.	Transfert de chaleur:	50
3.5.1.	Calcul du transfert par convection :	50
3.6.1.	Température au plafond :	51
3.6.2.	Flux thermique radiatif au sol :	52
3.7.	Etude des effets de l'incendie :	54
3.7.1.	La visibilité :	54
3.7.2.	Temps d'évacuation :	56
3.8.	Moyens de lutte anti-incendie :	56
3.8.1.	Utilisation du référentiel APSAD :	57
3.8.2.	Extincteurs :	57
3.8.3.	Robinets d'Incendie Armés (R.I.A) :	59
Chapitre 4 : Développement et Résultats		62
4.1.	Introduction :	63
4.2.	Entrées et Sorties du modèles :	63
4.2.2.	Sorties du modèle :	63
4.3.	Base De Données :	64
4.4.	Développement du modèle :	64
4.4.1.	Langages de développement du modèle :	64
4.4.2.	Résolution du système d'équations différentielles sur Python :	66
4.5.	Validation du modèle :	66
4.5.1.	Essai sur un feu de GPL :	67
4.5.2.	Essai sur feu d'hydrocarbure :	70
4.5.4.	Essai sur le PMMA :	74
4.5.5.	Influence de l'épaisseur de liquide combustible déversé (cas du kérosène) :	76
4.6.	Synthèse des essais :	80
4.7.	Conclusion :	81
5.1.	Introduction :	84
5.2.	Entreprise Saas :	84
5.3.	Indicateurs de performance Saas :	84

5.3.1. ARR et MRR :.....	84
5.3.2. Churn :.....	85
5.3.3. Coût d'Acquisition Clients :.....	85
5.3.4. LTV ou Life Time Value:	85
5.4. Business Model Canvas :.....	86
5.5. Conclusion :.....	88
Conclusion générale	90
Références bibliographiques	92
Annexe A : Aperçu de la Base de Données combustibles du modèle	96
Annexe B: Business Model Canvas de la startup Saas	97
Annexe C: interface utilisateur du logiciel	98

Liste des figures

Figure 1. 1: Objectifs de la démarche d'ingénierie de sécurité incendie	19
Figure 1. 2: Schéma du mécanisme de l'incendie	20
Figure 1. 3 : Phases d'un feu de compartiment. μ_{fo} et μ_{fd} représentent les durées moyennes de flashover et de feu pleinement développé	22
Figure 2. 1: Aperçu d'un exemple de résultats réalisé par Hazard I sur un feu de graisse dans une cuisine familiale.....	27
Figure 2. 2: Les courbes des feux nominaux de la température en fonction du temps	29
Figure 2. 3: Courbe paramétrique selon l'Eurocode 1	30
Figure 2. 4: Schéma représentatif du modèle à zones	31
Figure 2. 5: Exemple de discrétisation utilisée par un modèle à champ. Les mailles sont ici colorées uniformément pour montrer que les grandeurs réellement manipulées par le modèle sont constantes au sein de chacune d'entre elles.....	33
Figure 2. 6: Technique de la simulation à grandes échelles LES.....	34
Figure 3. 1: Diagramme d'échanges entre zones dans un local en feu	37
Figure 3. 2: Calorimètre à cône à petite échelle.....	40
Figure 3. 3: Schéma simplifié de la pyrolyse et la combustion.....	42
Figure 3. 4: Flux de chaleur radiatif et convectif de la flamme à différentes fractions massiques d'oxygène pour la combustion en régime permanent de plaques de polypropylène de 100 × 100 mm et de 25 mm d'épaisseur	46
Figure 3. 5: Comparaison entre les corrélations de McCaffrey et Heskestad pour le calcul de l'entraînement du panache	49
Figure 3. 6: Algorithme développé pour le calcul du débit d'entraînement	50
Figure 3. 7: Algorithme développé pour le calcul de la température au plafond.....	52
Figure 3. 8: Pouvoir émissif efficace de la flamme en fonction de la surface du feu, déterminé par Shokri et Beyler.....	53
Figure 3. 9: Algorithme développé pour le calcul de la visibilité	56
Figure 3. 10 : Algorithme développé pour la vérification de la conformité des extincteurs....	59
Figure 4. 1: Logo de Structured Query Language SQL	64
Figure 4. 2: Logo du langage de programmation Python.....	65
Figure 4. 3: Logo du Langage de balisage HTML	65
Figure 4. 4: Logo du langage feuilles de style en cascade CSS	65
Figure 4. 5: Logo du langage JavaScript.....	66
Figure 4. 6: Ligne de commande de la Résolution du système d'équations différentielles sur Python.....	66
Figure 4. 7: Entrées du modèle pour une simulation d'un feu de GPL	67
Figure 4. 8: Température de la zone supérieure du feu de GPL.....	68
Figure 4. 9 : HRR max calculé et flux thermique radiatif au sol	68
Figure 4. 10: Représentation graphique de l'évolution du taux de chaleur dégagée par un incendie de GPL	69
Figure 4. 11: Température au plafond pour le feu de GPL	70
Figure 4. 12: Prédiction de l'occurrence du Flashover pour l'incendie de GPL.....	70

Figure 4. 13: Température de la zone supérieure en fonction du temps pour le feu d'huile de transformateur	71
Figure 4. 14: Courbe d'évolution du HRR pour un feu d'huile de transformateur	71
Figure 4. 15: Résultat de l'occurrence du Flashover pour un feu d'huile de transformateur de 1.45 m ²	72
Figure 4. 16: Température au plafond pour le feu d'huile de transformateur.....	72
Figure 4. 17: Visibilité minimale enregistrée par le modèle pour le feu d'hydrocarbure.....	73
Figure 4. 18: Comparaison entre la visibilité minimale détecté pour le GPL et l'Huile de transformateur	74
Figure 4. 19: Evolution de la température de la couche haute suite au feu de PMMA.....	75
Figure 4. 20: Production de suies et de CO par un feu de PMMA.....	75
Figure 4. 21: Flux radiatif au sol pour un feu de PMMA de surface 1.06m ²	75
Figure 4. 22:Température au plafond en fonction du temps pour un feu de PMMA.....	76
Figure 4. 23: Détection de Flashover pour un feu de PMMA.....	76
Figure 4. 24: Courbe d'évolution de la température de la couche haute d'un feu de Kérosène (1.5m ²).....	77
Figure 4. 25: Température au plafond lors du feu de Kérosène de diamètre (3.8m ²).....	78
Figure 4. 26: Température de la couche haute du feu de kérosène de diamètre (3.8m ²)	78
Figure 4. 27: Hauteur de flamme de kérosène (3.8m ²).....	79
Figure 4. 28: Visibilité minimale feu de kérosène de3.8m ²	79
Figure 4. 29: Hauteur de flamme de kérosène (0.8m ²).....	79
Figure 4. 30: Hauteur de flamme des différents combustibles à 0.01m épaisseur.....	81
Figure 4. 31: Différentes Températures max pour les différents combustibles	81

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Sécurité des personnes : critères d'acceptation liés à la vulnérabilité.....	21
Tableau 2. 1: Modèles existants pour la modélisation des feux	28
Tableau 2. 2: Historique des modèles à zones existants	32
Tableau 3. 1: Système d'équations différentielles du modèle	39
Tableau 3. 2: Data pour l'estimation du taux de combustion par Babrauskas.....	43
Tableau 3. 3: Taux de combustion correspondant à différentes vitesses de combustion.....	45
Tableau 3. 4: Les principales Normes de " APSAD" d'installation pour les équipements et systèmes de sécurité incendie.....	57
Tableau 3. 5: Adaptation des extincteurs aux classes de feux A, B, C et F selon l'APSAD R4	58
Tableau 3. 6: Diamètre nominal des RIA selon le domaine d'application	60
Tableau 4. 1: Comparaison des résultats sur les suies pour le feu de GPL et feu d'huile de transformateur	73
Tableau 4. 2: Comparaison de la chaleur dégagée par un feu de GPL et d'huile de transformateur	74
Tableau 4. 3: Synthèse générale des différents essais effectués avec le modèle développé	80

Nomenclature

C_v : Chaleur spécifique à volume constant [kJ/kg/K]

C_p : Chaleur spécifique à pression constante [kJ/kg/K]

γ : Constante des gaz

ΔH_{eff} : enthalpie de combustion effective [MJ/kg]

ΔH_C : enthalpie de combustion complète [MJ/kg]

v_i : Coefficient stœchiométrique

y_i : Fraction massique

x : Nombre d'atomes de carbone

y : Nombre d'atomes d'Hydrogène

z : Nombre d'atomes d'Oxygène

M : Masse molaire [kg/mol]

h_i : Enthalpie [kJ/kg]

ΔH_{O_2} : Chaleur de combustion basée sur la consommation d'oxygène [MJ/kg]

R : Constante des gaz parfaits [J/mol.K]

D : Diamètre de la nappe de combustible [m]

χ_{eff} : Efficacité de combustion

χ_{rad} : Fraction rayonnée

χ_{conv} : Fraction convectif

A_f : Surface du feu [m^2]

\dot{m}_{ent} : Taux d'entraînement de masse [kg/s]

HRR_{rad} : Taux de chaleur rayonné [kW]

HRR_{conv} : Taux de chaleur convectif [kW]

HRR : Taux de chaleur dégagée [kW]

\dot{m} : Débit massique de pyrolyse [kg/s]

\dot{m}'' : Taux de combustion par unité de surface [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

k : Coefficient d'extinction

β : correcteur de longueur de faisceau

α_c : le taux de croissance

E : le pouvoir émissif, par unité de surface de la flamme [kW/m^2].

F_{12} : le facteur de vue entre l'élément extérieur et la flamme (sans dimension).

τ : Transmission atmosphérique (sans dimension).

y_{O_2} : fraction d'oxygène

z_0 : Position de la source virtuelle du feu[m]

\dot{q}_c'' : Chaleur convectif vers surface solide [kW/m^2]

\dot{q}_r'' : Densité de flux thermique radiatif [kW/m^2]

D_u : Densité optique [m^{-1}]

Abréviations

APSAD : Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommages

ARR: Annual Reccuring Revenue

BMC: Business Model Canvas

CFAST: Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport

CFD: Computational Fluid Dynamics

CLOL: Lower Oxygen Limit Coefficient

CO: Carbon Monoxide

EDO : Equations Différentielles Ordinaires

FDS : Fire Dynamics Simulator

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

HRR: Heat Release Rate

ISI : Ingénierie de la Sécurité Incendie

ISO: International Organization for Standardization

MRR : Monthly Reccuring Revenue

NFPA : National Fire Protection Association

NIST: National Institute of Standards and Technology

OC : Oxygen Calorimetry

RIA: Robinets d'Incendie Armés

SFPE: Society of Fire Protection Engineers

Introduction générale

La gestion du risque incendie est cruciale dans divers secteurs en raison de la fréquence des incendies et de leurs impacts dévastateurs sur les personnes, les biens, les structures, les activités et l'environnement. Cette omniprésence du risque incendie, due à l'abondance des combustibles dans les infrastructures, incite à réduire le niveau de risque incendie aussi bas que raisonnablement possible en faisant appel à des moyens de lutte contre l'incendie tels que la détection, l'extinction automatique et l'évacuation, ainsi qu'en concevant des structures résistantes au feu pour minimiser les dégâts et augmenter le temps nécessaire pour l'évacuation.

L'efficacité de ces différents moyens a toujours été difficile à évaluer, et il est fort probable que certains d'entre eux aient un effet insignifiant, voire nul, sur la réduction des risques. Surtout quand le choix de ses moyens repose sur une approche descriptive, fondée principalement sur l'expérience tirée des sinistres passés. L'investissement dans ces mesures inutiles peut donc être préjudiciable à l'économie d'un projet, surtout dans le contexte d'un développement durable. C'est dans cette optique de gestion du risque incendie que l'approche performancielle a détrôné l'approche traditionnelle. Cette nouvelle approche d'ingénierie de sécurité incendie (ISI), propose une méthodologie scientifique et formalisée pour la prévention et la protection contre les incendies, surpassant les approches empiriques des réglementations traditionnelles. Elle permet ainsi d'identifier les dangers, d'évaluer les risques et de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection adaptées, basées sur des connaissances techniques avancées.

Une des étapes essentielles de l'ISI est l'utilisation de modèles de simulation pour évaluer les solutions de conception, ou les industriels se retrouvent à fournir des investissements importants pour avoir des résultats représentatifs de la réalité, et avec des moyens de lutte qui permettent une gestion efficace du risque incendie. Siemens ne fait pas exception à cette démarche.

Ainsi, la problématique de notre modèle trouve sa genèse dans la situation dans laquelle se trouvent les industries actuellement, en tentent d'assurer la prévention et la protection contre le risque incendie. La solution que ce travail essaye de proposer est un modèle de simulation incendie basé sur le modèle à zones et que l'on peut résumer en trois mots : Maitriser-diminuer-sauver

Maitriser, pour maitriser le risque incendie, en évitant sa propagation et l'occurrence du flash-over.

Diminuer, pour diminuer les dégâts matériels en ayant les informations sur l'efficacité des moyens de lutte.

Sauver, pour sauver des vies en procurant le temps nécessaire d'évacuation.

Ce modèle permettra de simuler l'incendie et l'environnement dans lequel il se développe, de calculer le temps nécessaire à l'évacuation, et d'évaluer la performance des systèmes de lutte contre l'incendie.

Plan de mémoire

Le mémoire est structuré en plusieurs chapitres, chacun explorant en profondeur des aspects distincts du sujet. Le premier chapitre expose les principes fondamentaux. Le deuxième chapitre offre un état de l'art des méthodes existantes de gestion du risque incendie. Le troisième chapitre est dédié aux fondements mathématiques du modèle à zones proposé. Le quatrième chapitre examine le développement de ce modèle ainsi que les résultats obtenus par la simulation, démontrant son efficacité. Enfin, le cinquième chapitre propose une étude financière et un Business Model Canvas pour évaluer la rentabilité de ce logiciel en tant que modèle de simulation et de management du risque incendie.

En conclusion, ce mémoire vise à apporter une contribution significative à la maîtrise du risque incendie en développant un modèle de simulation performant et en fournissant des outils pratiques aux professionnels de la sécurité incendie.

Chapitre 1 Généralités et Contexte

1.1.Introduction :

La modélisation d'un incendie requiert une compréhension approfondie des phénomènes qui le régissent. Ce chapitre a pour objectif de fournir les bases essentielles pour appréhender le développement du feu ainsi que les facteurs qui l'influencent, tout en intégrant les principes de l'ingénierie de sécurité incendie (ISI).

1.2.Présentation de l'entreprise :

Siemens est un conglomérat allemand spécialisé dans les secteurs de l'énergie, de la santé, de l'industrie et du bâtiment. L'entreprise est devenue Leader mondial de l'innovation industrielle grâce à une histoire riche en inventions majeures et une présence globale, son histoire en Algérie remonte à l'installation en 1857 du premier câble télégraphique reliant Annaba, en Afrique du Nord, à Cagliari, en Italie, et en 1962, Siemens ouvrit son premier Bureau de représentation en Algérie. Aujourd'hui, la société emploie plus de 300 personnes et joue un rôle actif dans les secteurs de l'Energie, des transports, de l'eau, de l'industrie et de la sante du pays. Parmi ses diverses activités on retrouve ;

- Bureau d'études technique d'ingénierie
- Entreprise d'ingénierie informatique industrielle et production
- Vente d'équipements électriques industriels
- Vente, Montage et réparation d'équipements et produits médicaux chirurgicaux
- Vente, Montage et maintenance industrielle des équipements, produits et moteurs
- Vente, Montage et réparation des équipements et produits dans le domaine de l'énergie

Grace à cette activité l'entreprise allemande a vu réaliser de nombreux moments marquants depuis sa présence en Algérie ; de la réalisation de la première ligne du métro d'Alger, gestion de toute la signalisation du réseau ferroviaire via le partenariat de sa filiale ESTEL avec la SNTF et sa contribution à l'acheminement de la production de pétrole via des stations de pompage équipées par Siemens.

1.3.Siemens Energy :

Siemens compte trois filiales en Algérie : Siemens SPA, Siemens Energy et Siemens Healthineers chacune opérant dans son domaine spécifique.

Siemens Energy étant la division de Siemens dédiée aux solutions énergétiques. Elle se concentre sur la fourniture de technologies pour les centrales électriques, les solutions d'énergie renouvelable comme l'éolienne, et les systèmes de transmission et de distribution d'énergie. Depuis ses débuts dans le pays, Siemens Energy s'est distinguée par son engagement à fournir des solutions énergétiques novatrices et durables pour répondre aux besoins croissants du marché algérien, et envisage d'adopter plusieurs stratégies de croissance et d'expansion en Algérie.

1.4.L'Ingénierie de Sécurité Incendie :

1.4.1. Définition de l'Ingénierie de Sécurité Incendie :

L'ingénierie de sécurité incendie (ISI), selon la norme ISO 13943, est une discipline qui utilise des principes d'ingénierie, des règles et des jugements d'experts pour quantifier les phénomènes du feu et leurs effets, en tenant compte du facteur humain. Son objectif est d'identifier et d'évaluer les risques d'incendie pour définir des mesures de prévention, de protection et de prévision afin de limiter les conséquences d'un incendie et de protéger les vies humaines, l'environnement et les biens.

Aujourd'hui, grâce aux avancées en combustion, mécanique des fluides et analyse de risques, une telle approche performancielle est basée sur des objectifs de sécurité et des critères quantitatifs, permettant des conceptions innovantes et optimisée. Contrairement aux réglementations descriptives en sécurité incendie qui sont empiriques et fondées sur des connaissances limitées.

1.4.2. Méthodologie de l'Ingénierie de Sécurité Incendie :

Les simulations numériques sont au cœur de la méthodologie de l'ISI. Grâce auxquels plusieurs phénomènes physiques sont examinés : le temps d'atteinte de l'embrassement généralisé, le débit calorifique, la production de fumées, la production de particules enflammées ou bien la propagation surfacique des flammes.

La démarche générale d'Ingénierie de Sécurité Incendie consiste donc à :

- D'une part rechercher systématiquement tous les enchaînements d'événements susceptibles de constituer un risque. Chaque enchaînement, appelé scénario, est recensé, décrit et associé à une probabilité d'occurrence dans le cas de l'ouvrage, du système de transport ou du bâtiment considéré ;
- D'autre part, parmi tous les outils disponibles, sélectionner, qualifier et utiliser ceux qui sont nécessaires et pertinents pour évaluer les performances de l'ouvrage, des produits et des systèmes étudiés

Elle consiste par ailleurs à :

- Evaluer les effets nuisibles (risques pour les personnes, intégrité structurelle, perte d'exploitation par exemple) générés par la combustion non contrôlée, en fonction de paramètres précis ;
- Caractériser la potentialité d'extension du feu dans des espaces donnés et la dégradation de l'atmosphère interne à ces espaces. [1]

Ainsi, les objectifs d'une telle démarche peuvent être résumer comme suit :

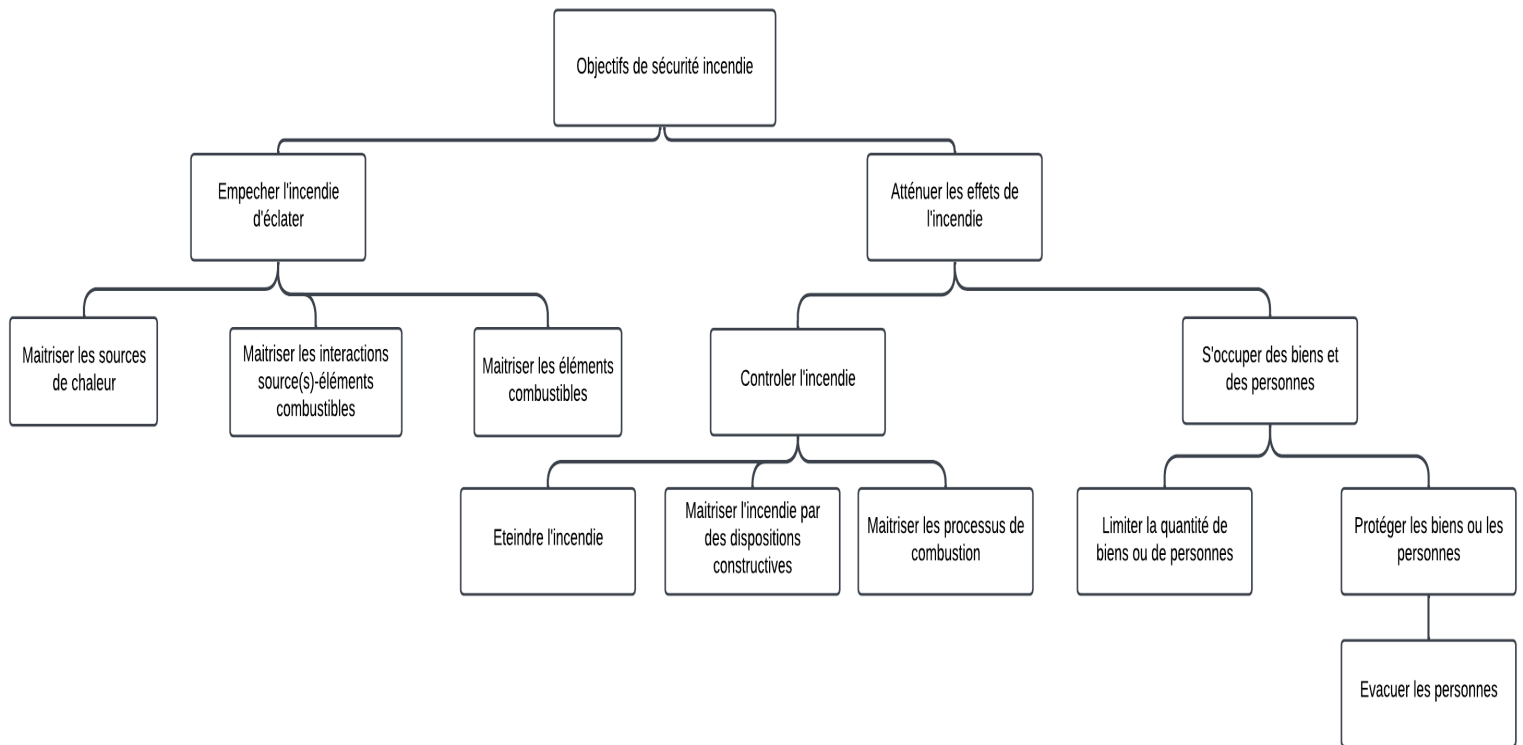


Figure 1. 1: Objectifs de la démarche d'ingénierie de sécurité incendie

1.4.3. Définition générale de la combustion :

La combustion est une réaction physico-chimique d'oxydo-réduction exothermique entre un comburant et un combustible, déclenchée par une énergie d'activation :

- Le comburant (souvent l'oxygène de l'air dans un incendie) joue le rôle d'oxydant,
- Le combustible joue le rôle de réducteur.

La combustion est principalement maintenue par la formation de radicaux libres, des atomes ou groupes d'atomes électriquement neutres, très instables et donc extrêmement réactifs. Ces radicaux libres jouent un rôle crucial dans le développement des réactions de combustion et la propagation des flammes.

De manière générale, la combustion d'un produit concerne les vapeurs émises par celui-ci lorsqu'il est chauffé. Pour qu'un produit soit brûlé, il doit donc émettre des vapeurs inflammables. La combustion se déroule ainsi en phase gazeuse, dans la zone appelée "flamme". Une partie de l'énergie libéré par la réaction exothermique de combustion est transférée au combustible, ce qui maintient l'émission de gaz inflammables.

Un incendie est donc un phénomène de combustion auto-entretenu, qui ne peut être stoppé que par l'élimination du combustible, du comburant ou de l'apport d'énergie.

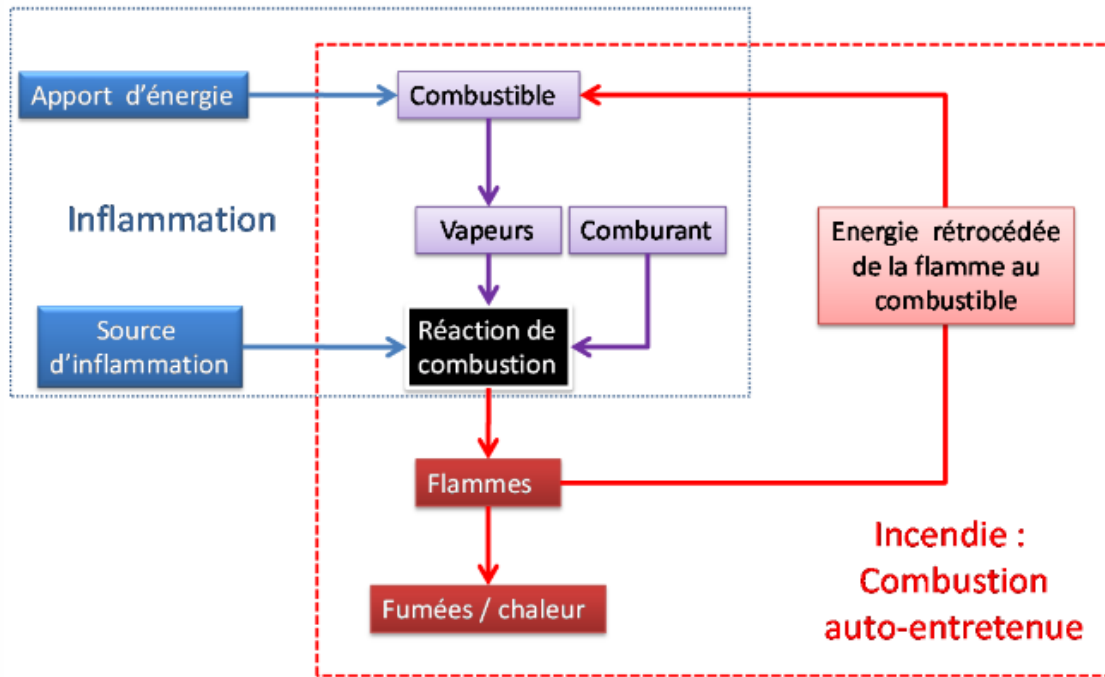


Figure 1. 2: Schéma du mécanisme de l'incendie

1.4.4. Les effets d'un Incendie :

Un feu se caractérise le plus souvent par l'émission de lumière, de chaleur et de fumées. Ce type de sinistre peut représenter une agression pour l'homme, les équipements et l'environnement à plusieurs niveaux :

- Flammes, chaleur : les flammes, dont la température est variable selon la nature du combustible et les conditions de la combustion, ont été à l'origine de brûlures graves et de rayonnements destructeurs pour les structures ;
- Fumées, gaz : les principaux effets identifiés sont :
 - Les brûlures par inhalation,
 - L'agression due à la toxicité des produits de combustion,
 - La gêne visuelle occasionnée,
 - En milieu confiné, une raréfaction de la concentration en oxygène, consommé au cours de la combustion, et une augmentation du monoxyde de carbone des gaz brûlés.

1.4.5. Les feux Industriels :

Pour les feux industriels, quelle que soit la nature du combustible, la combustion se déroule à l'état gazeux. Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons à l'examen des combustibles solides et liquides.

Pour les feux industriels impliquant des combustibles liquides, ceux-ci émettent une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. À mesure que la température augmente, le

combustible entraîne de l'air froid extérieur. Lorsque le mélange air-combustible atteint le domaine d'inflammabilité et qu'une source d'ignition est présente, l'incendie se déclenche. Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut sous l'effet de la flottabilité, tout en continuant à entraîner l'air ambiant.

Les feux industriels impliquant des combustibles solides suivent globalement le même schéma que celui des combustibles liquides. Cependant, l'émission de vapeurs ou de gaz inflammables est plus complexe, car elle met généralement en jeu des réactions de distillation, de pyrolyse, de fusion et éventuellement de sublimation.

1.5. Les seuils critiques d'après l'Ingénierie de Sécurité Incendie :

Comme le montre la démarche d'ISI [2], une étude de sécurité incendie s'agit avant tout à évaluer les effets nuisibles d'un incendie et la capacité des moyens de lutte à réagir face à ces effets. Pour cela il est nécessaire d'établir des seuils critiques de tenabilité et qui permettent ainsi d'avoir le temps disponible pour l'évacuation sachant que ce dernier est le temps pendant lequel ces critères se maintiennent en dessous des seuils définis. Le Tableau 1. 1 présente les critères de tenabilité retenus.

Tableau 1. 1: Sécurité des personnes : critères d'acceptation liés à la vulnérabilité

Objectifs de sécurité	Exigence fonctionnelle	Effets considérés	Critères de vulnérabilité	Critères d'acceptation liés à la tenabilité
Protection de la vie et de la santé des occupants et des tiers	Conditions de tenabilité satisfaisantes	Effets thermiques	Température maximale	< 60°C
			Flux thermique radiatif	< 2kW/m ² (pour t > 10 s) < 2.5 kW/m ² (pour t < 10 s)
		Perte de visibilité	Visibilité	10 m
		Effets toxiques	Concentration volumique du Monoxyde de Carbone (CO)	220ppm
Protection de la vie et de la santé des sapeurs-pompiers	Conditions de tenabilité satisfaisantes	Effets thermiques	Température maximale	< 100 °C
			Flux thermique radiatif	< 5 kW/m ²

1.6. Phénoménologie d'un feu de compartiment :

Pour maîtriser les incendies de compartiment et assurer la protection des personnes présentes, il est indispensable d'avoir une compréhension approfondie de la phénoménologie du feu. Grâce aux expériences vécues, il est possible, malgré la complexité des phénomènes en jeu, de déduire que l'incendie dans un compartiment se déroule en quatre étapes : naissance, croissance, feu pleinement développé et décroissance Figure 1. 3. Cependant, il est important de noter que les incendies de compartiment ne suivent pas toujours cette courbe d'évolution. En effet, la vitesse de développement du feu, le taux de libération de chaleur et la durée de combustion dépendent à la fois des caractéristiques du combustible et des conditions de ventilation.

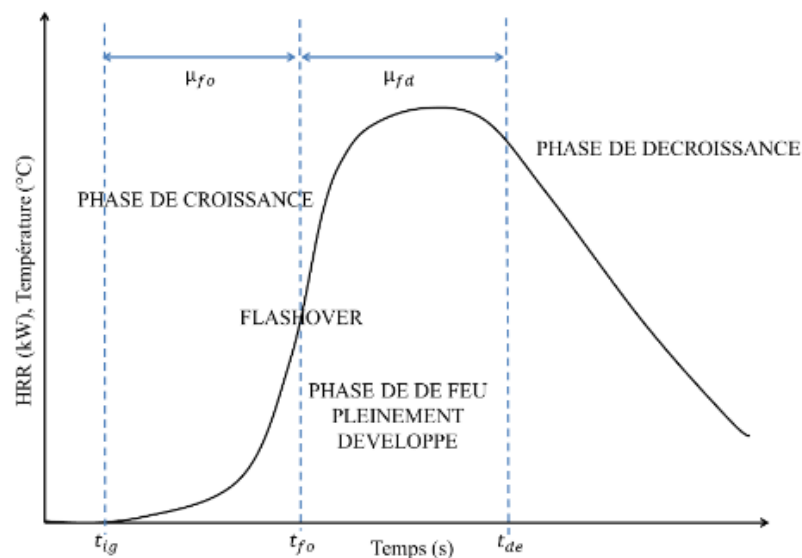


Figure 1. 3 : Phases d'un feu de compartiment. μ_{fo} et μ_{fd} représentent les durées moyennes de flashover et de feu pleinement développé

Croissance

Après une première phase d'inflammation du combustible, aussi appelée phase initiale ou du feu naissant et qui est due à un apport suffisant de chaleur ou d'énergie. On remarque que la température du compartiment augmente progressivement et un panache de fumées se forme. Ce panache alimente la couche chaude en produits de combustion et en air entraîné depuis la couche froide.

Dans cette deuxième phase de croissance, la disponibilité des éléments combustibles joue un rôle capital, car elle permettra la propagation et le développement du feu. En effet, si le combustible se trouve en petites quantités insuffisantes, la phase d'extinction liée à une carence de combustible apparaît. Sinon un phénomène instantané d'embrasement généralisé, ou flashover dans la terminologie anglo-saxonne, se produira.

Feu pleinement développé

Lorsque le feu se développe et atteint des températures élevées, telles que 600 °C, il entre dans la phase de développement complet, ce qui indique le début de la troisième phase. Au cours de cette dernière, la température et le flux de chaleur augmentent considérablement, entraînant la combustion des surfaces exposées. Le taux de dégagement de chaleur est principalement influencé par la ventilation disponible.

Ici le risque de propagation du feu d'un local à un autre est le plus important à travers la convection des fumées qui transporte une quantité d'énergie importante capable d'aller enflammer les combustibles contenus dans les pièces voisines ou par conduction à travers les parois du local.

Décroissance

La phase de feu pleinement développée est suivie d'une phase de décroissance et d'extinction, laquelle commence lorsqu'environ 70% du combustible présent a été consommé.

La durée de chacune des phases, et donc la durée totale de l'incendie, est étroitement liée à la nature du combustible, à sa répartition dans le local et aux conditions de ventilation.

1.6.1. Phénomènes redoutés :

1.6.1.1. Le Flashover :

L'un des aspects les plus redoutés lors d'un incendie, en raison de ses conséquences potentiellement désastreuses, est l'embrassement généralisé éclair, ou flashover. Ce phénomène se produit lorsque l'air chargé en combustibles s'embrase brusquement, entraînant une transition rapide de la phase de croissance à la phase de feu pleinement développé. Cette transition n'est possible que si la ventilation est suffisante et que le combustible est en abondance.

Bien qu'il ne soit pas possible de prédire le moment exact de l'occurrence du flashover, la littérature identifie certains signes annonciateurs qui peuvent alerter d'un danger imminent :

- 1) La température dans la couche chaude à l'intérieur du compartiment doit atteindre entre 500 et 600°C.
- 2) Un flux thermique au sol supérieur à 20 kW/m².

1.6.1.2. Le Backdraft :

Ce phénomène très courant dans les locaux confinés où l'apport en air frais est limité, donc la combustion va vite manquer d'oxygène et l'incendie est étouffé. Mais la quantité d'imbrulés continue d'augmenter en raison de chaleur accumulée lors du développement de

l'incendie qui entretient la vaporisation du combustible. Ce qui explique qu'une entrée brutale d'air peut vite générer un backdraft (explosion de vapeur).

Le déroulement du processus Back-draft :

- a) Un courant d'air frais s'écoulera par gravité dans le local tandis que les gaz, riches en combustibles, plus chauds, s'évacueront vers l'extérieur par la partie haute de l'ouverture.
- b) L'air et les gaz riches en combustibles se mélangeront localement, un mélange inflammable se forme, une déflagration peut se produire dès que le mélange entre en contact avec une source d'inflammation.
- c) La déflagration provoquera le réchauffement des gaz et leur expansion, poussant ainsi les gaz imbrûlés à l'extérieur du local devant le front de flamme.
- d) Ces gaz se mélangeront avec l'air extérieur comme la flamme traverse le local et passe par l'ouverture, elle enflamme au passage ce mélange provoquant ainsi l'occurrence d'une boule de feu et d'une onde de pression.
- e) Le back-draft est désigné d'ailleurs assez souvent comme une explosion de fumées dans lesquelles il y a des imbrûlés.

1.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les notions fondamentales de l'incendie et les phénomènes essentiels à prendre en compte lors de la modélisation des feux. Ce chapitre a également introduit l'étude de la sécurité incendie, qui constitue la principale motivation pour l'utilisation des outils de simulation qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 Synthèse Bibliographique

2.1. Introduction :

L'objectif de l'Ingénierie de la Sécurité Incendie est d'atteindre un niveau de sécurité incendie prédictible et acceptable, en utilisant des méthodes de calcul permettant d'atténuer les effets nuisibles d'un incendie. Ce deuxième chapitre vise à présenter un état de l'art des modèles de simulation des feux actuels, en fournissant des exemples (non exhaustifs) et les spécificités de chacun.

Cependant, ce travail se concentre non pas sur les modèles analytiques (Alpert, McCaffrey...), mais plutôt sur ceux intégrés dans des supports informatiques, en particulier le modèle à zones. Il est donc pertinent de présenter, en second lieu dans ce chapitre, le modèle de feu de compartiment à zones qui fera l'objet d'étude et de réalisation tout au long de ce mémoire. L'objectif est de reproduire les effets de l'incendie et de son développement, ainsi que d'évaluer son impact sur les biens et les personnes.

2.2. Modélisation du feu de compartiment :

Il existe deux grandes catégories de modèles informatiques pour analyser le développement des incendies en enceinte. Les modèles stochastiques ou probabilistes et les modèles déterministes.

- Les modèles stochastiques traitent généralement la croissance du feu comme une série d'événements ou d'états séquentiels. Des probabilités sont assignées à chaque point de transition en se basant sur l'analyse de données expérimentales et historiques, ce genre de modèle est aujourd'hui utilisé dans le cas des feux de forêts [3].
- En revanche, les modèles déterministes représentent les processus rencontrés dans un incendie en compartiment par des expressions mathématiques interconnectées basées sur la physique et la chimie, visant idéalement à évaluer les changements discrets de tout paramètre physique en termes d'effet sur le risque d'incendie.

Le type le plus courant de modélisation des incendies de compartiment est la modélisation par zones ou par volume de contrôle, c'est une méthode développée dans les années 1970, pour prédire les phénomènes d'incendie dans des espaces confinés. Elle repose sur une représentation conceptuelle divisant le compartiment en deux zones de gaz distinctes : une zone supérieure et une zone inférieure. Des équations de conservation sont appliquées à chaque zone pour décrire les processus de transport et de combustion, intégrant divers sous-modèles qui seront élaborés par la suite.

Fowkes et Emmons ont été parmi les premiers à formuler cette approche, par la suite, de nombreux modèles informatiques basés sur cette approche ont été développés. Un exemple notable est le logiciel "Hazard I" développé par le NIST [4], représentée par un scénario réalisé par Hazard I et qui est extrait du guide technique de ce modèle précurseur.

On présente dans la figure suivante un exemple de résultats réalisé par Hazard I sur un feu de graisse dans une cuisine familiale.

Scenario 2 - Grease fire in kitchen of the ranch house	
FAST input file:	SCEN-2.DAT
EXITT input file:	SCEN-2.BLD
Assumed properties of product:	Material code CKG001 (cooking oil) and CLT001 (wardrobe) used for cabinets
Flashover time:	3 min
Evacuation	
Occupant	Evacuation Time
1	1 min
2	1 min
3	1 min
4	1 min
5	1 min

Figure 2. 1: Aperçu d'un exemple de résultats réalisé par Hazard I sur un feu de graisse dans une cuisine familiale

2.3. Etat de l'art de la simulation numérique de l'incendie :

L'idée d'étudier numériquement la dynamique du feu remonte au début de l'ère informatique, mais les modèles pratiques sont récents en raison de la complexité inhérente. Cette difficulté résulte des nombreux scénarios d'incendie possibles, de la puissance de calcul requise et des différents phénomènes d'écoulement et de transport radiatif difficiles à modéliser, ou non disponibles comme la pyrolyse de nombreux combustibles.

Ainsi, bien que la simulation numérique des incendies remonte aux années 1950, il a fallu attendre la dernière décennie pour voir émerger des codes de calcul industriels capables de traiter des problèmes tridimensionnels en aéraulique. Actuellement, trois approches principales de simulation incendie existent : la première est celle des modèles de zone, qui utilisent des volumes de contrôle pour diviser les compartiments en couches homogènes. Les deux autres approches, plus complexes, sont les modèles de champ (CFD) et la simulation des grandes échelles (LES), qui permettent de modéliser les phénomènes turbulents à différentes échelles avec une plus grande précision.

Le tableau suivant a pour but de résumer les modèles utilisés jusqu'à présent dans la modélisation des feux, correspondant à différents niveaux d'approximation dans la prise en compte des phénomènes physiques.

Tableau 2. 1: Modèles existants pour la modélisation des feux

Modèles de feu nominales	Feu standard
	Feu externe
	Feu d'hydrocarbure
Modèles de feu simple	Feu paramétré
Modèles de feu à zones	Modèle pour 1 zone
	Modèle pour 2 zones
Modèles de feu CFD (dynamique des fluides de Navier-Stokes avec maillage)	Modèle DNS
	Modèle LES
	Modèle RANS

2.3.1. Modèles nominaux et paramétriques :

Les modèles de feu nominal et les modèles de feu paramétré sont caractérisés par la donnée d'une courbe standard température/temps cette approche, développée dans le but de classer la réponse thermique due à un incendie de différents matériaux de construction.

Ces modèles supposent une température identique à tout moment donné en tout point d'un espace défini, ce qui rend cette approche conservatrice puisqu'elle prend très peu en compte des paramètres importants comme la ventilation, de la taille du compartiment et de la charge calorifique qu'il contient, et des propriétés thermiques des parois.

2.3.1.1. Modèle nominal :

L'application d'une courbe de feu nominal ne demande qu'un nombre limité de connaissances relatives au comportement du feu dans un espace défini, c'est pourquoi il est à reconnaître que l'utilisation de ces feux standards donne des dommages sur les éléments de structure trop sécuritaire voir sous-estimés surtout dans le cas de contraintes sévères (par exemple, dans le cas d'une résistance au feu imposée pour 60 ou 120 minutes).

La norme EN 1991-1-2 [5], qui traite des charges liées au feu, elle fournit également les trois modèles nominaux suivants :

- Courbe du feu standard ou courbe ISO 834 :

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Qui peut être utilisée lorsque aucune information complémentaire sur l'incendie n'est disponible.

- Courbe du feu externe :

$$T_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20$$

Peut être utilisée sur des murs de séparation ou façades extérieur au compartiment où se développe le feu.

- Courbe du feu d'hydrocarbure :

$$T_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$

S'applique qu'à un incendie provoqué par la combustion d'un hydrocarbure (mazout, diesel, essence, ...).

Où T_g est la température du gaz dans le local en °C et t est le temps en minutes.

Les courbes nominales mentionnées ci-dessus sont représentées sur Python sur la Figure 2. 2. On observe que les feux d'hydrocarbure évoluent très rapidement vers leur température maximale qui est d'ailleurs beaucoup plus importante quand il s'agit d'hydrocarbure à environ 1100 °C. Cependant les feux standards évoluent progressivement et dépassent même les feux d'hydrocarbures à 175 minutes du début du feu.

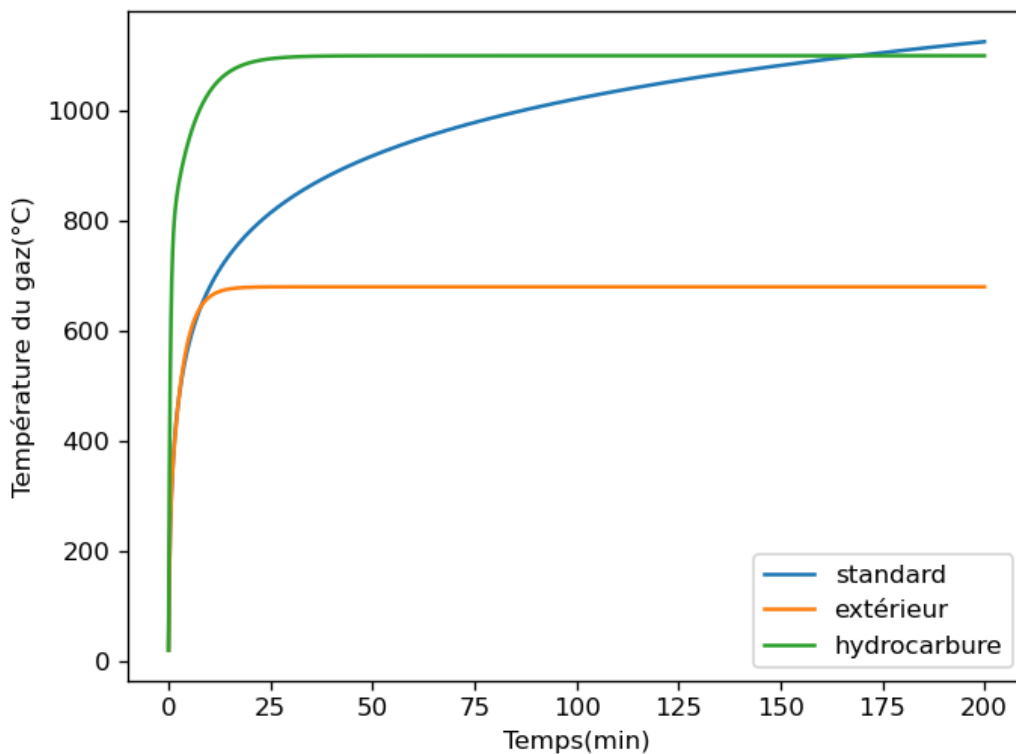


Figure 2. 2: Les courbes des feux nominaux de la température en fonction du temps

2.3.1.2. Modèle paramétrique :

Le modèle paramétrique est un modèle simplifié dans son utilisation mais qui représente néanmoins certains avantages sur le modèle nominal, en effet le modèle paramétrique s'appuie sur des corrélations empiriques qui permettent de mieux représenter le phénomène du feu, on le retrouve dans de nombreux travaux comme ceux de l'Eurocode 1 [6], ou de Barnet sur BFD curve [7].

Sachant qu'une courbe paramétrique s'appliquant à toutes les situations possibles n'existe pas, nous prendrons en guise d'exemple la représentation analytique du feu paramétrique selon l'Eurocode 1 :

$$T_g = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*})$$

Où t^* désigne un temps virtuel défini par $t^* = t \cdot \Gamma$, le terme Γ valant :

$$\Gamma = \left(\frac{\frac{O}{b}}{3.4 \cdot 10^{-5}} \right)^2$$

Avec O représente le facteur de ventilation du compartiment étudié et le terme b est l'effusivité qui prend en compte la nature des parois du compartiment. La courbe correspondante à cette représentation est extraite de [8].

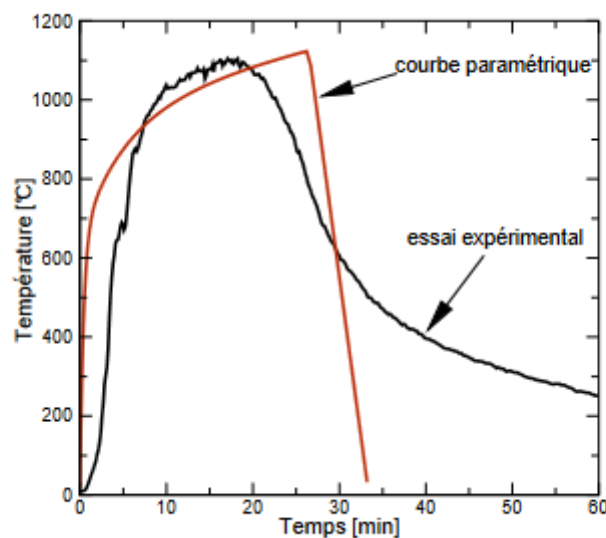


Figure 2. 3: Courbe paramétrique selon l'Eurocode 1

2.3.2. Modèles avancés :

Contrairement aux modèles antérieurs, les modèles avancés traitent l'incendie comme un processus tridimensionnel évoluant dans le temps. À ce jour, trois approches principales sont utilisées pour modéliser les incendies de compartiment, chacune offrant un degré différent d'approximation du phénomène réel. Le modèle à zones divise le compartiment en deux volumes de contrôle homogène, tandis que les modèles de champ (CFD) et de simulation des grandes échelles (LES) divisent le compartiment en de nombreuses mailles. Le modèle LES, en particulier, offre une précision temporelle et spatiale supérieure. Un regard plus approfondi de ces modèles sera présenté dans ce qui suit.

2.3.2.1. Modèles à zones :

Un modèle de zone est un outil de calcul couramment utilisé pour prévoir les effets du développement d'un feu à l'intérieur d'un volume relativement fermé, tel qu'un compartiment.

Dans la plupart des applications, le volume n'est pas totalement clos, car les portes, les fenêtres et les ouvertures sont habituellement prises en compte dans le calcul. Ces modèles ont été développés pour des configurations de simple pièce et de pièces multiples.

En général ça consiste à diviser chaque compartiment en deux volumes supposées isothermes : une couche supérieure chaude et une couche inférieure plus froide avec le feu et son panache agissent comme une pompe enthalpique entre ces deux couches, cela est montré sur Figure 2. 4.

Des bilans de masse et d'énergie sont appliqués pour chaque couche, avec des modèles supplémentaires décrivant d'autres processus physiques ajoutés sous forme d'équations différentielles ou algébriques, selon le cas. Des exemples de ces phénomènes incluent les panaches de feu, les flux à travers les portes, les fenêtres et autres ouvertures, le transfert de chaleur radiatif et convectif, et la pyrolyse des combustibles solides.

L'utilisation de deux zones uniformes reproduit une approximation raisonnable du développement d'un feu dans une pièce dans de nombreuses situations et est surtout adapté au bâtiment, où chaque pièce peut définir une zone avec des caractéristiques uniques (de température, de visibilité...).

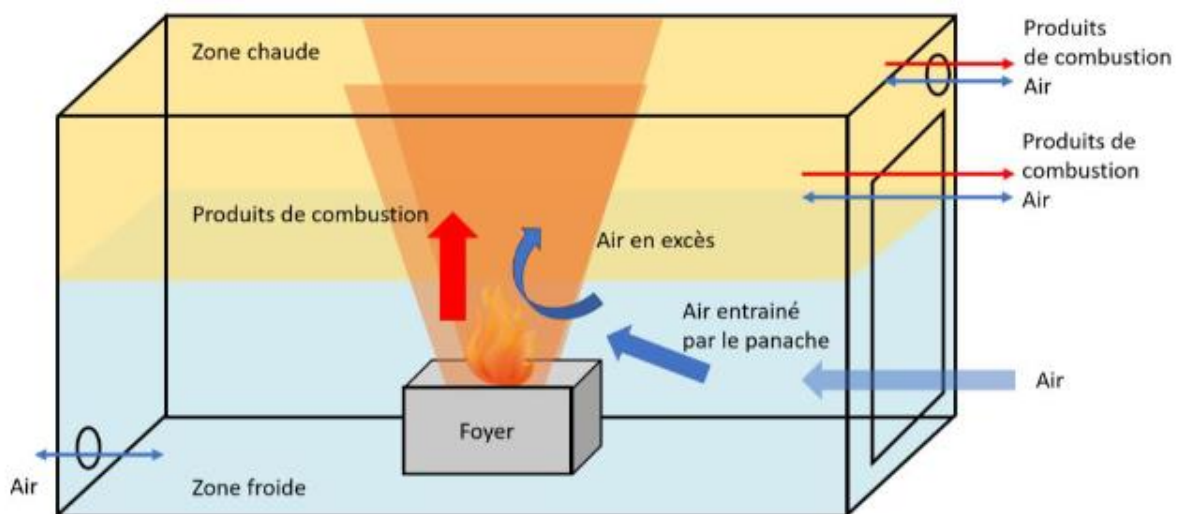


Figure 2. 4: Schéma représentatif du modèle à zones

Malgré les hypothèses limitantes des modèles à zones qui ne leur permettent pas d'être adaptés aux géométries complexes, ils restent très largement utilisés en raison de leur relative simplicité de mise en œuvre et de leur faible coût de calcul. On retrouve dans le SFPE Chapitre 3- 7 [9] une excellente vue d'ensemble des principaux modèles à zones. Le Tableau 2. 2, présente quelques-uns de ces modèles.

Tableau 2. 2: Historique des modèles à zones existants

Modèle	Description
ASET et ASET-B	ASET a été développée par NIST pour modéliser le temps de tenabilité atteinte dans une pièce ou les portes et fenêtres sont fermés. ASET-B est la version BASIC de ce programme.
COMPF2	COMPF2 est un modèle de compartiment unique post-flashover développé par Babrauskas, ayant pour objectif les calculs de conception et l'analyse des données expérimentales de combustion.
CSTBZ1	CSTBZ1 est un modèle d'études post-flashover basé sur COMPF2. Un algorithme numérique sophistiqué a été utilisé pour résoudre les équations par découplage.
CFAST	CFAST (consolidated model of fire growth and smoke transport) est une mise à jour de FAST développé par NIST. C'est un modèle à zones multi compartiments, gérant jusqu'à 30 compartiments. Il est maintenant à sa version 6 et possède une interface graphique. Le logiciel a été pleinement validé pour les situations du bâtiment, et de nombreuses comparaisons avec l'expérimentation ont été réalisées. L'outil a un algorithme d'extinction en fonction de la température et de la teneur en oxygène. Il gère le calcul de délai de déclenchement des sprinklers et détecteurs.
BRANZFIRE	BRANZFIRE est un outil multi compartiments développé en Nouvelle Zélande. Il utilise les mêmes équations de conservation que CFAST. Il dispose d'une fonctionnalité intéressante, qui est de posséder un algorithme d'évolution des espèces gazeuses. Il calcule aussi une extension de foyer, à partir de données issues du cône calorimètre.
FIRST	FIRST est le descendant direct de HARVARD-V. Il a été développé à la fin des années 1970 au NIST. Il prédit le développement du feu et les conditions résultantes des feux prescrits et jusqu'à trois de ceux dépendant du flux radiatif incident.
ŒIL	Le code ŒIL est le modèle à zones développé par Direction Générale de l'Armement Techniques navales (DGA TN). Il diffère essentiellement des modèles à zones classiques, comme CFAST, par le fait que chaque zone a une pression propre ce qui accroît le temps de calcul.
MAGIC	MAGIC est un modèle à deux zones développées par Electricité De France (EDF), capable de traiter jusqu'à 24 compartiments communicants. Le code a été développé pour l'application des réseaux de ventilation des centrales nucléaires.

LAVENT	LAVENT est un modèle développé pour simuler la réponse des sprinklers dan un feu de compartiment pouvant être équipés d'ouvrants fusibles. Jusqu'à 5 ouvertures dans le toit et 10 ouvrants fusibles peuvent être traiter.
--------	--

2.3.2.2. Modèles de champs (CFD) :

Les modèles CFD s'appuient sur une résolution numérique des équations de Navier-Stokes traduisant les lois d'échange et de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie. Les solutions de ces équations sont générées grâce à une discrétisation spatiale en un grand nombre de volumes de contrôle ou « mailles » au niveau desquels les grandeurs sont supposées uniformes, à laquelle s'ajoute une discrétisation temporelle (par pas de temps), et en ayant recours à des modèles complémentaires simplifiés.

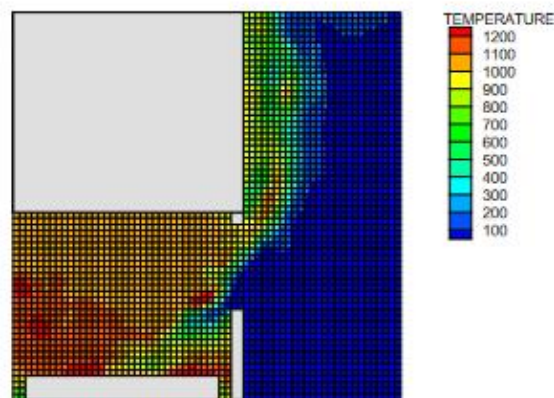


Figure 2. 5: Exemple de discrétisation utilisée par un modèle à champ. Les mailles sont ici colorées uniformément pour montrer que les grandeurs réellement manipulées par le modèle sont constantes au sein de chacune d'entre elles

Différents modèles de CFD utilisent différentes techniques de résolution, locale et instationnaire, des équations de Navier Stokes :

- Simulation numérique directe “DNS” (Direct Numerical Simulation),

La DNS est basée sur la résolution des équations tridimensionnelles instationnaires de Navier – Stokes pour toute la gamme du mouvement turbulent des plus grandes échelles jusqu'aux échelles dissipatives. La DNS ne nécessite aucune modélisation, cette approche donne simultanément toutes les échelles spatiales et temporelles du mouvement turbulent. Bien que son coût computationnel élevé limite son utilisation à des problèmes relativement simples et des domaines restreints.

- Simulation à grandes échelles “LES” (Large Eddy Simulation),

La simulation à grandes échelles (LES) est une technique CFD très prometteuse pour la prédiction et l'analyse des écoulements turbulents instationnaires, équilibrant des simulations détaillées avec des exigences de calcul gérables. L'idée de la LES est de résoudre explicitement les grandes structures turbulentes tout en modélisant les petites échelles de turbulence.

Les équations simplifiées, développées par Rehm et Baum, sont également utilisées dans les simulations LES et sont largement adoptées par la communauté de recherche sur la combustion, où elles sont appelées les équations de combustion "à faible nombre de Mach". Ces équations décrivent le mouvement à basse vitesse d'un gaz entraîné par la libération de chaleur chimique et les forces de flottabilité.

FDS [10], un des logiciels de simulation les plus performants, utilise cette méthode. Cependant, son application ne s'étend qu'à des nombres de Mach d'environ 0,1, ce qui correspond à des vitesses de gaz relativement basses, bien adaptées aux conditions de combustion à faible vitesse.

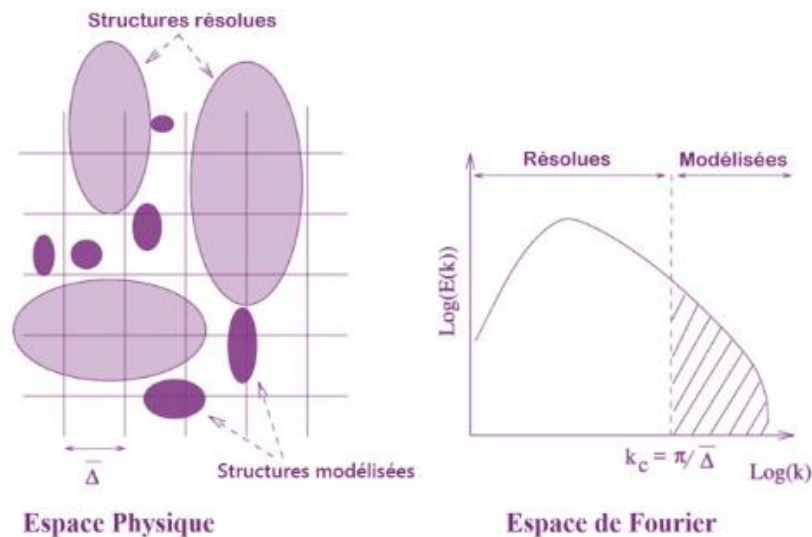


Figure 2. 6: Technique de la simulation à grandes échelles LES

- Modélisation statistique en un point “RANS” (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

Les équations de Navier-Stokes moyennées par Reynolds (RANS), en particulier le modèle de turbulence k-ε, pionnier par Patankar et Spalding, ont été développées comme une approximation temporelle moyenne des équations de conservation de la dynamique des fluides. Ce modèle repose sur un traitement statistique des équations de Navier-Stokes, moyennant la décomposition de Reynolds. Le défi central de l'analyse des écoulements turbulents est la modélisation des tensions de Reynolds, connue sous le nom de « problème de fermeture ».

Néanmoins l'avantage principal de l'analyse statistique des écoulements turbulents est qu'elle permet de capturer les effets des grandes structures turbulentes sans nécessiter une résolution

extrêmement fine de toutes les échelles turbulentes, ce qui serait computationnellement prohibitif.

2.4. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer les différentes catégories de modèles de modélisation de feu, allant des modèles normatifs, tels que les feux paramétrés, aux modèles avancés intégrant la turbulence et la dynamique des fluides. En présentant les spécificités et les applications de chaque type de modèle, nous avons établi une base solide pour comprendre comment ces outils peuvent être utilisés pour simuler les incendies de manière précise et fiable. Cette analyse approfondie des modèles existants nous prépare à aborder, dans les chapitres suivants, l'application pratique du modèle à zones pour étudier et gérer les effets des incendies sur les biens et les personnes.

Chapitre 3 Fondement mathématique du modèle à zones

3.1. Introduction :

Le modèle à zones repose sur le principe fondamental selon lequel chaque compartiment est divisé en deux volumes de contrôle homogènes : une couche supérieure relativement chaude et une couche inférieure relativement froide.

Ce modèle est caractérisé également par un système d'échange de masse et d'énergie entre ces deux zones. Ou le remplissage de la zone supérieure se fait par l'apport de masse provenant des flammes, des panaches thermiques et de l'air extérieur entrant par les ouvertures. Tant dis que la zone inférieure reçoit de l'air extérieur et perd de la matière et de l'énergie, principalement à cause de l'entraînement d'une partie de l'air par les flammes et les panaches thermiques.

En résolvant un système d'équations qui décrivent les échanges entre zones, il devient possible de prédire le comportement du feu. Ce chapitre vise à présenter les corrélations empiriques et les équations utilisées dans notre modèle pour obtenir une représentation fidèle du phénomène de feu dans un compartiment. Afin d'atteindre les objectifs suivants :

- Déterminer la relation entre la température, la propagation et la production de fumée d'un feu au fil du temps.
- Comparer le taux de fumée avec le niveau de visibilité.
- Comparer la température avec le degré de tenabilité humaine.
- Estimer le temps d'évacuation par rapport au temps critique pour l'homme.
- Estimer le temps d'occurrence du flashover

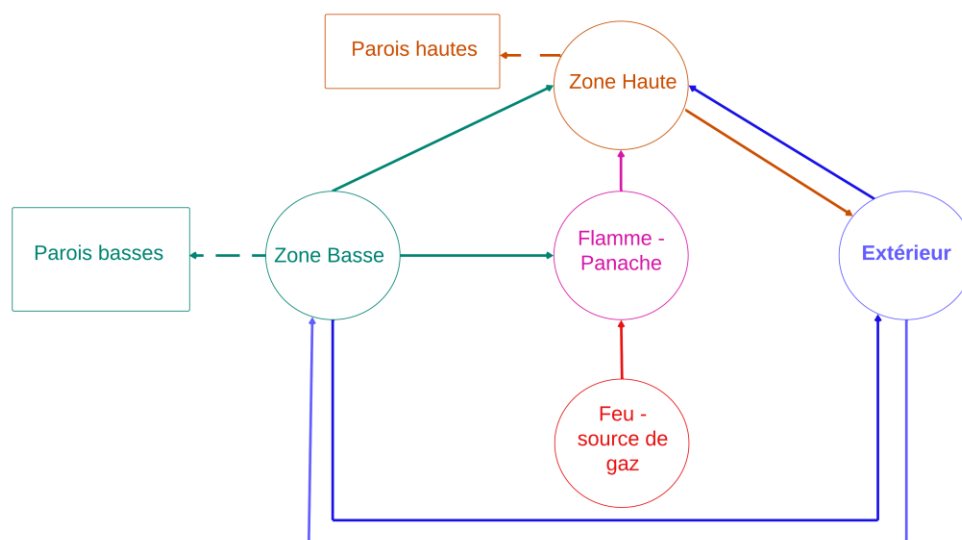


Figure 3. 1: Diagramme d'échanges entre zones dans un local en feu

3.2. Equations du modèle :

Le modèle à zones est basé sur la résolution d'équations différentielles ordinaires à conditions initiales avec comme termes sources : des débits massiques (transferts de masse en kg/s) et des enthalpies (transferts de chaleur en W). La température, la pression et la composition du gaz dans chaque couche, sont supposés uniformes.

Ce système d'équations différentielles est déduit des bilans de masse et d'énergie, Afin de prédire dans le temps la pression dans le compartiment, le volume de la couche supérieure, et les températures des couches désignés par P , V_U , T_U et T_L respectivement, où $i=u$ désigne la couche supérieure, et $i=l$ désigne la couche inférieure.

Equation de conservation de la masse :

L'équation de conservation de la masse affirme simplement que le taux de variation de la masse de la couche i est égal à la somme des termes sources de masse.

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i \quad (1)$$

D'où les deux premières équations du système :

$$\frac{dm_u}{dt} = \dot{m}_{ent} + \dot{m} \quad (2)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = -\dot{m}_{ent} \quad (3)$$

Avec ; \dot{m}_{ent} : débit massique d'air entraîné par le panache et \dot{m} : débit massique dû à la combustion.

Equation de conservation de l'énergie :

L'Equation de conservation de l'énergie, représente la première loi de la thermodynamique ;

$$\frac{dC_v m_i T_i}{dt} = \dot{h}_i - P \frac{dV_i}{dt} \quad (4)$$

Ou \dot{h}_i le flux d'énergie interne des sources, \dot{h}_i , (enthalpie massique) inclus le taux de dégagement de chaleur du feu, les pertes convectives vers les parois et les échanges radiatifs.

Et est exprimé par l'équation :

$$\frac{dh_u}{dt} = HRR_{conv} + \dot{m}_{ent} c_p T_l + \dot{h}_{w,u}^{conv} + hA_{room}(T_u - T_l) + \dot{h}_u^{rad} + \dot{m} c_p T_a \quad (5)$$

$$\frac{dh_l}{dt} = -\dot{m}_{ent} c_p T_l - \dot{h}_{w,l}^{conv} + hA_{room}(T_u - T_l) + \dot{h}_l^{rad} \quad (6)$$

Tel que ;

- $hA_{room}(T_u - T_l)$ représente le terme source d'enthalpie relatif à l'échange convectif à l'interface, avec $h = 1.52|T_u - T_l|^{\frac{1}{3}}$ et A_{room} est la surface du plancher ;
- $\dot{m}_{ent}c_pT_l$ est le terme source d'enthalpie relatif à l'entraînement par le panache ;
- $\dot{m}c_pT_a$ terme source relatif à la combustion ;
- \dot{h}_u^{rad} , \dot{h}_l^{rad} c'est les termes source d'enthalpie relatifs aux échanges radiatifs de la zone haute et basse ;
- $\dot{h}_{w,u}^{conv}$, $\dot{h}_{w,l}^{conv}$ sont les termes d'enthalpie relatifs aux pertes convectives par les surfaces hautes et basses, le détail est présenté dans la partie 3.5.1.

A partir de ces équations de conservations et de la loi des gaz parfaits,

$$PV_i = m_iRT_i \quad (7)$$

Et en tenant compte de la reformulation par CFAST [11], on obtient le système d'équations différentielles du modèle représenté dans la figure suivante, qui sera résolu dans le Chapitre 4.

Tableau 3. 1: Système d'équations différentielles du modèle

Type d'équation	Equation différentielle
Pression	$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma-1}{V_{room}} (\dot{h}_l + \dot{h}_u)$
Température pour la couche haute	$\frac{dT_u}{dt} = \frac{1}{c_p m_u} (\dot{h}_u - c_p \dot{m}_u T_u + V_u \frac{dP}{dt})$
Température pour la couche basse	$\frac{dT_l}{dt} = \frac{1}{c_p m_l} (\dot{h}_l - c_p \dot{m}_l T_l + V_l \frac{dP}{dt})$
Volume de la couche haute	$\frac{dV_u}{dt} = \frac{1}{P\gamma} ((\gamma - 1)\dot{h}_u - V_u \frac{dP}{dt})$

3.3. Combustion :

3.3.1. Taux de chaleur dégagée (HRR) :

Les calculs du comportement du feu ne sont pas possibles à moins que le taux de dégagement de chaleur (HRR) de l'incendie ne soit connu. Cette caractéristique décrit quantitativement « Quelle est la taille du feu ? ». Le taux de dégagement de chaleur d'un objet en combustion est mesuré en kilowatts (kW). C'est le taux auquel les réactions de combustion produisent de la chaleur.

Le calcul du taux de chaleur dégagé à partir de mesures expérimentales peut être réalisé à différentes échelles : petite, intermédiaire ou réaliste [12].

- À l'échelle réaliste (Full Scale), la mesure directe du HRR peut être effectuée selon deux principales techniques : les calorimètres à combustion ouverte, développés au début des années 1980 par Babrauskas et ses collègues au NIST ainsi que par Heskestad au FMRC.

Ces méthodes sont simples car elles ne nécessitent pas la construction d'une chambre de test, mais elles ne prennent pas en compte certains aspects tels que la couche de gaz et les surfaces chauffées dans un feu confiné, ce qui peut conduire à des valeurs de HRR post-flashover différentes de la réalité.

D'autre part, les tests de feu en chambre sont réalisés dans diverses institutions comme l'University of California, le NIST et l'Institut national suédois d'essais et de recherche. Malgré leur coût élevé de construction, ces tests sont idéaux lorsque l'effet du confinement est élevé.

- Pour les échelles plus petites (Bench Scale), le calorimètre à cône Figure 3. 2, développé au NIST par Babrauskas, est couramment utilisé, permettant ainsi d'obtenir une courbe expérimentale du développement du HRR.
- La technologie la plus récente pour déterminer le HRR est la calorimétrie à échelle intermédiaire (Intermediate Scale). Cependant, étant donné que les données obtenues ne sont pas encore à l'échelle réelle, une analyse supplémentaire est nécessaire pour pouvoir intégrer ces données de test dans la modélisation des incendies.

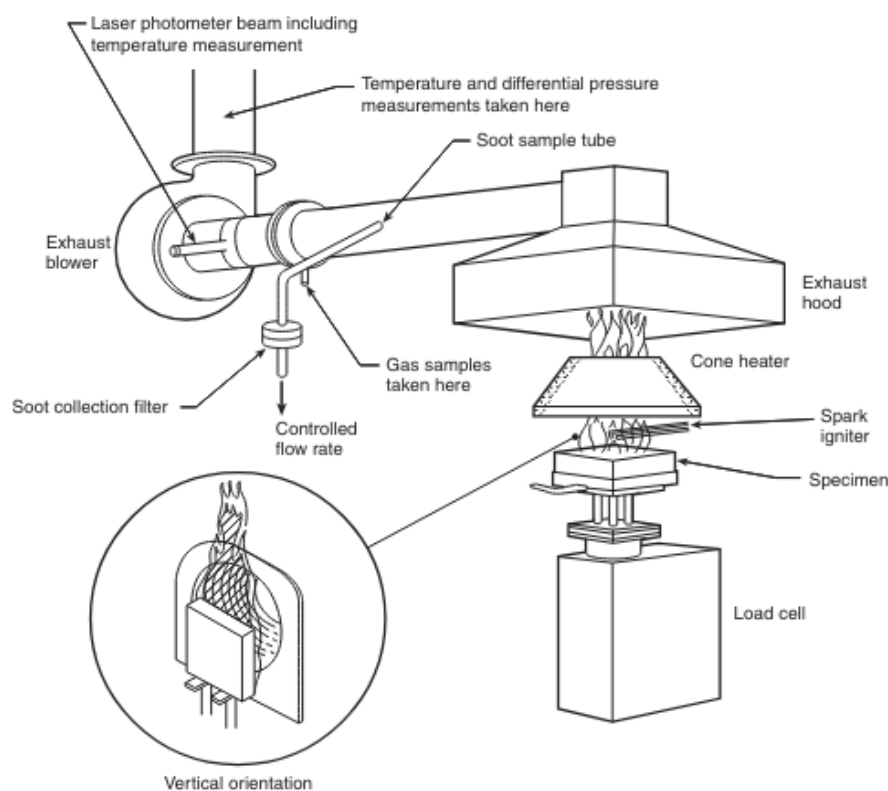


Figure 3. 2: Calorimètre à cône à petite échelle

Une série de méthodologies ont été développées pour évaluer le taux de dégagement de chaleur (HRR) des matériaux et des objets. Ces méthodologies peuvent utiliser des mesures indirectes de l'augmentation de la température, de la perte de masse, de la consommation d'oxygène ou de la production de certaines espèces chimiques. Nous aborderons deux de ces techniques.

3.3.1.1. La calorimétrie par consommation d'oxygène (OC) :

La calorimétrie par consommation d'oxygène (OC) est couramment utilisée pour établir le taux de dégagement de chaleur (HRR). Cette méthode repose sur l'observation initiale que le HRR est proportionnel à la consommation d'oxygène lors de la combustion de la plupart des combustibles organiques liquides et gazeux. Une constante énergétique de $13,1 \pm 0,68$ MJ/kg d'O₂ consommé a été déterminée comme applicable à la majorité des substances organiques [13].

$$\text{HRR} = \Delta H_{\text{O}_2} \times \dot{m}_{\text{O}_2} \quad (8)$$

Cette approche s'avère suffisante pour de nombreux matériaux, ce qui explique son utilisation généralisée. Cependant, pour des matériaux plus complexes, des mesures supplémentaires (comme le CO, le CO₂ et les hydrocarbures totaux) peuvent être nécessaires pour une reconstitution plus précise de la chimie de la combustion. Plusieurs études continuent de discuter des incertitudes associées à cette méthode comme celle mentionnée dans la référence [14].

3.3.1.2. Débit massique de pyrolyse :

Lorsqu'une mesure directe du HRR n'est pas possible, on peut calculer sa valeur en ayant recours au taux de combustion ou débit massique de pyrolyse (\dot{m} , [kg/s]) qui est le débit de la vapeur combustible libérée à la surface du foyer. Les deux paramètres sont liés par la relation suivante :

$$\text{HRR} = \Delta H_{\text{eff}} \times \dot{m} \quad (9)$$

Avec ΔH_{eff} l'enthalpie de combustion effective, souvent donnée en kJ/kg.

Remarque : On parle ici d'enthalpie de combustion effective ΔH_{eff} [15] qui est inférieure à l'enthalpie de combustion complète ΔH_c , car la combustion dans les incendies n'est jamais complète. Le rapport entre ces deux valeurs représente l'efficacité de la combustion.

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{\Delta H_{\text{eff}}}{\Delta H_c} \quad (10)$$

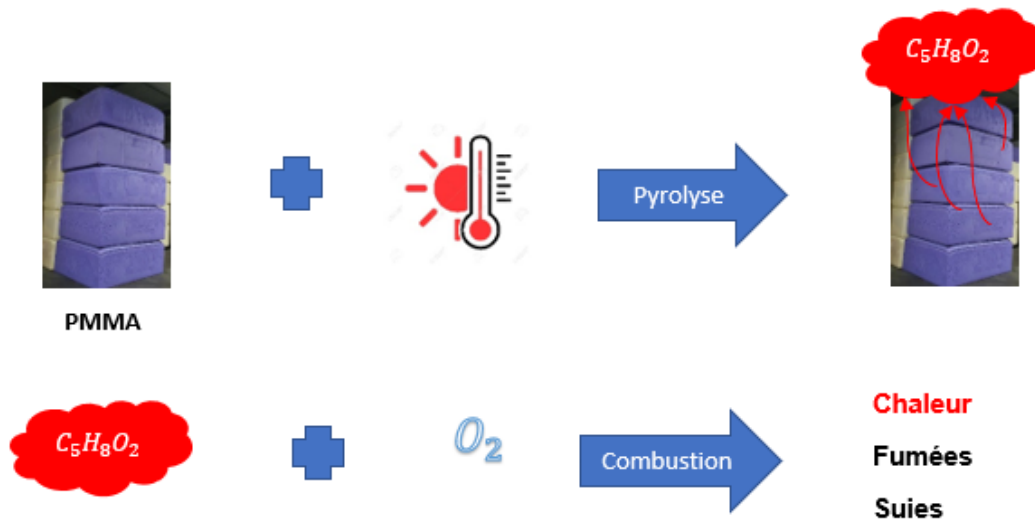


Figure 3. 3: Schéma simplifié de la pyrolyse et la combustion

Cette technique pour le calcul du taux de chaleur dégagée sera adoptée dans la construction de notre modèle, où le taux de combustion est donné par unité de surface $\left[\frac{kg^2}{m} \cdot s\right]$ et A_f est la surface de combustion horizontale du combustible, sous la forme de la relation suivante :

$$HRR = A_f \dot{m}'' \Delta H_{eff} \quad (11)$$

On retrouve dans la littérature, les taux de combustion moyen par unité de surface de divers matériaux, mesuré dans des tests de combustion libre.

3.3.1.3.HRR des feux de nappe :

La production de vapeurs dans les solides implique généralement une décomposition thermique, ou pyrolyse, comme évoqué précédemment. Pour les liquides, on parle plutôt d'évaporation ou d'ébullition. Lors d'un déversement accidentel, ces combustibles liquides peuvent émettre suffisamment de vapeurs à température ambiante pour former un mélange inflammable avec l'air.

Pour les feux de nappe de diamètre supérieur à 0,2 m, la relation précédente peut être formulée ainsi :

$$HRR = A_f \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{k\beta D}) \Delta H_{eff} \quad (12)$$

Où le produit « $k\beta$ » représente le produit des deux coefficients empiriques (coefficient d'extinction et correcteur de longueur de faisceau, respectivement) qui caractérisent le combustible et dépendent du flux de chaleur radiatif de la flamme vers la surface du combustible.

Un autre paramètre, l'épaisseur du déversement, est également pris en compte dans la détermination de la surface du déversement A_f , et varie selon le type de sol [16].

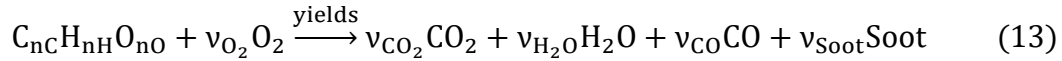
Ces constantes empiriques ont été définies pour un certain nombre de combustibles courants par Babrauskas [12], et sont données dans le Tableau 3. 2.

Tableau 3. 2: Data pour l'estimation du taux de combustion par Babrauskas

Combustible	\dot{m}''_{∞}	ΔH_c	$k\beta$
Cryogéniques			
Hydrogène liquide H_2	0.017	120.0	6.1
GNL CH_4	0.078	50.0	1.1
GPL C_3H_8	0.099	46.0	1.4
Alcools			
Méthanol	0.017	20.0	
Ethanol	0.015	26.8	
Combustibles organiques simples			
Butane C_4H_{10}	0.078	45.7	2.7
Benzène C_6H_6	0.085	40.1	2.7
Hexane C_6H_{14}	0.074	44.7	1.9
Heptane C_7H_{16}	0.101	44.6	1.1
Xylène C_8H_{10}	0.090	40.8	1.4
Produits pétroliers			
Gazoline	0.055	43.7	2.1
Kérosène	0.039	43.2	3.5
Hydrocarbure	0.039	46.4	0.7
Pétrole brut	0.022-0.045	42.5-42.7	2.8
Essence	0.035	39.7	1.7
Combustibles solides			
Polyméthylméthacrylate	0.020	24.9	3.3
Polypropylène	0.018	43.2	

3.3.2. Réaction de combustion en phase gazeuse :

Le taux de libération de chaleur (HRR) de l'incendie peut être limité par la disponibilité de l'oxygène dans le compartiment ce qui résulte en une réaction de combustion non complète. Cette combustion est décrite par la réaction suivante pour la vapeur d'un combustible hydrocarboné :



Calcul des coefficients stœchiométriques des produits de combustion :

On retrouve dans les travaux de Tewarson [15] les taux de suie et de monoxyde de carbone produits par la combustion de différentes substances, ces fractions massiques sont liées à leurs coefficients stœchiométriques comme suit :

$$\text{On a } y_i = \frac{m_i}{m_{fuel}}, \quad \text{avec } m_i = \nu_i \cdot M_i \cdot \text{Or } \nu_{fuel} = 1$$

$$\text{D'où ; } y_{suies} = \frac{M_{suies}}{M_{fuel}} \nu_{suies} \quad \rightarrow \quad \nu_{suies} = \frac{M_{fuel}}{M_{suies}} y_{suies}$$

$$\text{Et } \nu_{CO} = \frac{M_{fuel}}{M_{CO}} y_{CO}$$

Pour le calcul des coefficients stœchiométriques des autres produits de combustion, ν_{CO_2} , ν_{H_2O} et ν_{O_2} ; On applique le principe de conservation des atomes, en supposant que les suies sont composées de 90 % de carbone et de 10 % d'hydrogène, ce qui donne :

$$\begin{cases} x_C = \nu_{CO_2} + \nu_{CO} + \nu_{suies} \cdot 0.9 \\ y_H = 2\nu_{H_2O} + \nu_{suies} \cdot 0.1 \\ z_O + 2\nu_{O_2} = 2\nu_{CO_2} + \nu_{CO} + \nu_{H_2O} \end{cases} \quad (14)$$

En réarrangeant les termes du système, on obtient les coefficients stœchiométriques :

$$\begin{cases} \nu_{CO_2} = x_C - (\nu_{CO} + \nu_{suies} \cdot 0.9) \\ \nu_{H_2O} = (y_H - \nu_{suies} \cdot 0.1)/2 \\ \nu_{O_2} = 2\nu_{CO_2} + (\nu_{CO} + \nu_{H_2O} - z_O)/2 \end{cases} \quad (15)$$

La résolution de ce système est comprise dans le modèle et dépend du combustible sélectionné par l'utilisateur depuis notre base de données Annexe A : **Aperçu de la Base de Données combustibles du modèle**, ce qui permettra d'avoir la réaction de combustion, et de calculer la masse des produits de combustion.

3.3.3. Evolution du HRR en fonction du temps :

Le HRR permet de suivre l'évolution du feu au fil du temps et de prédire son comportement. Il influence de nombreux aspects du feu, tels que la température de la couche de fumée et le risque de propagation du feu à des objets adjacents. Considérer le HRR comme une constante est insuffisant ; c'est pourquoi notre modèle inclura un graphe du développement du taux de

chaleur dégagé, basé sur une méthode « mise à l'échelle » [17], et qui suit le schéma habituel du HRR.

Les représentations souvent utilisées sont celles où on suppose une croissance et décroissance linéaires du feu, tandis que pour les incendies de bâtiments résidentiels ou de bureaux on utilise la croissance quadratique du feu $HRR = \alpha t^2$ [18], où la constante de croissance du feu (kW/s^2) varie selon le type de feu. Une autre méthode basée sur les travaux de Numajiri et Furukawa [19] utilise une fonction exponentielle unique pour représenter le taux de chaleur dégagé par un objet ;

$$HRR = HRR_{\max} \cdot n_s \cdot r_s (1 - e^{-k_s t})^{n_s - 1} \cdot e^{-k_s t} \quad (16)$$

La procédure que nous allons utiliser de « mise à l'échelle » est une synthèse des méthodes précédentes, supposant que l'évolution temporelle du HRR suit trois phases : une phase de croissance, suivie d'une phase où le HRR est constant, puis une phase de décroissance jusqu'à l'extinction.

$$HRR = \begin{cases} \alpha_c t^2 & \text{si } t < t_{fd} \\ HRR_{\max} & \text{si } t_{fd} \leq t \leq t_d \\ \alpha_d (t_f - t)^2 & \text{si } t_d \leq t \leq t_f \\ 0 & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (17)$$

Où :

- α_c : le taux de croissance dans le Tableau 3. 3.
- α_d : le taux de décroissance en W/s^2 ;
- p : pourcentage de la masse initiale de combustible au-delà duquel la décroissance du feu a lieu, pris à 30% ;
- HRR_{\max} : la puissance maximale du feu en W ;
- t_{fd} , t_d et t_{fin} : les instants (en secondes) où le feu atteint sa puissance maximale (feu pleinement développé), commence à décroître et s'éteint. Tel que ;

$$t_{fd} = \left(\frac{HRR_{\max}}{\alpha_c} \right)^{0.5} \quad (18)$$

$$t_d = t_{fd} + \frac{pm_0 \Delta H_{eff}}{HRR_{\max}} - \frac{1}{3} \cdot \alpha_c \cdot t_{fd}^3 \quad (19)$$

$$\alpha_d = \frac{HRR_{\max}^3}{[3m_0(1-p)]^2} \quad (20)$$

$$t_f = t_d + \left(\frac{HRR_{\max}}{\alpha_d} \right)^{0.5} \quad (21)$$

Tableau 3. 3: Taux de combustion correspondant à différentes vitesses de combustion

Vitesse de Combustion	$\alpha_c (\text{W/s}^2)$
-----------------------	---------------------------

Lente	3
Rapide	47
Très rapide	190

3.3.4. HRR_{conv} et HRR_{rad} :

Au fur et à mesure que le combustible et l'oxygène sont consommés, la chaleur est libérée sous forme de rayonnement et de chaleur convective.

$$HRR_{rad} = \chi_r HRR \quad (22)$$

$$HRR_{conv} = (1 - \chi_r) HRR \quad (23)$$

Tel que χ_r est définie de la même manière que l'efficacité de la combustion,

$$\chi_r = \frac{HRR_{rad}}{HRR_C} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta H_{rad}}{\dot{m} \cdot \Delta H_c} = \frac{\Delta H_{rad}}{\Delta H_c} \quad (24)$$

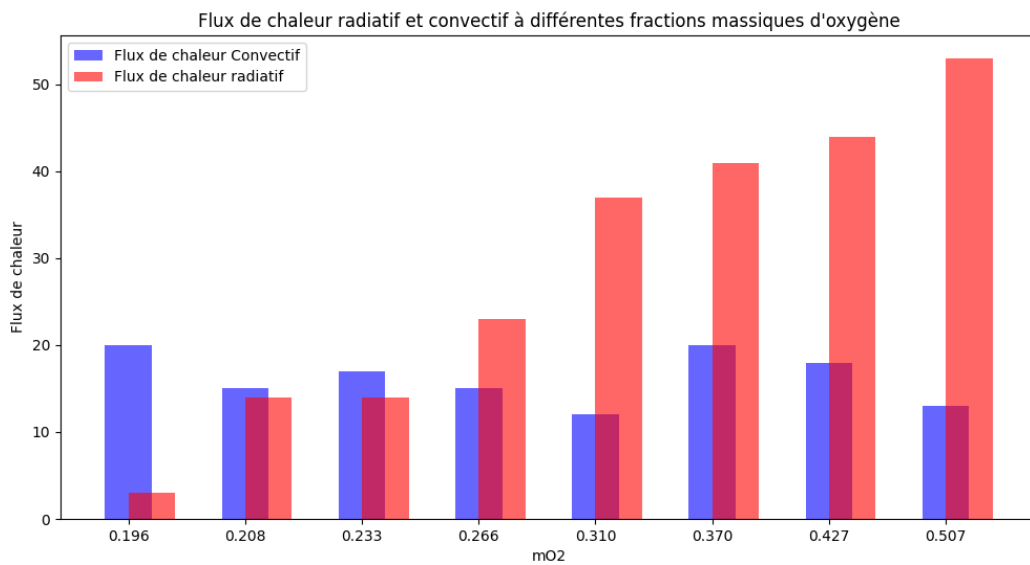


Figure 3. 4: Flux de chaleur radiatif et convectif de la flamme à différentes fractions massiques d'oxygène pour la combustion en régime permanent de plaques de polypropylène de 100×100 mm et de 25 mm d'épaisseur

La puissance libérée sous forme convective ou radiative dépend du combustible et de la ventilation, la taille de l'incendie modifie aussi cette distribution. Plus la taille de l'incendie est grande, plus la fraction de la chaleur chimique distribuée dans le composant radiatif est importante. Cette influence de la concentration en oxygène sur les paramètres du combustible est représentée sur la Figure 3. 4 pour des plaques de polypropylène dans l'appareil de propagation du feu ASTM E2058 conduite par Tewarson [20].

On retrouve également dans les travaux de Tewarson [15] les valeurs de la chaleur rayonnée pour de nombreux combustibles, qui seront par la suite pris pour constituer la base de données du modèle.

3.3.5. Combustion sous-ventilé

Un HRR contraint par O_2 est inférieur au taux de chaleur dégagée pour un feu ventilé puisque seul une partie des gaz de combustion brûlent et le HRR devient :

$$HRR = \min(\dot{m} \cdot \Delta H_{eff} , \dot{m}_{ent} \cdot y_{O_2} \cdot CL_{TI} \cdot \Delta h_{O_2}) \quad (25)$$

Où \dot{m}_{ent} : le flux entrainé dans le panache (sera présenté dans 3.3.) , y_{O_2} : fraction d'oxygène comme calculé précédemment.

Pour assurer une transition continue et précise près de la limite de richesse en carburant(oxygène), CFAST [11] propose un coefficient limite appelé CLOL (Lower Oxygen Limit) qui agit comme une fonction de lissage et qui a été adopté par notre modèle.

$$C_{TI} \approx \frac{\tanh(800(y_{O_2} - y_{O_{2,l}}) - 4) + 1}{2} \quad (26)$$

Avec la fraction d'oxygène limitante ; $y_{O_{2,l}} = 0.15$.

3.3.6. Combustion ventilée :

Le taux de chaleur dégagée (HRR) atteint son maximum lors du flashover. Cependant, ce dernier n'est atteint dans un feu de compartiment que si les conditions de ventilation le permettent. Plusieurs méthodes ont été développées pour mesurer le HRR maximal d'un feu confiné exposé à une ventilation.

Des modèles comme ceux de Babrauskas [21], Thomas [22] et McCaffrey [23] calculent le pic de taux de chaleur dégagée (HRR critique nécessaire pour l'occurrence du flashover). La méthode choisie pour notre modèle est basée sur le principe de la consommation d'oxygène. Cette méthode a été utilisée pour étudier la relation entre le taux de chaleur dégagée d'un incendie de véhicule et le facteur de ventilation [24].

On a \dot{m}_g , \dot{m}_a la masse d'air chaud et la masse d'air frais sorti et entré respectivement de l'ouverture de ventilation.

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d w \rho_g (2(\rho_a - \rho_g)g/\rho_g)^{\frac{1}{2}} h_g^{\frac{3}{2}} \quad (27)$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d w \rho_a (2(\rho_a - \rho_g)g/\rho_a)^{\frac{1}{2}} h_a^{\frac{3}{2}} \quad (28)$$

En supposant que $\dot{m}_g = \dot{m}_a$,et si tout l'air frais entrainé est consommé, On aura le pic HRR pour une ouverture de hauteur H (m) et d'aire $A(m^2)$.

$$HRR_{\max} = 1606A(H)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

3.4. Modèle du panache:

Le feu pompe de la masse et de l'énergie de la couche inférieure vers la couche supérieure, et ce à travers le panache, ce qui fait de lui un facteur très important dans la modélisation de la croissance du feu. Ce flux vertical est appelé le taux d'entraînement de masse, $\dot{m}_{ent}(z)$, et dépend du taux de chaleur dégagée et de la hauteur.

Les deux corrélations de Heskestad et de McCaffrey [25] ont été implémenté dans notre modèle, puisque la première produit de meilleures mesures de masse totale entraîné $\dot{m}_{ent}(z)$ pour la partie flottantes des panaches, alors que les corrélations empiriques de McCaffrey sont utilisées pour les parties de panache continu et intermittent. Ce choix est justifié par le fait que le modèle de McCaffrey est connu de surévaluer le taux d'entraînement de masse dans les parties hautes, cela est représenté dans Figure 3. 5 pour un feu de $HRR=2500Kw$, diamètre 1.2 m et $\chi_c = 0.7$.

La masse totale entraîné $\dot{m}_{ent}(z)$ dans le panache à la hauteur z par Heskestad est ;

$$\dot{m}_{ent}(z) = 0.071 HRR_{conv}^{\frac{1}{3}}(z - z_0)^{\frac{5}{3}} \left(1 + 0.026 HRR_{conv}^{\frac{2}{3}}(z - z_0)^{-\frac{5}{3}} \right) \quad (30)$$

Avec, z_0 la position de la source virtuelle du feu [26].

$$z_0 = -1.02 D + 0.083 HRR^{\frac{2}{5}} \quad (31)$$

Et le diamètre caractéristique, D donné par [27], Avec $\rho_{\infty} c_p T_{\infty}$ sont les propriétés de l'air ambiant.

$$D = \sqrt{\frac{4Af}{\Pi}} = \left(\frac{HRR}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (32)$$

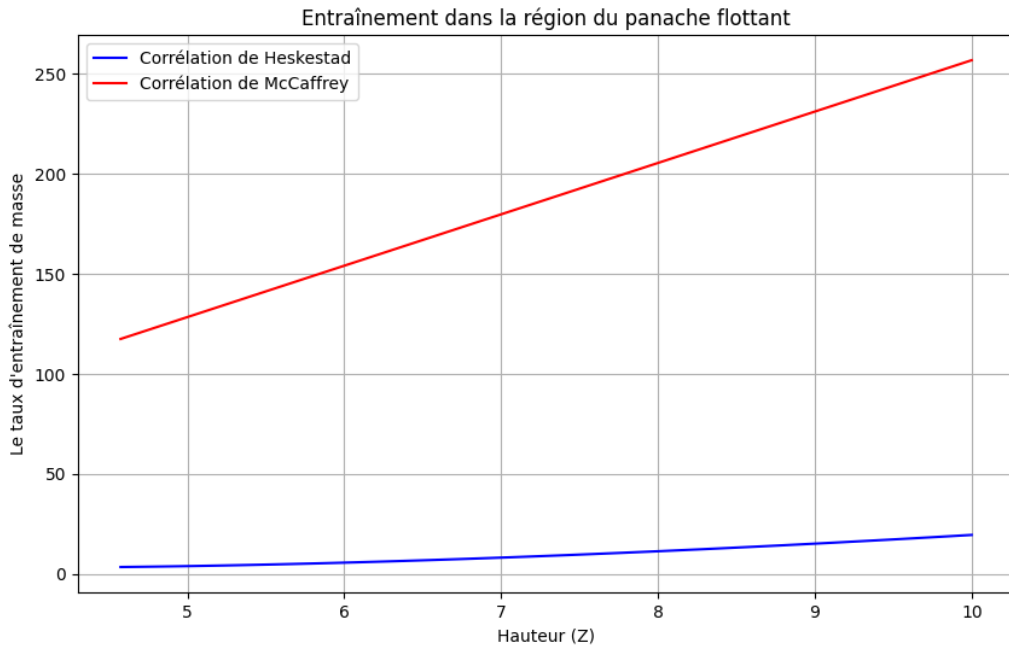


Figure 3. 5: Comparaison entre les corrélations de McCaffrey et Heskestad pour le calcul de l'entraînement du panache

Dans le cas contraire, ou le panache représenté est un panache faible ; le modèle utilisera les corrélations données par McCaffrey [25].

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\dot{m}_{ent}}{HRR} = 0.011 \left(\frac{z}{2} \right)^{0.566} & \text{pour } 0 \leq \left(\frac{z}{2} \right) \leq 0.08 \\ \frac{\dot{m}_{ent}}{HRR} = 0.026 \left(\frac{z}{2} \right)^{0.909} & \text{pour } 0.08 \leq \left(\frac{z}{2} \right) \leq 0.20 \\ \frac{\dot{m}_{ent}}{HRR} = 0.124 \left(\frac{z}{2} \right)^{1.895} & \text{pour } 0.2 \leq \left(\frac{z}{2} \right) \end{array} \right. \quad (33)$$

On introduit dans ce travail, la conception d'un algorithme, représenté dans la figure suivante.

Algorithm 1 Calculations for HRR and Mass Entrainment

Require: H_{room} , X_r , hrr_values , Z_0 , my_way **Ensure:** m_dent

```
1:  $z\_values \leftarrow \text{linspace}(0, H_{room}, 50)$ 
2:  $HHRR \leftarrow X_r \times \text{array}(hrr\_values)$   $\triangleright Q_{rad} = xrQ$ 
3:  $HRRC \leftarrow (1 - X_r) \times \text{array}(hrr\_values)$   $\triangleright Q_{conv} = (1 - xr)Q$ 
4:  $m\_ent\_values \leftarrow []$ 
5: for  $Z$  in  $z\_values$  do
6:   if  $0 \leq my\_way(Z) \leq 0.08$  then
7:      $m\_ent \leftarrow 0.011 \times my\_way(Z)^{0.566} \times \text{array}(hrr\_values)$ 
8:   else if  $0.08 \leq my\_way(Z) \leq 0.20$  then
9:      $m\_ent \leftarrow 0.026 \times my\_way(Z)^{0.909} \times \text{array}(hrr\_values)$ 
10:  else
11:     $m\_ent \leftarrow 0.071 \times HRRC^{1/3} \times (Z - Z_0)^{5/3} \times (1 + 0.026 \times HRRC^{2/3} \times$   

     $(Z - Z_0)^{-5/3})$ 
12:  end if
13:   $m\_ent\_values.append(m\_ent)$ 
14: end for
15:  $m\_ent\_values \leftarrow \text{array}(m\_ent\_values)$ 
16:  $m\_dent \leftarrow \text{average}(m\_ent\_values)$ 
17:  $m\_dent \leftarrow m\_dent / \text{linalg.norm}(m\_dent)$ 
```

Figure 3. 6: Algorithme développé pour le calcul du débit d'entraînement

3.5. Transfert de chaleur:

La chaleur dégagée par le feu est transmise à l'environnement sous différentes formes : par rayonnement, par convection et par conduction.

- Rayonnement : transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques.
- Convection : transfert de chaleur entre les gaz chauds et les surfaces solides.
- Conduction : transfert de chaleur à travers un matériau solide.

Puisque notre modèle ne contiendra pas de calcul des effets de la structure, la transmission de chaleur par conduction ne sera pas prise en compte. Le rayonnement sera quant à lui pris en compte directement par la fraction rayonnée et seul le mode par convection sera calculé.

3.5.1. Calcul du transfert par convection :

La convection tient compte du transfert de chaleur entre les gaz chauds et les surfaces solides. En raison de la présence du ceiling jet, elle sera mesurée différemment pour les toits et pour les murs et plancher.

➤ **Convection aux murs et plancher :**

Chaleur convective vers une surface solide :

$$\dot{q}_c'' = h(T_g - T_s) \quad (34) \quad \text{Avec } h = C|T_g - T_s|^{1/3} \quad (35)$$

h est le coefficient de transfert de chaleur convective, il est exprimé par une corrélation simple développé dans le modèle CFAST [11], T_g est la température des gaz chauds, T_s est la

température de la surface et C est un coefficient empirique pris à 1,52 pour le sol et le plafond et à 1,31 pour les murs.

➤ **Convection au plafond :**

Au début d'un incendie, la convection est dominée par un jet de plafond. Le chapitre d'Alpert dans le SFPE Handbook [28] propose une corrélation empirique pour quantifier le flux de chaleur convective du jet de plafond vers une surface relativement froide.

$$\dot{q}_{c,moy}'' = \frac{0.27HRR_{conv}}{LW^{0.68}H^{0.64}} \quad (36)$$

Avec L , W et H sont la longueur, la largeur et la hauteur du compartiment respectivement.

Une fois la phase de croissance a été dépassé, la convection se calculera de la même manière que pour les murs seulement le coefficient de transfert de chaleur change.

$$h = \max\left(\frac{\dot{q}_{c,moy}''}{T_u - T_s}, C|T_u - T_s|^{\frac{1}{3}}\right) \quad (37)$$

T_u : la température moyenne de la couche supérieure et T_s : la température de la surface du plafond.

3.6. Occurrence du Flashover:

Le flashover, représente l'un des événements les plus redoutés lors d'un incendie. Il se caractérise par l'inflammation quasi-instantanée de tous les éléments combustibles présents dans un local clos ou semi-clos, générant une libération massive de chaleur et de gaz brûlants. Ce phénomène brutal s'explique par la combinaison de deux facteurs clés qui sont l'accumulation de chaleur et de gaz combustibles et l'atteinte d'un seuil critique de température. Notre objectif étant de prédire son occurrence, le modèle suivra deux conditions prédictives :

- ✓ Flux thermique au sol : Un flux thermique supérieur à 20kW
- ✓ Température au plafond : suivre l'approche du seuil critique de 600°C

3.6.1. Température au plafond :

Le jet de plafond fait référence à l'écoulement rapide de gaz sous la surface du plafond, entraîné par la flottabilité des produits de combustion chauds du panache. La figure 2-2.1 montre une idéalisation d'un écoulement de jet de plafond axisymétrique à différentes positions radiales, r , sous un plafond non confiné.

La présence de ce flux de jet de plafond entraîne une température plus élevée que celle de la couche supérieure. Ainsi, pour prédire l'occurrence d'un flashover, il est plus judicieux d'utiliser les corrélations d'Alpert [28] pour quantifier la température maximale d'un jet de plafond. Ces corrélations sont largement utilisées dans les calculs d'analyse des risques. Il est important de noter que, pour tenir compte de la présence d'une couche supérieure, la température ambiante

dans la corrélation a été remplacée dans notre modèle par la température de cette même couche, T_u .

$$T_{cj} = 16.9 \frac{HRR^{\frac{2}{5}}}{H^{\frac{2}{3}}} + T_u \quad \text{pour } \frac{r}{H} \leq 0.18 \quad (38)$$

$$T_{cj} = 5.38 \frac{HRR^{\frac{2}{3}}/H^{\frac{5}{3}}}{(r/H)^{\frac{2}{3}}} + T_u \quad \text{pour } \frac{r}{H} > 0.18 \quad (39)$$

On a développé pour cela un Algorithme pour le calcul de la température au plafond, représenté dans la figure suivante :

Algorithm 2 Calculation of T_{cj} Values

Require: $hrr_values, H_room, T_a, W_room$

Ensure: $average(T_{cj_values})$

```

 $T_{cj\_values} \leftarrow []$ 
for  $r \leftarrow 0$  to  $W\_room/2$  do
  if  $\frac{r}{H\_room} < 0.18$  then
     $T_{cj} \leftarrow 16.9 \times (array(hrr\_values)^{2/5}) / (H\_room^{5/3}) + T_a$ 
  else
     $T_{cj} \leftarrow 5.38 \times (array(hrr\_values)^{2/5}) / (H\_room^{5/3}) / ((r/H\_room)^{2/3}) + T_a$ 
  end if
   $T_{cj\_values}.append(T_{cj})$ 
end for
return  $average(T_{cj\_values})$ 

```

Figure 3. 7: Algorithme développé pour le calcul de la température au plafond

3.6.2. Flux thermique radiatif au sol :

Un flux thermique supérieur à 20 kW/m² au sol est un indicateur clé du risque de flashover, indiquant une combustion intense et une rapide accumulation de chaleur. Pour modéliser ce phénomène de flux thermique radiatif au sol, nous avons utilisé le modèle de la flamme solide de Shokri Beyler [29].

Ce modèle représente la flamme comme un cylindre de diamètre égal à celui de la nappe de combustible et de hauteur égale à celle de la flamme, rayonnant uniformément sur toute sa surface.

Equation générale :

Le calcul de la densité du flux thermique radiatif est exprimé par Shokri et Beyler [29] :

$$\dot{q}_r'' = EF_{12}\tau \quad (40)$$

E : le pouvoir émissif, qui correspond à la quantité d'énergie rayonnée, par unité de surface de la flamme (kw/m²).

F_{12} : le facteur de vue entre l'élément extérieur et la flamme (sans dimension).

τ : Transmission atmosphérique (sans dimension).

Pouvoir émissif (radiance) :

Pour déterminer le pouvoir émissif efficace de la flamme, E , la formule empirique de Shokri et Beyler [29] a été utilisée. Celle-ci est basée sur des mesures expérimentales du flux de chaleur radiatif des feux de nappe.

$$E = 58(10^{-0.00823D}) \quad (41)$$

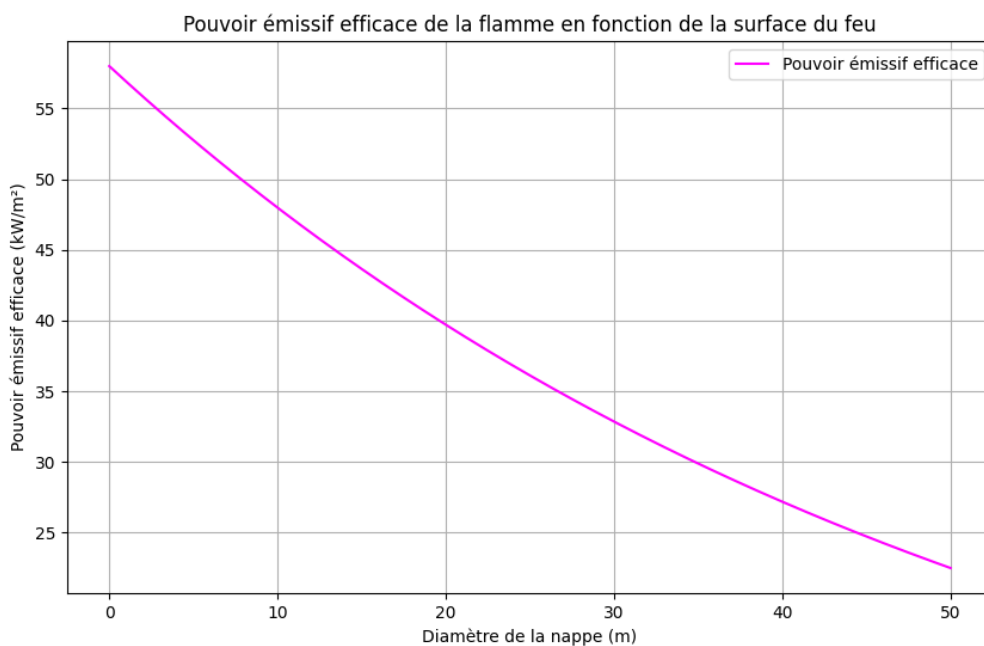


Figure 3. 8: Pouvoir émissif efficace de la flamme en fonction de la surface du feu, déterminé par Shokri et Beyler

Cette corrélation rend compte de la diminution du pouvoir émissif efficace avec l'augmentation de la surface en feu, en raison, principalement de l'accumulation de suies et de l'obscurcissement de la flamme. La figure montre la réduction de la radiance en fonction du diamètre.

Coefficient de transmission atmosphérique :

Afin de prendre en compte l'atténuation de la radiance de la flamme vers l'environnement due à l'absorption et à la dissipation d'une partie des radiations émises par la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et les poussières, nous utilisons le coefficient de transmission atmosphérique (τ).

Ce coefficient correspond à la fraction de chaleur transmise à l'atmosphère. En considérant la vapeur d'eau comme le principal facteur d'absorption, nous avons calculé la transmissivité à l'aide de l'expression empirique suivante [30], sans recourir aux abaques.

$$\tau = c_4 [P_W(d - R)]^{-0.09} \quad (42)$$

Avec P_W (Pa) la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air, d (m) la distance de la cible par rapport au centre du feu, R (m) le rayon de la nappe c_4 une constante égale à $2,02 Pa^{0.09} m^{0.09}$.

Dans notre modèle également la distance de la cible est prise égale à la largeur du local/4 et la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air est calculée pour la pression de vapeur saturante et une humidité relative de 60% à l'aide de la formule suivante :

$$P_W = RH P_W^0 \quad (43)$$

Facteur de configuration :

Le facteur de vue entre la flamme et une surface réceptrice est la fraction de rayonnement quittant la première qui est interceptée par la seconde. Ce facteur varie entre 0 et 1 : une valeur de 1 indique une interception totale du rayonnement, tandis qu'une valeur de 0 signifie qu'aucune interception n'a eu lieu. Ce terme intervient dans le calcul du flux thermique au sol et il dépend de la position de par rapport au feu d , de la hauteur L de flamme et du diamètre D , il est calculé dans notre modèle de la manière suivante ;

$$F_{12} = \sqrt{F_{12,H}^2 + F_{12,V}^2} \quad (44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Où ;} \\ F_{12,V} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} + \frac{Ah}{\pi S \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \\ F_{12,H} = \frac{(B - \frac{1}{S})}{\pi \sqrt{B^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} - \frac{A - 1/S}{\pi \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \end{array} \right. \quad (45)$$

$$\text{Avec } S = \frac{2d}{D} \quad , \quad h = \frac{2L}{D} \quad \text{et} \quad A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S} \quad , \quad B = \frac{1 + S^2}{2S}$$

3.7. Etude des effets de l'incendie :

3.7.1. La visibilité :

Un des critères de tenabilité mentionné dans le tableau 1.1 est la visibilité en raison de son rôle critique à déterminer l'efficacité de l'évacuation des personnes. Lors d'un incendie il y a une production rapide de grandes quantités de fumées, composées de gaz de combustion, de gouttelettes d'eau ou de combustible en suspension, et de suies qui peuvent rendre la visibilité

contraignante. Son seuil étant de 10m (de l'échelle de visibilité) en dessous de laquelle la fumée est considérée comme opaque.

Il reste à mesurer ce critère important et pour ce notre modèle requiert le calcul de la quantité de fumée produite (elle prendra la valeur de la concentration en suies calculée dans la partie 3.2.2) et de l'opacité D_u .

Différence entre opacité et Visibilité : L'opacité est une caractéristique optique de la fumée, représentant sa capacité à atténuer un faisceau lumineux entre une source et un observateur.

La visibilité quant à elle est une conséquence physiopathologique de l'opacité et dépend de l'objet à voir à travers la fumée, sur un fond donné.

Évaluation de la quantité de fumée : Tous les modèles d'évaluation de la visibilité sont calculés à partir de l'opacité des fumées, exprimée sous forme de coefficient d'extinction ou de densité optique. La densité optique comme prise dans le modèle CFAST [11] est de ;

$$D_u = \frac{k_m m_s'''}{\ln 10} \quad (46)$$

m_s''' : concentration en suies, k_m : coefficient d'extinction pris à $8700m^2/kg$ d'après les recommandations de Mulholland [31]. Ensuite pour la visibilité notre modèle est basé sur l'équation de Jin [32] qui a étudié le lien entre la visibilité et le coefficient d'extinction.

$$S = \frac{k}{2.303D_u} \quad (47)$$

Avec S la visibilité (m), D_u densité optique spécifique, m^{-1} et k Constante de proportionnalité,

(Pour les systèmes réfléchissants $k = 3$ et pour les systèmes lumineux $k = 8$).

On a également développé un algorithme pour le calcul de la visibilité, représenté dans la figure suivante :

Algorithm 3 Tracking Minimum Visibility Over Time Range

Require: $tfd, td, Y_{soot}, m_{fuel}, V_{room}, k$ **Ensure:** $min_visibility, min_visibility_time$

```
 $min\_visibility \leftarrow 10$   
 $min\_visibility\_time \leftarrow \text{None}$   
for  $t \leftarrow tfd$  to  $td - 1$  do  
   $m\_soot \leftarrow \frac{Y_{soot} \times m_{fuel}}{V_{room}}$   
   $du \leftarrow \frac{8700 \times m\_soot}{\log(10)}$   
   $Visibility \leftarrow \frac{k}{2.303 \times du}$   
  if  $Visibility < 10$  then  
    if  $Visibility < min\_visibility$  then  
       $min\_visibility \leftarrow Visibility$   
       $min\_visibility\_time \leftarrow t$   
    end if  
  end if  
end for  
return  $min\_visibility, min\_visibility\_time$ 
```

Figure 3. 9: Algorithme développé pour le calcul de la visibilité

3.7.2. Temps d'évacuation :

Ainsi, le temps nécessaire pour l'évacuation est le temps pendant lequel les critères de tenabilité de l'être humain, pour qu'ils se maintiennent en dessous des seuils définis, de la température, de la visibilité et des niveaux de gaz toxique.

Cela signifie que la sécurité des occupants d'un bâtiment ou d'un espace dépend de la période durant laquelle les conditions critiques restent à des niveaux acceptables pour permettre une évacuation sûre.

3.8. Moyens de lutte anti-incendie :

Une bonne connaissance du phénomène d'incendie permet sa mitigation, en utilisant des moyens de lutte anti-incendie adaptés. Ces moyens varient en termes de types et d'efficacité. Il est évident que plus on attend pour attaquer un début d'incendie, plus les moyens de lutte doivent devenir importants. Il convient donc de procéder à une extinction rapide dans les premières minutes, lorsque le feu est encore maîtrisable.

Les moyens de lutte sont de deux types ; la protection feu passive et active ;

La protection Feu Passive :

La PFP joue un rôle préventif. Ce type de protection est généralement assurée par certaines caractéristiques de construction qui permettent de résister à un incendie pendant une durée déterminée, telles que constructions résistant au feu ou murs et coupe-feu, exutoires de fumées et de chaleur et écrans de cantonnement. Ces mesures n'agissent pas sur l'incendie directement mais visent à :

- Stopper la progression des fumées.
- Éviter la propagation des flammes.
- Contenir les effets thermiques dans la zone sinistrée.

-
- Maintenir la stabilité au feu des éléments de structure.

La Protection Feu Active :

La Protection Feu Active (PFA) joue un rôle curatif et représente l'ensemble des systèmes de détection et extinction d'un incendie. Elle a donc pour but d'avertir les usagers d'un espace du déclenchement d'un feu, et d'agir sur celui-ci via une intervention automatique ou humaine.

Puisque les mesures automatiques ne nécessitent pas d'intervention humaine directe, on s'intéressera dans ce travail qu'aux mesures manuelles. Ces dernières consistent à utiliser des dispositifs tels que ;

- Les extincteurs
- Les Robinets d'Incendie Armés (R.I.A)
- Poteaux d'incendie

Pour faciliter le choix des moyens de lutte spécifiques à chaque type d'incendie, notre modèle propose d'abord une vérification de la conformité des extincteurs disponibles. Ensuite, en fonction de l'évolution du feu, il recommande le moyen de lutte le plus approprié.

3.8.1. Utilisation du référentiel APSAD :

L'APSAD (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommages) L'APSAD est une association française qui regroupe les compagnies d'assurances et joue un rôle essentiel dans la promotion de la sécurité incendie et la prévention des risques de dommages. Le tableau regroupant les principales normes APSAD d'installation des systèmes de lutte contre l'incendie est présenté

Tableau 3. 4: Les principales Normes de " APSAD" d'installation pour les équipements et systèmes de sécurité incendie

Norme	Domaine
R1	Extinction automatique à eau, type sprinkler
R3	Extinction automatique à CO2
R4	Extincteurs portatifs et mobiles
R5	Robinets d'Incendie Armés
R12	Extinction automatique à mousse (haut foisonnement)
R13	Extinction automatique à gaz (gaz inertes et gaz inhibiteurs)

3.8.2. Extincteurs :

L'extincteur portatif, mobile ou fixe est le matériel de première intervention le plus couramment utilisé dans l'attente de moyens d'intervention plus puissants. Les extincteurs portatifs ou mobiles doivent pouvoir être mis en œuvre rapidement et correctement par quiconque constate un début d'incendie. La norme américaine NFPA 10 et la règle française APSAD R4 sont deux références utiles lors de la sélection, l'installation, l'inspection, la maintenance et le test des extincteurs portatifs et mobiles.

Choix et catégories d'extincteurs :

Un extincteur d'incendie n'est efficace que s'il est adapté au feu qu'il est appelé à combattre. Les critères permettant de définir cette efficacité n'ont pu être applicables qu'après qu'une définition des différentes classes de feu a été établie. La règle APSAD R4 distingue 5 classes de feu :

- ✚ Classe A : feux de matériaux solides, généralement de nature organique, dont la combustion se fait normalement avec formation de braises, tels que le bois, le tissu, le papier, le caoutchouc et de nombreux plastiques.
- ✚ Classe B : feux de liquides ou de solides liquéfiables, tels que les graisses de pétrole, les goudrons, les huiles, les peintures à base d'huile, les solvants et l'alcool.
- ✚ Classe C : feux de gaz, comme le méthane (CH₄), acétylène et gaz hydrogène(H₂).
- ✚ Classe D : feux de métaux, tels que le magnésium, le titane, le zirconium, le sodium, le lithium et le potassium.
- ✚ Classe F : feux liés aux auxiliaires de cuisson sur les appareils de cuisson (huile et graisse).

Dans le Tableau 3. 5, on a représenté l'adaptation des agents extincteurs aux classes de feux A, B, C et F. Il faut n'utiliser sur les feux de classe D que des extincteurs à poudre spécifique (à base de graphite, carbonate de sodium, chlorure de sodium, etc) après avoir vérifié la compatibilité de la poudre avec le risque à protéger.

Les agents d'extinction efficaces pour les feux d'huiles (classe B) ne sont pas toujours adaptés aux feux de graisse de cuisson (classe F), ces derniers s'enflammant par auto-inflammation à des températures élevées (340 à 360°C), alors que les feux de classe B s'allument à des températures plus basses correspondant à leur point d'éclair. Les extincteurs de classe F nécessitent une durée de décharge plus longue que les extincteurs conventionnels.

Tableau 3. 5: Adaptation des extincteurs aux classes de feux A, B, C et F selon l'APSAD R4

Agents extincteurs	Feux de classe				Emploi sur courant électrique < 1000 V 2
	A	B	C 1	F	
Eau en jet pulvérisé 3	BE	I	I	I	Oui 7
Mousse	EL	BE5	I	BE 4	non
Poudre BC	I	BE	BE	I	oui
Poudre ABC ou polyvalente	BE	BE	BE	I	oui
Dioxyde de carbone (CO ₂)	I 6	BE	I	I	oui
Hydrocarbures halogénés	I	BE	BE	I	oui

BE: bonne efficacité
EL : efficacité limitée
I : Inadapté

1. On ne doit éteindre un feu de gaz que si l'on peut aussitôt en couper l'alimentation
2. Ces matériels peuvent être utilisés sur des appareils ou des conducteurs sous tension par des personnes expérimentées. Ces extincteurs doivent porter la mention « utilisables sur installation électrique inférieure à 1000 V ».
3. Le rendement extincteur de l'eau est amélioré par des additifs certifiés.
4. La présence du pictogramme classe F doit apparaître sur l'appareil.
5. Les feux d'alcools, d'éthers, de cétones, de solvants polaires doivent être attaqués au moyen de mousses spéciales.
6. Ces extincteurs abattent les flammes mais les braises peuvent entraîner la reprise du feu. Un arrosage à l'eau complétera leur action.
7. Attention, l'eau de ruissellement peut être conductrice.

Conformité des extincteurs :

Chaque agent extincteur est adapté à des classes spécifiques de feu comme vu précédemment, à partir de ce raisonnement notre modèle propose la vérification de la conformité de l'extincteur utilisé comparant à celui qui est adapté.

Tel que ;

»Si extincteur disponible \equiv extincteur adéquat donc le modèle retourne « conforme »

»Sinon le modèle retourne « non conforme »

On a pour cela fait développer un Algorithme pour la vérification de la conformité des extincteurs, représenté dans la figure suivante :

Algorithm 4 Check Conformity Based on Selected Text

Require: *selected_text*, *extinct1*, *extinct2*, *extinct3*
Ensure: *result*

```
selected_text  $\leftarrow$  request.form.get('extinct')  
result  $\leftarrow$  None  
if selected_text  $\in$  [extinct1, extinct2, extinct3] then  
    result  $\leftarrow$  'conform'  
else  
    result  $\leftarrow$  'not conform'  
end if  
return result
```

Figure 3. 10 : Algorithme développé pour la vérification de la conformité des extincteurs

3.8.3. Robinets d'Incendie Armés (R.I.A) :

Une installation d'extincteurs mobiles n'est efficace que sur un foyer naissant. La quantité d'agent extincteur et temps d'utilisation sont limités. L'autre moyen efficace pour un foyer naissant toutefois plus puissant que des extincteurs sont les robinets d'incendie armés et offrent une première intervention en attendant que des moyens plus fiables puissent être mis en œuvre.

Des références comme l'APSAD R5 ou NFPA 14 offrent des descriptions détaillées sur l'installation et la vérification des RIA, parmi les caractéristiques de ces moyens de lutte qui doivent être présentes sont [33] :

- L'approvisionnement continu en eau, la source en eau peut être un réseau d'eau public ou autres exclusivement destinée à la lutte contre l'incendie et notamment à l'alimentation des RIA comme le réservoir d'eau à charge gravitaire ou le réservoir d'eau sous pression d'air),
- La longueur du tuyau, l'APSAD R5 stipule également une longueur de 30 m maximum pour que toute la surface des locaux protégés puisse être efficacement atteinte,
- Le robinet diffuseur est choisi dépendamment des conclusions de l'analyse de risque et de l'intervention prévue ce qui assure différent type de jet,
- Le diamètre nominal des RIA est lui aussi défini, en fonction du domaine d'application, par la réglementation. Le Tableau 3. 6 montre le diamètre nominal à utiliser en fonction de la nature des produits fabriqués, entreposés ou utilisés, déterminée par leur potentiel calorifique,
- Leurs emplacements et leur facilité d'utilisation sont aussi des caractéristiques importantes des RIA.

Tableau 3. 6: Diamètre nominal des RIA selon le domaine d'application

Diamètre nominal	Potentiel calorifique (MJ/ m^2)	Classification du risque
DN 19	Jusqu'à 500	Risques courants à faible potentiel calorifique
DN 25	De 500 à 900	Risques moyens
DN 33	Au-dessus de 900	Risques importants ou dangereux

Efficacité et utilisation des RIA :

Les robinets d'incendie armés offrent une réponse rapide aux incendies, ils sont adaptés pour combattre divers types d'incendies, en particulier les feux de classe A (impliquant des matériaux combustibles ordinaires tels que le bois, le papier et le tissu). Et sont Souvent exigés par les codes du bâtiment et les réglementations comme faisant partie intégrante d'un système complet de sécurité incendie, d'ailleurs une installation de RIA constitue l'un des moyens de secours prévus par la règle APSAD R6 relative à l'organisation d'un service de sécurité

incendie. Cependant leurs utilisations restent efficaces que pour les premiers stades des incendies.

3.9. Conclusion :

Ce chapitre a exploré en détail les formules mathématiques et le système d'équations différentielles utilisés pour la modélisation à zones du phénomène d'incendie. Nous avons présenté les algorithmes et le raisonnement logique permettant de relier les résultats obtenus à l'interprétation des effets observés.

Nous avons abordé une variété de méthodes pour modéliser le feu et sa propagation, en intégrant des avancées récentes dans nos approches. De l'évaluation de la chaleur dégagée à la proposition d'un algorithme pour vérifier la conformité des extincteurs, nous avons couvert divers aspects des moyens de lutte anti-incendie.

Dans le chapitre suivant, nous procéderons à la visualisation du développement de ce logiciel et à la simulation des feux de différents combustibles.

Chapitre 4 : Développement et Résultats

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'implémentation du modèle et les résultats qu'il donne à partir des modèles mathématiques introduites dans le chapitre 3.

Le fonctionnement du modèle sera exposé et toutes les valeurs résultantes seront évalués et comparés au calcul empirique pour les corrélations et aux modèles existants pour les paramètres du modèle à zones. Enfin, nous procéderons à présenter les améliorations prévues au modèle et qui y seront ajoutés prochainement.

4.2. Entrées et Sorties du modèles :

Le modèle développé repose sur une interface user-friendly, ce qui désigne une facilité d'utilisation pour l'utilisateur du système technique de manière simple et intuitive. La base de données « combustibles » créé a pour but de réunir des paramètres tirés de la littérature, d'autres informations spécifiques au compartiment ou l'incendie s'est déclenché et des conditions de l'environnement sont introduites par l'utilisateur. En ajoutant à ça des hypothèses simplificatrices sont supposées. Ces hypothèses sont ;

- Nombre d'éléments de parois est de 4,
- La pression est homogène sur tout le compartiment,
- Les paramètres thermodynamiques sont constants peu importe la composition du mélange gazeux. Les chaleurs spécifiques à volume constant et pression constante, c_v et c_p , avec $C_p = 1012 \frac{J}{kg \cdot K}$, la constante des gaz et le rapport des chaleurs spécifiques γ , sont reliés par les relations :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4 \quad \text{Et} \quad R = \frac{\gamma - 1}{\gamma} c_p \approx 289.14 \frac{J}{kg \cdot K} ;$$

4.2.1. Entrées de l'utilisateur :

Toutes les autres données spécifiques aux conditions ambiantes et taille du local sont données par l'utilisateur, à savoir :

- La durée de simulation ;
- Les conditions extérieures (Température et humidité relative) ;
- Masse initiale du combustible et la surface du feu ;
- Hauteur, largeur et longueur du compartiment.

4.2.2. Sorties du modèle :

En sortie, le modèle fournit en premier lieu les résultats empiriques qui permettent à l'utilisateur de mieux situer son feu pour les conditions spécifiées, ensuite en résolvant le système d'équations différentielles on représente la modélisation des mouvements de

propagation du feu. En outre, le travail comprend l'étude des effets systématiques de l'incendie pour une meilleure prise de décision dans la lutte contre les incendies.

Comme sorties de calcul empirique on a :

- Le débit de combustion en fonction du temps (HRR)
- Fractions massiques des produits de combustion en fonction de la formule chimique du combustible
- Température du panache (Ceiling Jet)
- Le terme source d'enthalpie relatif aux échanges radiatifs, h_{rad} , qui apparaît dans l'équation de l'énergie

Modélisation en modèle à zones donne :

- L'évolution temporelle des grandeurs en zone chaude et froide (pression, température, masse volumique, volume, concentration des espèces chimiques)
- La masse de suies per unit volume(concentration)

Etude des critères de tenabilité :

- L'instant où l'embrassement généralisé a lieu, s'il se produit ;
- La visibilité en fonction de la masse de suies donc en fonction du temps
- L'efficacité de moyen de lutte en fonction du développement du feu donc en fct du temps
- Type d'extincteur adéquat

4.3. Base De Données :

Afin de faciliter la tâche pour l'utilisateur, on a créé une base de données « combustibles » qui retient les propriétés statiques des combustibles impliqués comme la formule chimique après pyrolyse, les rendements en suie, en monoxyde de carbone (CO), la chaleur de combustion effective et sa fraction rayonnée, puissance max du feu HRR_{max} .

Pour cela une base de données SQL a été réalisé, le choix de SQL est dû à sa performance en tant qu'outil puissant pour organiser, gérer et récupérer des données de manière structurée et sécurisée, avec SQL comme langage d'interaction.



Figure 4. 1: Logo de Structured Query Language SQL

4.4. Développement du modèle :

4.4.1. Langages de développement du modèle :

Langage Python

Nous avons utilisé pour tout le développement du modèle le langage de programmation Python, un langage interprété, multiparadigme et multiplateformes très populaire. Le choix de python vient de sa syntaxe flexible et ses nombreuses applications. Python permet à la fois le développement back-end d'applications web et l'exécution de calculs mathématiques complexes, ce qui en fait un outil polyvalent et efficace pour notre projet.



Figure 4. 2: Logo du langage de programmation Python

Langage HTML

Pour le front-end, nous avons utilisé HTML « Hypertext Markup Language », un langage de balisage essentiel pour structurer et présenter le contenu sur le web. HTML nous a permis de créer des interfaces utilisateur intuitives et accessibles, en organisant le contenu de manière logique et en facilitant l'intégration avec d'autres technologies web telles que CSS et JavaScript.



Figure 4. 3: Logo du Langage de balisage HTML

Langage CSS

Nos différentes pages HTML une fois créées nous avons intégré le langage informatique permettant de les mettre en forme qui est le langage CSS « Cascading Style Sheets » ce qui signifie « feuille de style en cascade », ce langage nous a permis de réaliser une interface attrayante et a été utile pour la mise en forme des textes, la disposition des éléments, la définition des couleurs des textes, des bordures, des arrière-plans ainsi que le contrôle des bordures des éléments y compris leurs styles.



Figure 4. 4: Logo du langage feuilles de style en cascade CSS

Langage JavaScript

Notre modèle est un logiciel interactif qui contient des formulaires, des entrées utilisateur et des actions de l'utilisateur comme les clics et les entrées clavier, toutes ces fonctionnalités interactives et réactives ont été ajoutées par le langage JavaScript (JS).



Figure 4. 5: Logo du langage JavaScript

4.4.2. Résolution du système d'équations différentielles sur Python :

Le système de 8 équations est un système d'équations différentielles ordinaires (EDO), pour sa résolution nous avons fait appel à « `solve_ivp` » qui est une fonction de la bibliothèque « `Scipy` » en Python, cette fonction permet de spécifier l'intervalle de temps, les valeurs initiales et la fonction qui définit les dérivées.

L'initialisation des conditions initiales est un facteur important lors de la résolution d'un système d'équations différentielles qui doit être pris avec soin. C'est pourquoi notre choix résulte de nombreux essais visant à trouver un équilibre optimal entre la représentativité de la réalité et la stabilité du système.

Pour la résolution nous avons sélectionné la méthode « `RK45` », c'est-à-dire Runge-Kutta 45, la notation 4(5) indique qu'il s'agit d'une méthode de quatrième ordre avec une estimation d'erreur de cinquième ordre, ce qui la rend particulièrement précise et efficace.

```
#Initial_conditions
y0 = [1.0, 61.3, 1.0, 61.3, 101325.0, 0, 300.0, 300.0]
# Solving the system ----- #
tol = 1e-6
toll = 1e-9

solution = solve_ivp(system_of_odes, t_span, y0, method='RK45', t_eval=t_eval, rtol=tol, atol=toll)
```

Figure 4. 6: Ligne de commande de la Résolution du système d'équations différentielles sur Python

4.5. Validation du modèle :

Pour la validation du modèle nous avons effectué plusieurs essais chaque fois en insérant des entrées différentes. Chaque essai avait pour but de vérifier la validité d'une ou plus des sorties du modèle. (Nous avons remarqué une variabilité des résultats par rapport à la réalité, due à la non stabilité du système d'équation ce qui fera l'objet d'amélioration dans la continuité en Startup.)

4.5.1. Essai sur un feu de GPL :

Le Gaz de pétrole liquéfié composé principalement de butane et de propane est largement utilisé dans diverses applications d'où l'intérêt d'en faire l'objet de ce premier essai. En effet, le GPL est très inflammable et brûle avec une flamme chaude et intense, ce qui peut entraîner une propagation rapide du feu à d'autres matériaux inflammables dans un entrepôt. Le GPL, plus lourd que l'air, s'accumule dans les zones basses, augmentant ainsi le risque d'inflammation avec de petites sources d'énergie, comme une étincelle de 0,3 mJ [34].

Afin de simuler les effets d'un incendie de GPL par le modèle on commence par spécifier les entrées, une température ambiante de 300K, une masse de GPL de 12.5Kg pour une surface de $2.5m^2$ avec une épaisseur à 0.01m.

Le calcul de la surface du feu a été fait à partir de la masse volumique du GPL qui est considéré comme majoritairement constitué de propane C_3H_8 .

Pour $\rho = 500kg/m^3, m = 12.5kg$ on a $S = 2.5m^2$

The image shows a web-based form for entering simulation parameters. The form is titled "Information on Compartment" in orange. It contains several input fields, each with a green checkmark indicating successful validation. The inputs are:

- Select a material: LPG
- Enter the room's ambient Temperature: 300
- Enter the surface of the fire: 2.5
- Enter the room's width: 7
- Enter the room's height: 6
- Enter the mass: 12.5
- Ventilation: Off (toggle switch)
- Is the combustion velocity fast?: Yes
- How is the exit sign like?: Illuminated

Figure 4. 7: Entrées du modèle pour une simulation d'un feu de GPL

Résultats Fournis par le modèle :

- Le système d'équations, une fois résolu, fournit un graphe de la température de la zone supérieure au fil du temps, atteignant une valeur maximale d'environ 900K. Cette valeur est cohérente avec un feu de GPL de cette envergure, reflétant les caractéristiques thermiques intenses typiques de ce type de combustion.

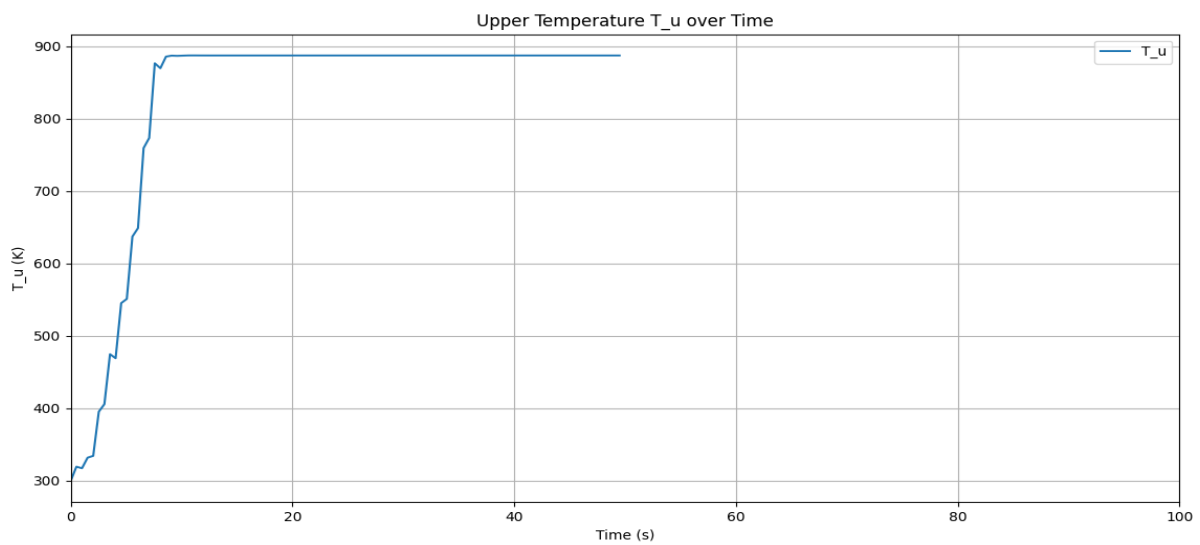


Figure 4. 8: Température de la zone supérieure du feu de GPL

- Un autre résultat que l'on peut obtenir du modèle est la valeur maximale du taux de chaleur dégagée et le flux de chaleur radiatif au sol. La première valeur est essentielle pour estimer l'ampleur de l'incendie tant dis que le \dot{q}_r'' permet d'évaluer le flux reçu par une cible.

radiative thermal flux at the ground and Peak HRR



Peak Heat Release Rate: 9925.960496797932kW

Radiative heat flux: 769.9223727073437kW

Figure 4. 9 : HRR max calculé et flux thermique radiatif au sol

- La Figure 4. 10 est la représentation de l'évolution du taux de chaleur dégagée en fonction du temps. On remarque que le HRR max a atteint rapidement sa valeur maximale, ce comportement est dû à la vitesse rapide de combustion du gaz de pétrole liquéfié.

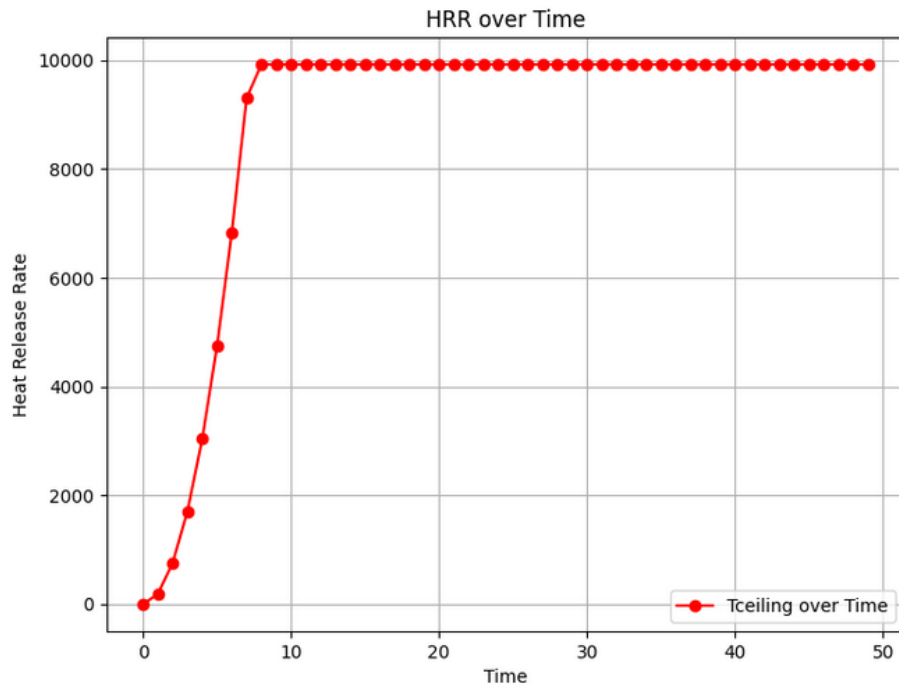


Figure 4. 10: Représentation graphique de l'évolution du taux de chaleur dégagée par un incendie de GPL

- L'interprétation des résultats intégrée dans notre modèle, englobe l'estimation du temps d'atteinte du seuil critique de visibilité ainsi que l'occurrence du Flashover. Comme expliqué dans la partie 3.6, pour prédire un tel phénomène dangereux on suit la température au plafond et le flux thermique au sol. Une courbe de la température au plafond suite à l'incendie est tirée directement des résultats du modèle sur la Figure 4. 11.

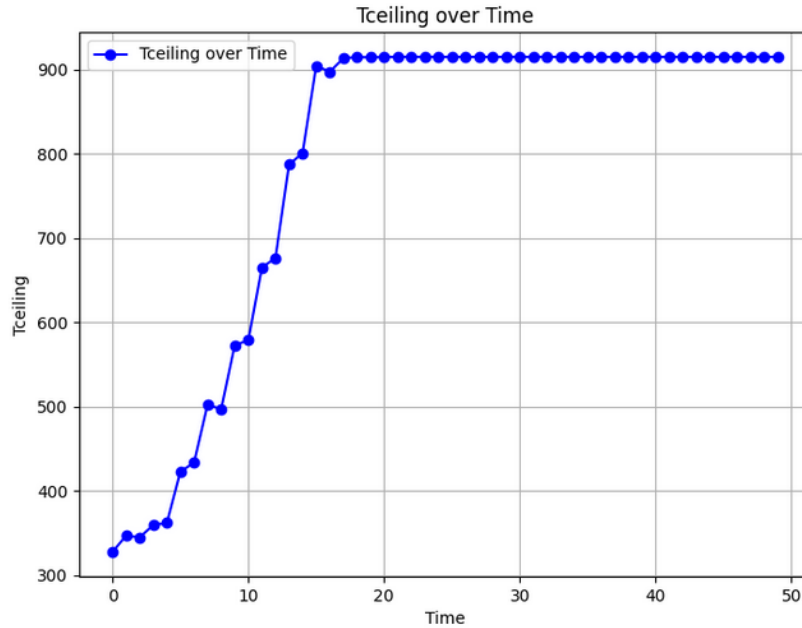


Figure 4. 11: Température au plafond pour le feu de GPL

Figure 4. 9et Figure 4. 11 montrent que les critères du Flashover sont dépassée rapidement, et vient confirmer l’interprétation du modèle montré sur la Figure 4. 12.

Check the Flashover Occurence



Flashover occurrence : Flashover occurrence detected.

Time of occurrence : 15 seconds

Figure 4. 12: Prédiction de l’occurence du Flashover pour l’incendie de GPL

4.5.2. Essai sur feu d’hydrocarbure :

Le deuxième essai a porté sur un feu d’huile de transformateur, un liquide hydrocarboné à haute densité énergétique utilisé couramment dans les transformateurs électriques. Lorsqu’elle brûle, l’huile de transformateur produit des températures très élevées en raison de sa composition chimique et de sa capacité à libérer une grande quantité d’énergie thermique. Mais la capacité caractéristique pour laquelle on a pris ce liquide hydrocarboné c’est sa production significative de suies, à travers cet essai on a réalisé une comparaison entre la perte de visibilité pour un feu de GPL et celui de l’huile de transformateur.

Afin d’avoir une comparaison correcte nous avons employé les mêmes entrées que ceux du premier essai sur le gaz de pétrole liquéfié, cependant il est nécessaire d’ajuster la densité pour avoir une estimation précise de la surface du feu, celle-ci est à environ $860\text{kg}/\text{m}^3$ dans des conditions atmosphériques normales. Pour une masse de 12.5kg on a une surface de 1.45 m^2 .

Résultats fournis par le modèle :

- Le modèle Figure 4. 12 montre qu'un feu d'huile de transformateur sur une surface de 1,45 m² atteint une température maximale de 430K (156,85°C). Cette température élevée indique un feu intense, posant des risques significatifs pour l'infrastructure et la sécurité du personnel. Une telle chaleur peut endommager gravement les équipements et faciliter la propagation du feu.

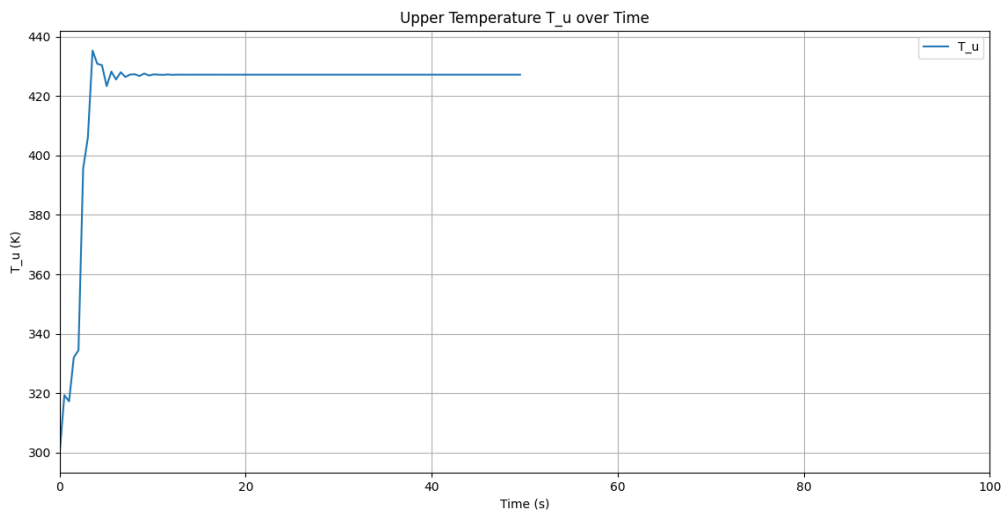


Figure 4. 13: Température de la zone supérieure en fonction du temps pour le feu d'huile de transformateur

- La température maximale atteinte est directement liée au taux de dégagement de chaleur (HRR). La cohérence du modèle est confirmée par la figure, qui montre que le HRR maximal et la température maximale de 430K sont atteints simultanément.

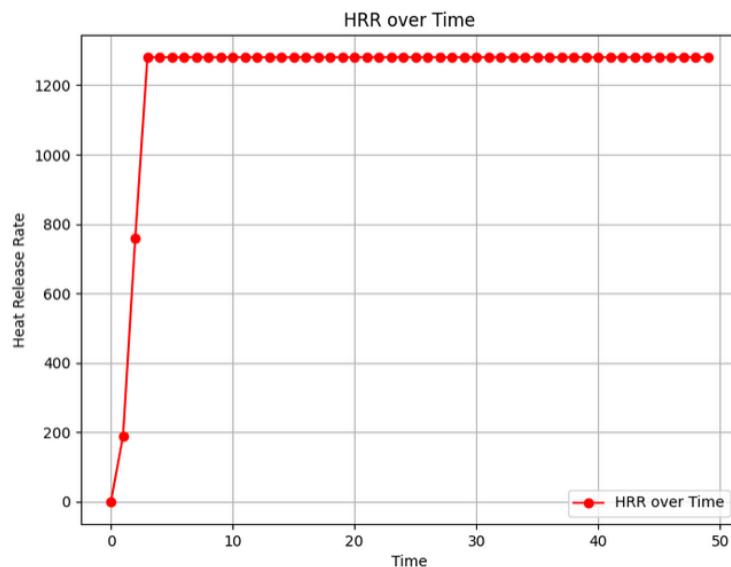


Figure 4. 14: Courbe d'évolution du HRR pour un feu d'huile de transformateur

- L'interprétation du modèle Figure 4. 15 montre que le flashover ne s'est pas produit, indiquant que les conditions de température et de dégagement de chaleur n'ont pas atteint les seuils critiques nécessaires pour déclencher ce phénomène.

Check the Flashover Occurrence

Flashover occurrence : No flashover occurrence detected.

Time of occurrence : None seconds

Figure 4. 15: Résultat de l'occurrence du Flashover pour un feu d'huile de transformateur de 1.45 m^2

- En comparant la température enregistrée au plafond, qui est inférieure à 500°C , avec la valeur critique de 600°C nécessaire pour déclencher un flashover, il est clair que les conditions nécessaires n'ont pas été atteintes. Cette différence significative confirme la précision et la validité du modèle dans la prédiction des phénomènes redoutés.

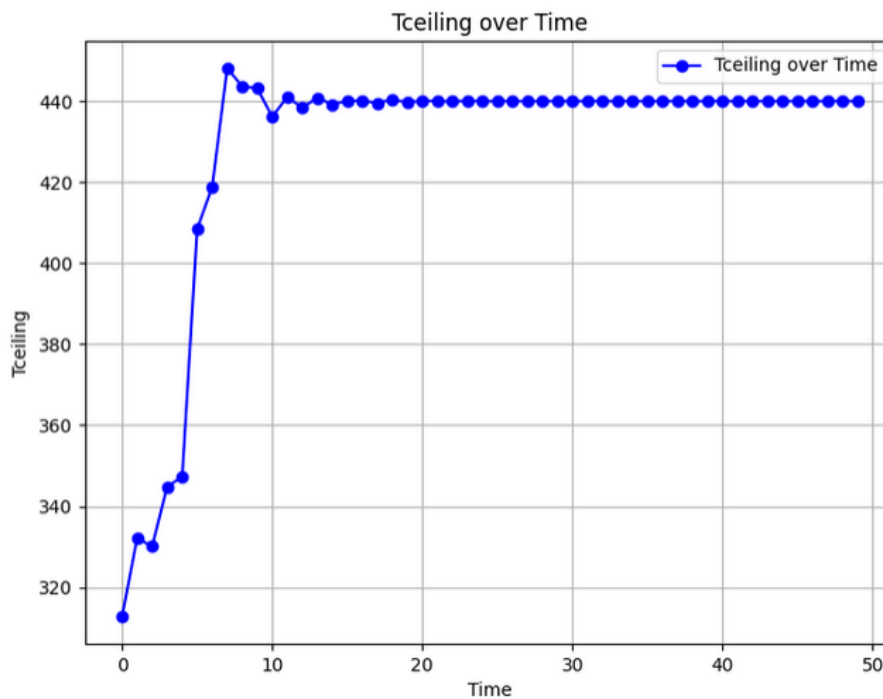


Figure 4. 16: Température au plafond pour le feu d'huile de transformateur

- La deuxième interprétation des effets donnée par le modèle concerne la visibilité Figure 4. 17 , montrant une valeur minimale de 0,5 mètres, bien en dessous du seuil critique de 10 mètres pour les critères de tenabilité.

Visibility Information



Minimum Visibility detected : 0.5235760240873694

Minimum Visibility detected at time : 2 seconds

Figure 4. 17: Visibilité minimale enregistrée par le modèle pour le feu d'hydrocarbure

4.5.3. Comparaison entre les résultats d'un feu de GPL et d'Hydrocarbure :

Le gaz de pétrole liquéfié et l'huile de transformateur bien qu'ils soient tous deux des hydrocarbures, ils diffèrent dans leurs compositions et leurs propriétés Cette différence entraîne une réaction distincte lors de la combustion. Dans cette section, nous visons à identifier et analyser ces différences en comparant les résultats du modèle aux observations réelles.

4.5.3.1. Comparaison de la production de suies :

Comme première observation le Tableau 4. 1, indique une formation de particules de suies plus importante suite au feu d'huile de transformateur que dans un feu de GPL. En effet, Les suies sont des particules fines de carbone qui se forment lorsque les hydrocarbures brûlent de manière incomplète. Puisque l'huile de transformateur est composée de chaînes d'hydrocarbures plus longues et plus complexes que le GPL, cela conduit à une combustion moins complète et à une formation accrue de suies [35].

Tableau 4. 1: Comparaison des résultats sur les suies pour le feu de GPL et feu d'huile de transformateur

	Feu de GPL	Feu d'Huile de transformateur
Masse totale de suies dégagée	0.3	0.8
Visibilité minimale enregistrée	1.3	0.5
Temps d'enregistrement de visibilité minimale (secondes)	7	2

Visibility Information

Minimum Visibility detected : 0.5235760240873694

Minimum Visibility detected at time : 2 seconds

Huile de transformateur

Visibility Information

Minimum Visibility detected : 1.2871243925481164

Minimum Visibility detected at time : 7 seconds

Gaz de pétrole liquéfié

Figure 4. 18: Comparaison entre la visibilité minimale détecté pour le GPL et l'Huile de transformateur

4.5.3.2. Comparaison de la chaleur dégagée :

Le Tableau 4. 2 montre clairement que le feu de GPL dégage une chaleur plus conséquente, ce qui est observé également en pratique. En effet, le GPL brûle de manière plus complète et efficace, maximisant ainsi la production de chaleur. Mais aussi parce que son pouvoir calorifique est supérieur, le GPL libère plus d'énergie par kilogramme de combustible brûlé par rapport à l'huile de transformateur.

Tableau 4. 2: Comparaison de la chaleur dégagée par un feu de GPL et d'huile de transformateur

	Feu de GPL	Feu d'Huile de transformateur
Taux de chaleur dégagé max(kW)	9926	2259
Température maximale(K)	900	450
Temps d'atteinte de la température max(secondes)	9	9

4.5.4. Essai sur le PMMA :

Le PMMA, ou polyméthacrylate de méthyle, est un polymère thermoplastique transparent. Grâce à ses nombreux avantages, tels que sa grande transparence, sa facilité de production et sa légèreté, il est souvent utilisé comme alternative légère et incassable au verre. Cette utilisation croissante nous a incité à en faire l'objet d'un essai. Pour effectuer des comparaisons précises, nous avons conservé une masse constante de 12,5 kg, ce qui donne après calcul et une densité de PMMA à 1180 kg/m^3 une surface de 1.06 m^2 .

Résultats fournis par le modèle :

- Le modèle montre une élévation de température de la couche haute jusqu'à 370K Figure 4. 19, à cette température une propagation des flammes est probable. Ce qui nécessite des mesures d'extinction et de sécurité adéquates.

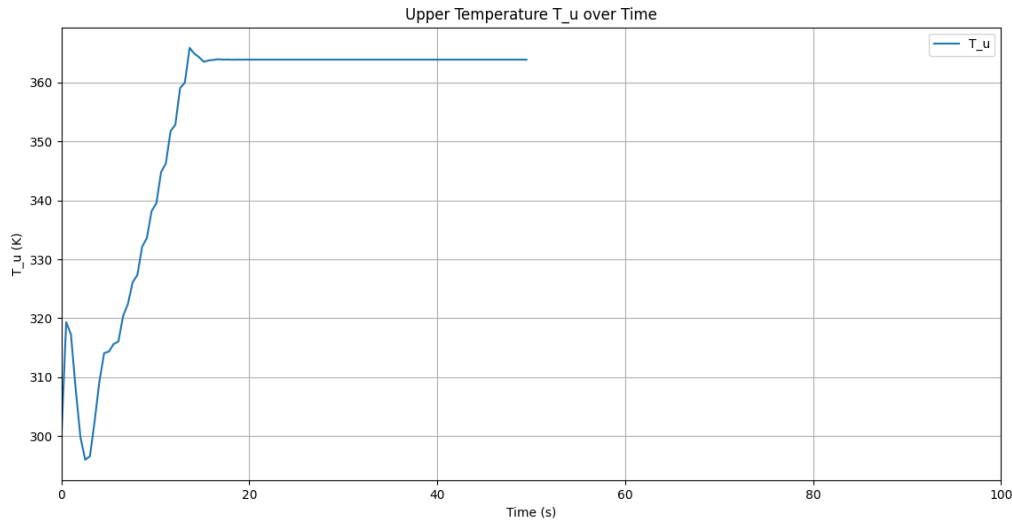


Figure 4. 19: Evolution de la température de la couche haute suite au feu de PMMA

- Dans la Figure 4. 20 on a une production de 0.125 kg de CO ce qui correspond à 0.01 kg / kg de PMMA brûlé. Sachant que le monoxyde de carbone est un gaz toxique, incolore et inodore, ce qui peut représenter un danger important pour la santé en cas d'inhalation.

Soot and Carbon Monoxide Mass values

mco: 0.125

msoot: 0.27499999999999997

Figure 4. 20: Production de suies et de CO par un feu de PMMA

- Le flux thermique au sol est supérieur à 288 kW Figure 4. 21 , mais l'occurrence du flashover n'est pas détecté puisque la température au plafond n'atteint pas la valeur critique.

radiative thermal flux at the ground and Peak HRR

Peak Heat Release Rate: 501.9436057968496kW

Radiative heat flux: 288.94075200244646kW

Figure 4. 21: Flux radiatif au sol pour un feu de PMMA de surface 1.06m²

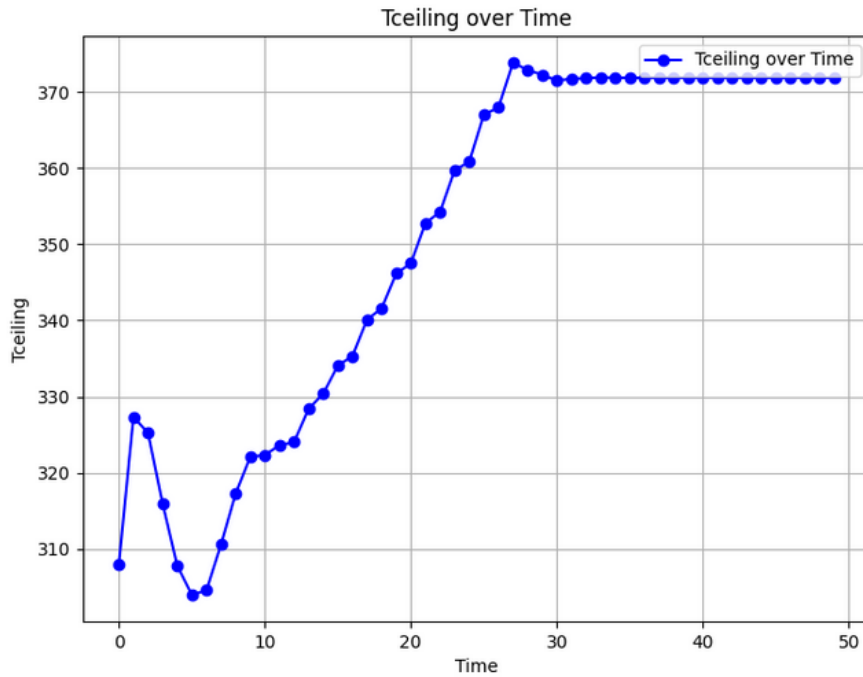


Figure 4. 22: Température au plafond en fonction du temps pour un feu de PMMA

Check the Flashover Occurence

Flashover occurrence : No flashover occurrence detected.

Time of occurrence : None seconds

Figure 4. 23: Détection de Flashover pour un feu de PMMA

4.5.5. Influence de l'épaisseur de liquide combustible déversé (cas du kérosène) :

Nous souhaitons évaluer l'influence de l'épaisseur de la surface de combustion sur le comportement du feu et les effets qu'il engendre. Pour ce faire, nous avons choisi d'effectuer ces tests sur le kérosène, un liquide inflammable dérivé du pétrole brut, principalement utilisé comme carburant pour les moteurs à réaction et les lampes à huile. Lorsqu'il brûle, ce carburant produit une grande quantité de chaleur ainsi que des gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). Ce qui rend ce type d'essai d'autant plus intéressant afin d'améliorer la gestion du risque incendie liés aux incendies de kérosène.

4.5.5.1. Epaisseur de 1cm :

Nous avons pris une première valeur d'épaisseur de 1 cm pour une masse de kérosène de 12,5 kg, en tenant compte que la densité du kérosène est approximativement de 825kg/m³, d'où la surface

$$S = 1.5m^2.$$

Cela donne comme résultats :

- Une Température de la couche supérieure maximale a environ 530 K ;
- Une hauteur de flamme à 3.8m ;
- Un flux thermique radiatif au sol à 508.3 kW ;
- Un flux de chaleur pic à 2339kW ;

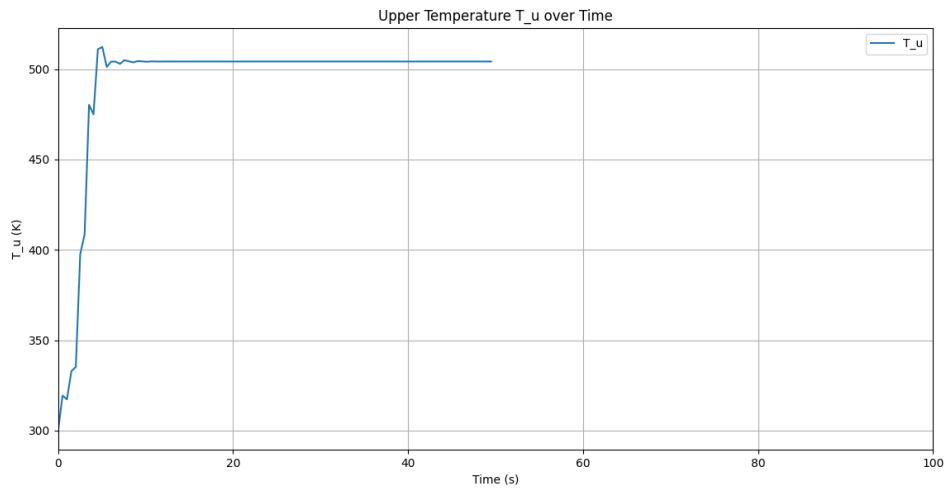


Figure 4. 24: Courbe d'évolution de la température de la couche haute d'un feu de Kérosène (1.5m²)

L'interprétation fournit par le modèle indique :

- Une visibilité minimale à 0.28m ;
- Non occurrence du Flashover

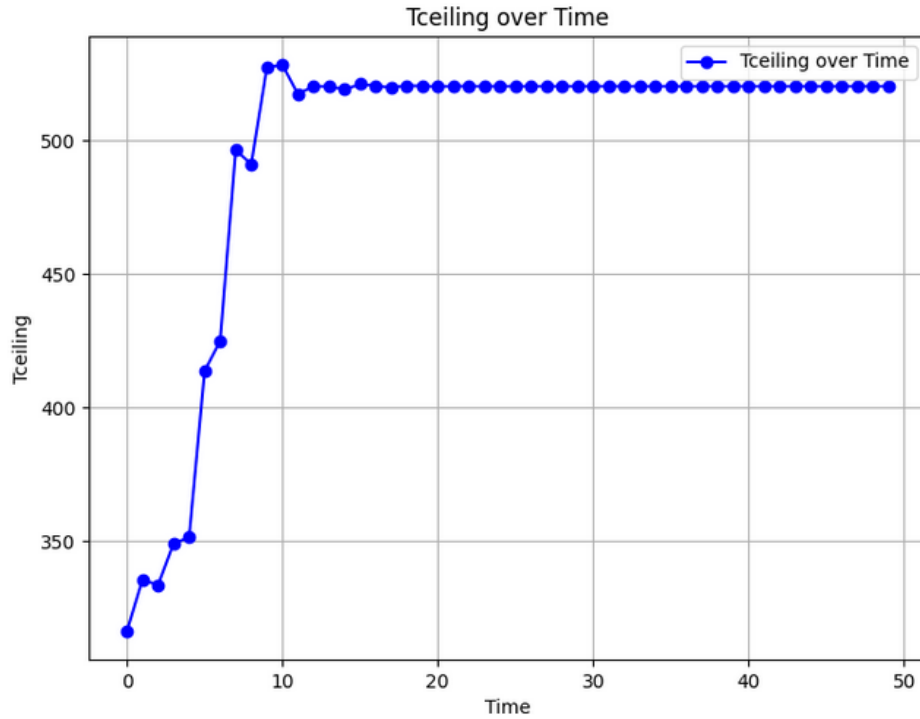


Figure 4. 25: Température au plafond lors du feu de Kérosène de diamètre ($3.8m^2$)

4.5.5.2.Epaisseur de 0.4 cm :

Une plus mince épaisseur résulte en un plus grand diamètre de la nappe du feu, une épaisseur de 0.4 cm ainsi donne $3.8m^2$. Une surface de cette taille a montré une température plus élevée 710K.

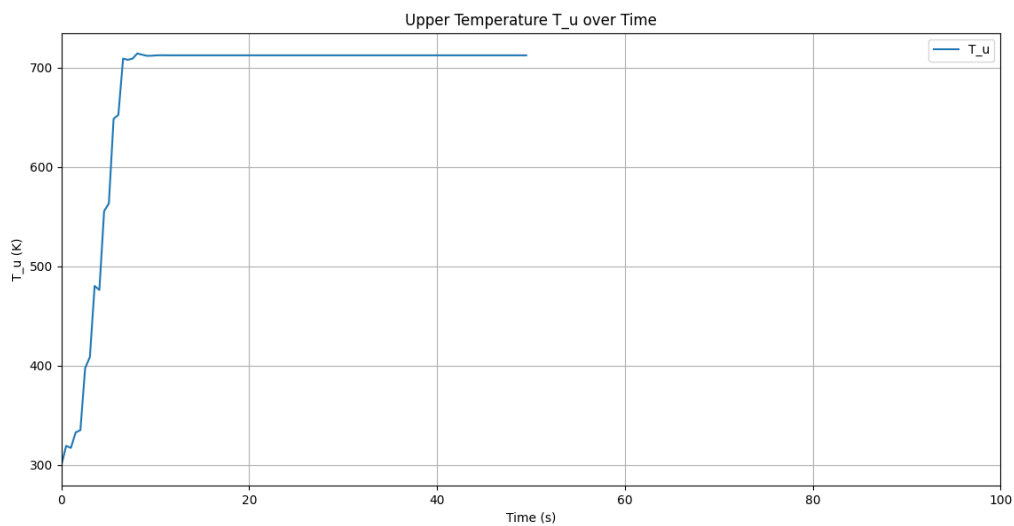


Figure 4. 26: Température de la couche haute du feu de kérosène de diamètre ($3.8m^2$)

- Hauteur de flamme à 5.4m
- Flux thermique radiatif au sol 959.8kW
- Taux de chaleur dégagée max à 5969.7kW

-
- Température max au plafond à 740K

Flame Height Result

L: 5.367543379434319

Figure 4. 27: Hauteur de flamme de kérosène (3.8m²)

L'interprétation des effets de ce feu fournit par le modèle indique :

- Visibilité minimale 0.27m(5secondes)
- Flashover non détecté

Visibility Information

Minimum Visibility detected : 0.27581236983173923

Minimum Visibility detected at time : 5 seconds

Figure 4. 28: Visibilité minimale feu de kérosène de3.8m²

4.5.5.3.Epaisseur de la nappe à 2cm :

Pour une épaisseur de 2 cm de la nappe de kérosène, le diamètre correspondant est de 0,8 m. Voici les résultats fournis par le logiciel pour cette configuration.

- Hauteur de flamme à 3m ;
- Flux thermique radiatif au sol à 329Kw ;
- Taux de chaleur dégagée max à1220kW ;
- Température max au plafond à 450 K

Flame Height Result

L: 3.0042038893347884

Figure 4. 29: Hauteur de flamme de kérosène (0.8m²)

Ce qui aura pour effets ;

- Visibilité minimale à 0.7m (2secondes)
- Pas de Flashover

4.5.5.4.Synthèse de l'influence de l'épaisseur de la nappe du feu :

On remarque que l'épaisseur de la nappe de kérosène influence de manière significative la surface de la nappe de feu et, par conséquent, les caractéristiques du feu. Une épaisseur plus mince (0,4 cm) résulte en une surface plus grande (3,8 m²) et produit des températures plus élevées, des hauteurs de flamme plus grandes et des flux thermiques plus importants. À l'inverse, une épaisseur plus épaisse (2 cm) résulte en une surface plus petite (0,8 m²) et produit des températures, hauteurs de flamme et flux thermiques plus faibles. Il est également notable que la production de suies dépend davantage du type de combustible que du diamètre de la nappe, car elle varie peu avec l'épaisseur de celle-ci.

Ces résultats sont cohérents avec la réalité puisqu'une nappe de combustible plus mince s'étend sur une plus grande surface, permettant une plus grande interaction avec l'oxygène et une combustion plus intense ce qui soulignent l'importance de la configuration de la nappe de combustible dans la dynamique de l'incendie et la nécessité d'ajuster les mesures de lutte anti-incendie en fonction des caractéristiques spécifiques du feu.

4.6. Synthèse des essais :

Ces différents essais nous ont permis de comparer différents types de feux et de tester la validité du modèle en confrontant ses résultats à la réalité.

Une observation montre que le GPL et le kérosène présentent un risque incendie à redouter, le GPL produit une quantité de chaleur maximale importante atteignant 9925 kW, favorisée par sa densité qui engendre une large surface de feu de 2.5 m². Il génère également la plus haute flamme mesurée à 7.5 m et atteint une température au plafond élevée de 910 K.

La visibilité la plus basse est observée avec le kérosène à 0.01 m d'épaisseur, suivi de près par l'huile de transformateur, soulignant les risques potentiels accrus pour l'évacuation et la lutte contre l'incendie. Les températures maximales au plafond sont enregistrées avec le GPL et le kérosène à 0.004 m, reflétant l'intensité de leur combustion et l'énergie libérée. Par ailleurs, le kérosène à 0.004 m présente le flux thermique radiatif le plus élevé, pouvant accroître les risques de propagation du feu sur le sol.

En conclusion, le GPL et le kérosène sont les plus redoutés en raison de leur intensité, tandis que l'huile de transformateur est préoccupante pour la quantité significative de suie produite, et le PMMA reste un sujet d'inquiétude pour sa capacité à propager rapidement les flammes.

Tableau 4. 3: Synthèse générale des différents essais effectués avec le modèle développé

Combustible	Masse (Kg)	Epaisseur (m)	Surface du feu (m ²)	HRR max (kW)	Hauteur de Flamme (m)	Flux radiatif au sol (kW)	Température max au plafond (K)	Visibilité (m)
GPL	12.5	0.01	2.5	9925	7.5	769.9	910	1.3
Kérosène	12.5	0.01	1.5	2339	3.8	508.3	540	0.28
Kérosène	12.5	0.004	3.8	5969	5.3	960	740	0.27
Kérosène	12.5	0.02	0.8	1220	3	329	450	0.7

PMMA	12.5	0.01	1.06	501	1.64	288.9	375	1.4
Huile de transformateur	12.5	0.01	1.45	2259	3.8	497	530	0.5

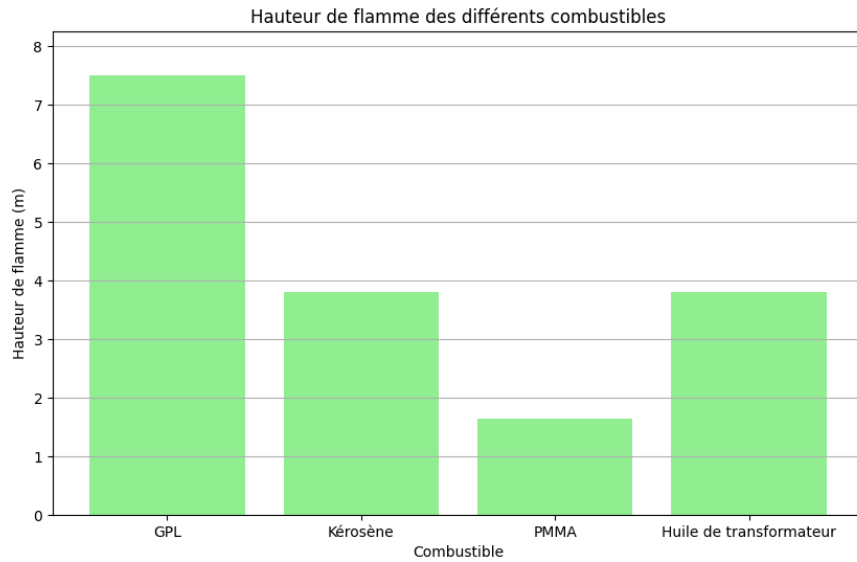


Figure 4. 30: Hauteur de flamme des différents combustibles à 0.01m épaisseur

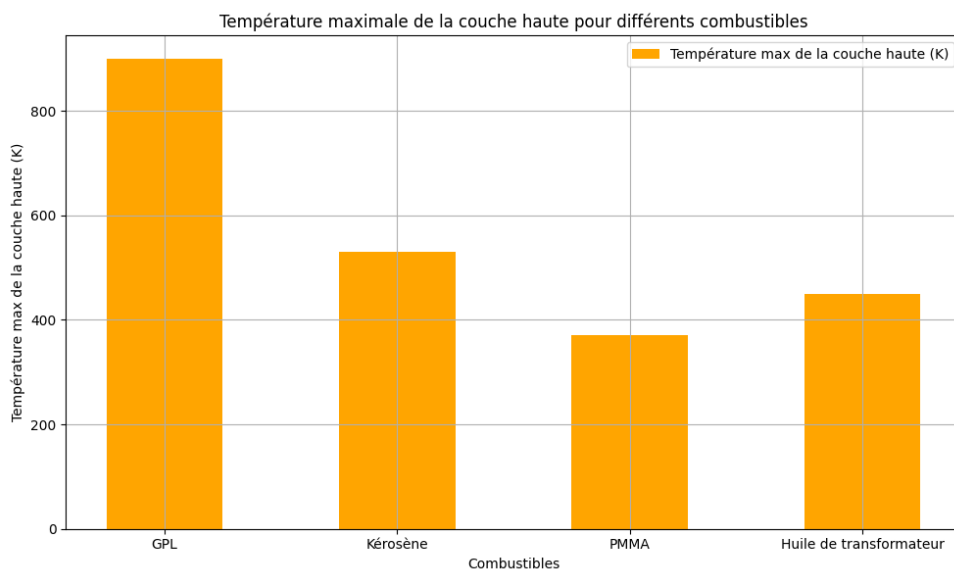


Figure 4. 31: Différentes Températures max pour les différents combustibles

4.7. Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre les équations et corrélations discutées dans les chapitres précédents, ainsi que les outils et langages de programmation essentiels au développement du logiciel. L'analyse des résultats du modèle a révélé plusieurs points forts :

-
- Une estimation précise de la production de chaleur,
 - Une estimation fiable de la hauteur de flamme,
 - Une bonne prédiction de l'occurrence du Flashover et de la visibilité.

Cependant, il est important de noter que le modèle nécessite encore des améliorations significatives, notamment en termes de temps de calcul, en raison de l'instabilité du système actuel. Ces améliorations sont essentielles pour renforcer la robustesse et la précision du modèle dans des applications pratiques

Chapitre 5 Etude Financière et Business Model Canvas

5.1. Introduction :

Ce travail fera l'objet d'une startup, dont la définition est une jeune entreprise à capacité de croissance rapide qui se caractérise par son innovation. Tout business se définit par le problème qu'il résout, quel que soit le chemin emprunté pour y parvenir. Notre objectif est de proposer un logiciel intégrant trois offres clés : maîtriser, diminuer et sauver. Pour Maîtriser les effets de l'incendie, diminuer les coûts et sauver les vies.

Les chapitres précédents ont présenté le fonctionnement du logiciel de management du risque incendie et de la modélisation du feu. Ce chapitre explore le potentiel de rentabilité du modèle à travers un Business Model Canvas, suivi par l'introduction des indicateurs de performance qui seront adoptés.

5.2. Entreprise Saas :

Notre startup est un **business SaaS (Software as a Service)** puisqu'elle repose sur la fourniture de logiciel via le cloud, accessible par les utilisateurs en ligne moyennant un abonnement. Saas nous permet donc de de soutenir tous les aspects de l'application et offrir à l'utilisateur un accès facile sans les coûts en capital liés à l'achat et à la maintenance du matériel.

Ainsi, notre entreprise Saas utilise un modèle d'abonnement qui ne dépend pas de ventes ponctuelles mais d'un flux de revenus réguliers provenant des abonnés, donc le produit doit offrir une valeur suffisante pour que les clients continuent à payer année après année Il faudrait pour cela définir des indicateurs de performance spécifique au cas Saas.

5.3. Indicateurs de performance Saas :

Puisqu'un business model SaaS ne fonctionne pas de la même manière qu'un modèle basé sur des ventes ponctuelles et de production, il est nécessaire d'adapter les métriques au modèle économique. Nous avons sélectionné quatre indicateurs clés pour cela :

5.3.1. ARR et MRR :

ARR pour Annual Recurring Revenue et MRR Monthly Recurring Revenue, correspondent au chiffre d'affaires récurrent tiré des abonnements.

Le MRR est intéressant car il s'applique davantage aux nouvelles entreprises en démarrage et donne un aperçu de l'efficacité opérationnelle à court terme. En fournissant chaque mois ;

- Nouveaux abonnements
- Ajout des mises à jour, amélioration et expansion de contrats
- Déductions des passages d'abonnements à des versions inférieures
- Déduction des abonnements annulés

Tant dis que l'ARR est plus approfondi et donne une vue d'ensemble de l'entreprise, et évalue son succès à long terme. La formule de calcul de base est simple ;

$$\text{ARR} = 12 \times \text{MRR}$$

$$\text{MRR} = \text{ARPU} \times \text{Nombre d'abonnés}$$

L'ARPU (Average Revenue Per Unit) est le paiement que les abonnés effectuent chaque mois. Ces deux indicateurs seront utilisés en alternance selon les besoins : le MRR est pratique pour la planification à court terme et pour mesurer l'impact des changements récents, tandis que l'ARR permet de prévoir la croissance à long terme et d'estimer la taille que notre entreprise peut atteindre à l'avenir.

5.3.2. Churn :

Le Churn, ou le taux d'attrition est un indicateur clé, Il permet de mesurer les pertes de clients. Et, par conséquent les pertes de revenu. La formule pour effectuer le calcul du churn est la suivante :

(Nombre de clients qui se sont désabonnés sur une période donnée / Nombre total de clients au début de période) x 100.

Cette période sera déterminée par la suite. Cet indicateur est important puisqu'il permettra d'évaluer le niveau de satisfaction client.

5.3.3. Coût d'Acquisition Clients :

Le CAC correspond au coût que doit déboursier l'entreprise pour obtenir un nouveau client, dans notre cas ce sont les dépenses nécessaires pour décrocher un abonnement supplémentaire.

Son calcul est simple ; $\text{CAC} = (\text{A} + \text{B}) / (\text{C} + \text{D})$

A : dépenses du type marketing, quel que soit le canal, par exemple une campagne LinkedIn Ads ;

B : pourcentage des dépenses commerciales ou des autres coûts publicitaires généraux affectables à cette campagne (personnel, salons, missions ou réceptions, etc.);

C : Nombre de clients obtenus sur la période avec un abonnement annuel ;

D : Nombre d'abonnements mensuels souscrits sur la période de la campagne publicitaire

5.3.4. LTV ou Life Time Value:

Ce KPI correspond au revenu moyen qu'un client va apporter pendant toute sa présence. LTV est calculé par A/B

A : Revenu moyen par compte client ou ARPA (Average revenue Per Account)

B : Taux de churn ou taux de perte client

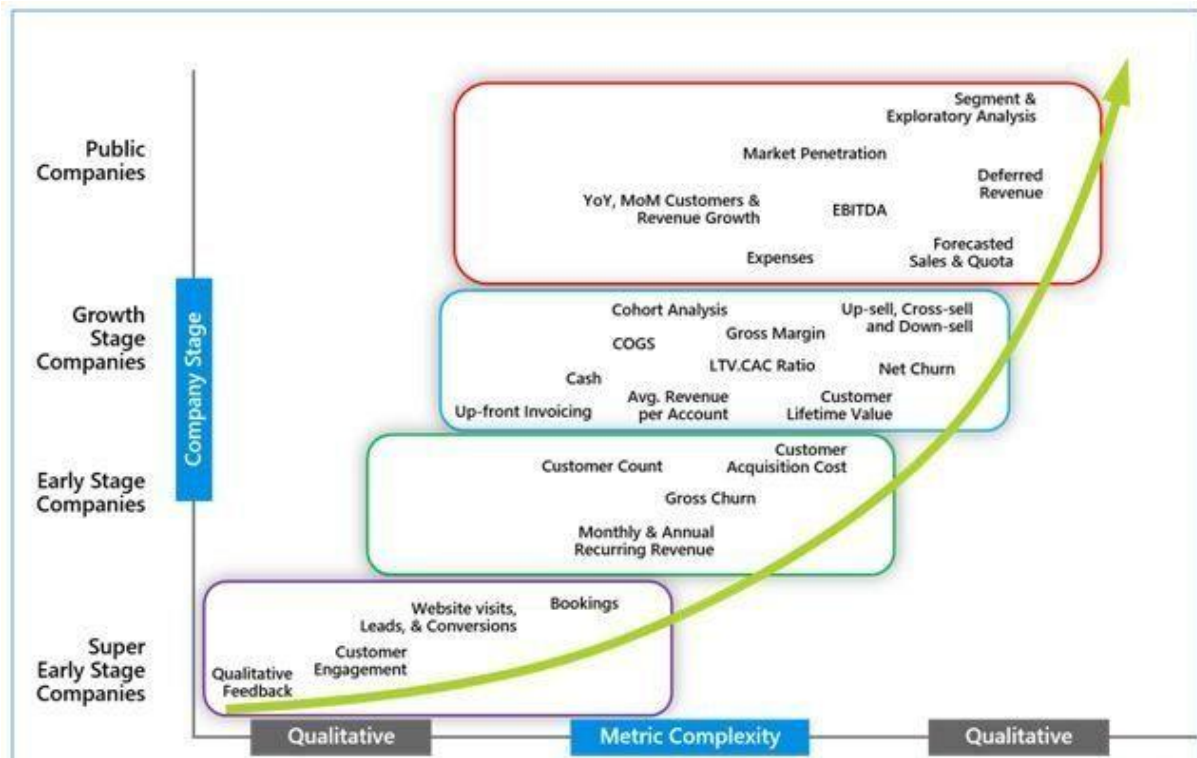


Figure 5. 1: Indicateurs de performance adaptés à chaque phase de la croissance d'une entreprise

5.4. Business Model Canvas :

Le Business Model Canvas est un outil visuel indispensable qui permet de visualiser son modèle économique en représentant de manière concise les principaux éléments d'une stratégie commerciale. Son importance réside aussi dans l'aide qu'il offre pour identifier les opportunités et les défis, et à faciliter la communication et la compréhension au sein de l'organisation et avec les parties prenantes externes. Le BMC est généralement construit à partir de 9 éléments de la stratégie commerciale, notre canvas défini pour notre Saas est représenté dans Annexe B.

Segments clients :

Les clients pour qui nous créons de la valeur se distinguent par leur besoin critique de solutions avancées pour la modélisation, la prévention et la gestion des risques d'incendie, ainsi nous proposons ;

- Industries de Défense et Armement : Entreprises et installations militaires qui nécessitent une maîtrise stricte de la technologie pour prévenir et gérer les incendies, notamment pour assurer la sécurité des opérations sensibles et des personnels.

-
- Installations Industrielles Critiques : Usines de production sensibles où la sécurité incendie est cruciale pour éviter les interruptions de production et les pertes matérielles importantes.
 - Bureaux d'Études et Consultance : Entreprises spécialisées dans l'ingénierie et la consultation qui fournissent des services de sécurité incendie et de prévention à divers clients, y compris ceux des secteurs sensibles comme l'armement.
 - Entrepôts et Installations Logistiques : Installations de stockage de haute sécurité où la gestion des risques d'incendie est essentielle pour protéger les stocks et minimiser les temps d'arrêt.
 - Institutions de Recherche et Laboratoires : Centres de recherche avancée et laboratoires où la sécurité des équipements et des recherches sensibles est primordiale, avec un besoin spécifique de modélisation prédictive des incendies.

L'offre/la proposition de valeur :

Notre solution offre :

- Une information claire et accessible, facile à comprendre pour tous les utilisateurs.
- Une interface intuitive avec des inputs prédéfinis pour une utilisation simplifiée.
- Des temps de réponse rapides pour obtenir rapidement les résultats nécessaires.

Ainsi que des outputs essentiels pour :

- Optimiser l'évacuation du personnel en fournissant des estimations réalistes du temps nécessaire.
- Faciliter la maîtrise de l'incendie en identifiant les moyens de lutte appropriés à chaque phase.
- Prédire le flashover pour anticiper et prévenir les événements critiques.

Cette proposition vise à répondre aux besoins critiques des utilisateurs en matière de sécurité incendie, en fournissant des outils précis et réactifs pour la gestion proactive des risques.

Les Canaux :

Les canaux de distribution prévus pour atteindre directement notre public cible sont :

- Participation à des salons spécialisés dans la sécurité et la prévention des incendies, où nous présenterons notre solution aux professionnels du secteur.
- Ventes directes aux industries sensibles, telles que les installations militaires, les usines de production critiques, et autres entités nécessitant une gestion avancée des risques d'incendie.

Relations clients :

Nous nous engageons à assurer la fidélité de nos clients en mettant régulièrement à jour notre application et en ajoutant de nouveaux paramètres avancés. Cette approche garantit que notre solution reste à la pointe des dernières avancées technologiques et répond efficacement aux besoins évolutifs de nos clients en matière de sécurité incendie.

Les revenus :

Nos revenus seront générés par un modèle de licence entreprise, proposé sous forme d'abonnement annuel récurrent (ARR pour Annual Recurring Revenue). Cette approche permet de garantir un flux de revenus stable et de maintenir un engagement continu avec nos clients.

Les ressources clés :

Moyens immatériels :

- Hébergement SaaS (Software as a Service)

Moyens humains :

- 1 développeur
- 1 spécialiste de la simulation incendies

Les activités clés :

- Gérer un site internet et un centre de logistique ;
- Recherche et développement des avancées récentes dans la simulation des incendies ;
- Amélioration en continue de la User Experience ;
- Ajout des paramètres avancés.

Partenaires clés :

- Institutions de recherche : Collaboration avec des universités ou des instituts de recherche pour bénéficier des dernières avancées en matière de modélisation d'incendie et de sécurité.
- Industries sensibles : Partenariats avec des industries sensibles comme l'armement pour intégrer le modèle dans leurs systèmes de gestion de risques incendie.
- Fournisseurs de données : Accès à des données actualisées sur les matériaux combustibles, les normes de sécurité et les régulations pour améliorer la précision du modèle.

Structures de coûts :

Répartis en coûts fixes indépendants du niveau des ventes nous avons : l'infrastructure informatique (hébergement du site), le salaire du personnel et l'assurance.

Pour les coûts variables qui sont eux fluctuant en fonction du niveau d'activité, il y a :

- Développement technologique
- Formation et support client

5.5. Conclusion :

Ce chapitre visait à explorer les perspectives de rentabilité offertes par un logiciel de gestion des risques d'incendie et sa simulation à l'aide d'un modèle à zones. Nous avons identifié un

potentiel marché dans divers secteurs, notamment les entreprises générales, les industries sensibles comme la défense, ainsi que pour la recherche.

Ensuite nous avons sélectionné quelques indicateurs de performance KPI que nous avons estimé adapté à notre modèle économique Saas. Ces KPI nous permettront de surveiller attentivement l'évolution de notre startup et la gestion des dépenses.

Conclusion générale

Ce travail visait à répondre à nos observations sur la gestion actuelle du risque incendie, qui, malgré l'augmentation significative des combustibles dans les infrastructures modernes, n'a pas suffisamment évolué pour garantir une sécurité optimale. La gestion traditionnelle du risque incendie repose principalement sur des normes qui ne sont pas toujours adaptées aux situations spécifiques des différentes installations. Cela rend primordial l'adoption d'une méthodologie scientifique et rigoureuse.

L'utilisation de modèles de simulation est une étape cruciale pour évaluer les solutions de conception et assurer une gestion efficace du risque incendie. Cependant, les industriels se trouvent souvent confrontés à la nécessité d'investir considérablement pour obtenir des résultats qui soient à la fois représentatifs de la réalité et pratiques.

Dans cette optique, nous avons développé un logiciel de gestion du risque incendie et de modélisation du feu basé sur un modèle à zones. Notre objectif était de proposer un outil offrant des résultats utiles et précis tout en étant simple d'utilisation. Pour atteindre cet objectif, nous avons simplifié l'interface utilisateur et intégré une base de données de combustibles. Nous avons combiné des corrélations empiriques avec des systèmes d'équations différentielles, en y ajoutant une interprétation intégrée des effets de l'incendie.

Les résultats obtenus montrent que notre logiciel peut fournir des estimations fiables de la production de chaleur, de la hauteur de flamme, et de l'occurrence de phénomènes critiques comme le flashover, ainsi que de la visibilité dans les conditions simulées. Cependant, il est important de noter que le modèle nécessite encore des améliorations significatives, notamment en termes de stabilité et de gestion du facteur temps.

Acquis

Ce projet nous a permis d'acquérir une vaste expertise dans plusieurs domaines clés. En matière d'ingénierie de sécurité incendie, nous avons approfondi nos connaissances sur les différentes méthodes et techniques utilisées pour la prévention et la protection contre les incendies. Nous avons également appris à utiliser et à développer des modèles de simulation complexes pour évaluer les risques et les mesures de lutte contre les incendies.

Le développement du logiciel a renforcé nos compétences en programmation et en développement web, et nous avons consolidé nos connaissances théoriques en thermodynamique, en transfert de chaleur et en chimie de la combustion, essentielles pour la modélisation des incendies.

Perspectives

L'évolution continue est essentielle pour rester pertinent et efficace. À cet égard, nous avons identifié plusieurs axes d'amélioration et de développement futur pour notre logiciel. Nous envisageons d'enrichir notre base de données en ajoutant de nouveaux combustibles et scénarios d'incendie pour augmenter la précision et l'utilité du modèle.

L'intégration de techniques de machine learning et de deep learning est également prévue pour améliorer la précision des simulations et des prédictions, et pour mieux représenter les réalités complexes des incendies. En outre, nous travaillerons sur l'optimisation et la stabilisation du système d'équations pour garantir des simulations plus robustes et fiables.

Développement d'un logiciel basé sur un modèle à champs (CFD) pour suivre le comportement des incendies au cours du temps afin d'étudier la performance des moyens de lutte contre l'incendie. Actuellement les bureaux d'études et les entreprises utilisent des solutions importées et qui coûtent excessivement cher.

Références bibliographiques

- [1] E. GUILLAUME, «Les outils de l'ingénierie de la sécurité incendie,» Laboratoire nationale de métrologie et d'essais, Paris, 2006.
- [2] E. Guillaume, «Ingénierie de la sécurité incendie,» *Techniques de l'ingénieur*, 2015.
- [3] Y. BILLAUD, «Modélisation hybride STOCHASTIQUE-DÉTERMINISTE des incendies de forêts,» 2011.
- [4] «Technical Reference Guide for the HAZARD I Fire Hazard Assessment method,» NIST, 1989.
- [5] «Section 3,» *BS EN 1991-1-2*, 2002.
- [6] «Annexe A,» *BS EN 1991-1-2*, 2002.
- [7] C. Barnett, «BFD curve: A new empirical model for fire compartment temperatures,» *Fire Safety Journal*, 2002.
- [8] S. Desanghere, «Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie,» INSA, 2006.
- [9] «Zone Computer Fire Models for Enclosures,» chez *SFPE*, p. 723.
- [10] K. McGrattan, «Fire Dynamics Simulator,» NIST, 2023.
- [11] R. D. Peacock, «Consolidated Fire and Smoke Transport,» NIST Technical Note, 2023.
- [12] V. Babrauskas, «Heat Release Rates,» chez *SFPE*.
- [13] C. Huggett, «Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements,» chez *Fire and Materials*, 1980, p. 61–65.
- [14] H. BITEAU, «Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition,» *Fire Safety Science*, January 2009.
- [15] A. Tewarson, «Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires,» chez *SFPE*, pp. 616-690.
- [16] J. Anthony D. Putorti, «Flammable and Combustible Liquid Spill/Burn Patterns,» NIJ Report 604–00, Washington, DC.
- [17] N. Dizet, «Modélisation du risque incendie dans des structures multi-compartmentées,» Aix-Marseille Université, 2021.

-
- [18] A.-F. Chiojdoiu, «The influence of ventilation conditions of heat release rate variation over time,» *Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, pp. 109-114, 2023.
- [19] F. Numajiri, «Mathematical expression of Heat Release Rate Curve and proposal of 'Burning Index',» *Fire and Materials*, p. 39–42, 1998.
- [20] A. TEWARSON, «The influence of Oxygen concentration on fuel parameters for fire modeling,» chez *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, 1981.
- [21] V. Babrauskas, «Estimating room flashover potential,» *Fire Technology 16*, pp. 94-103, 1980.
- [22] P. Thomas, «Testing Products and Materials for their Contribution to Flashover in Rooms,» *Fire and Materials 5*, p. 103, 1981.
- [23] B. J. McCaffrey, «Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations,» *Fire Technology*, pp. 98-119, 1981.
- [24] C. Jie, «Influence of Ventilation Status on Combustion Characteristics of Coach Fire,» Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Changsha, 2013.
- [25] B. McCaffrey, «Momentum Implications for Buoyant Diffusion Flames,» *COMBUSTION AND FLAME*, pp. 149-167, 1983.
- [26] G. HESKESTAD, «Virtual Origins of Fire Plumes,» *Fire Safety Journal*, pp. 109 - 114, 1983.
- [27] U. E. Temelli, «A multidisciplinary analysis of the fire propagation in the aspiration system of a building,» *Case Studies in Construction Materials*, Istanbul, 2023.
- [28] R. ALPERT, «Ceiling Jet Flows,» chez *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2008.
- [29] c. l. Beyler, «Radiation from Large Pool Fires,» *Journal of Fire Protection Engineering*, pp. 141-149, 1989.
- [30] d. Bagster, «Thermal hazards in the Process Industry,» *Chemical Engineering Progress*, pp. 69-75, 1989.
- [31] G. Mulholland, «Smoke Production and Properties,» chez *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2008, pp. 258-269.
- [32] T. Jin, «Irritating Effects of Fire Smoke on Visibility,» *Fire Science and Technology*, pp. 79-90, 1985.
- [33] «APSAD R5, Robinets d'incendie armés,» 2002. [En ligne]. Available: <http://iqxxs.free.fr/SSIAP/SSIAP3/R%20apsad/R5.pdf>. [Accès le 28 06 2024].

-
- [34] D. Rasbash, «Review of Explosion and Fire Hazard of Liquefied Petroleum Gas,» *Fire Safety Journal*, pp. 223 - 236, 1980.
- [35] P. Basu, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, 2006.
- [36] J. Stéphanie, «Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-76),» 14 / 03 / 2014.
- [37] R. HANSEN, «VARYING HEAT RELEASE RATES PER UNIT AREA – THE IMPACT IN UNDERGROUND MINES,» *Mining Revue*, pp. 1-28, 2023.
- [38] Z. Fu, «A Two-zone fire growth and smoke movement model for multicompartment buildings,» Conseil National de Recherches Canada, 2000.
- [39]
- [40] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, 1985, 1985.
- [41] E. Guillaume, «Ingénierie de la sécurité incendie.Méthodologie,» *Techniques de l'ingénieur*, 2015.
- [42] N. Yakhou, «Etude d'ingénierie de sécurité incendie au sein de l'usine pharmaceutique EL KENDI,» Ecole Nationale Polytechnique, Département QHSE-GRI, El Harrach, 2020.

Liste des annexes

Annexe A : Aperçu de la Base de Données combustibles du modèle

Annexe B : Business Model Canvas de la startup Saas

Annexe C : interface utilisateur du logiciel

Annexe A : Aperçu de la Base de Données combustibles du modèle

Parcourir Structure SQL Rechercher Insérer Exporter Importer Privilèges Opérations Déclencheurs																	
		ID	Name	Xc	Yh	Zo	M	mass_flow	Dheff	Kb	Xr	Yco	Ysoot	Extinguisher1	Extinguisher 2	Extinguisher 3	
Éditer	Copier	Supprimer	0	LPG	3	8	0	44	0.099	43.7	1.4	0.27	0.005	0.024	Dry powder extinguisher		
Éditer	Copier	Supprimer	1	Methanol	1	4	1	32	0.017	20	0	0.15	0.001	0.001	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	2	Ethanol	2	6	1	46	0.015	26.8	0	0.235	0.001	0.008	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	3	Butane	4	10	0	58	0.078	42.6	2.7	0.29	0.007	0.029	Dry powder extinguisher		
Éditer	Copier	Supprimer	4	Heptane	7	16	0	100	0.101	44.6	1.1	0.34	0.007	0.029	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	5	Kerosene	7	16	0	170	0.039	40.3	3.5	0.32	0.012	0.042	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	6	Benzene	6	6	0	78	0.085	40.1	2.7	0.41	0.067	0.181	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	7	PolyPropylene PP	3	6	0	42	0.018	38.6	0	0	0.024	0.059	Water extinguisher	Dry powder extinguisher	
Éditer	Copier	Supprimer	8	Acetone	3	6	1	58	0.041	25.8	1.9	0.26	0.003	0.014	CO2 extinguisher	Foam extinguisher	Dry powder extinguisher
Éditer	Copier	Supprimer	9	PMMA	5	8	2	100.115	0.02	24.2	3.3	0.3	0.01	0.022	Water extinguisher	Dry powder extinguisher	

Annexe B : Business Model Canvas de la startup Saas

<h2>Le Business Model Canvas</h2>		Designed for: Fire Mitigation Software	Designed by: Rania DJELAL	Le 09/07/2024
Partenaires clés Qui sont nos partenaires clés ? Qui sont nos principaux fournisseurs ? Quelles ressources clés acquérons-nous auprès de nos partenaires ? Quelles activités clés nos partenaires réalisent-ils ? Institutions de recherche : Collaboration avec des universités ou des instituts de recherche pour bénéficier des dernières avancées en matière de modélisation d'incendie et de sécurité. Industries sensibles : Partenariats avec des industries sensibles comme l'armement pour intégrer le modèle dans leurs systèmes de gestion de risques incendie. Fournisseurs de données : Accès à des données actualisées sur les matériaux combustibles, les normes de sécurité et les réglementations pour améliorer la précision du modèle.	Les activités clés Quelles activités clés nos propositions de valeur nécessitent-elles ? Nos canaux de distribution ? Les relations avec les clients ? Les sources de revenus ? - Gérer un site internet et un centre de logistique. - Recherche et développement des avancées récentes dans la simulation des incendies - Amélioration en continue de la User Experience - Ajust des paramètres avancés	La proposition de valeur Quelle valeur apportons-nous au client ? Lequel des problèmes de notre client aidons-nous à résoudre ? Quels ensembles de produits et services offrons-nous à chaque segment de clientèle ? Quels besoins de nos clients satisfaisons-nous ? Une information facile à comprendre; Une interface facile à utiliser, des inputs prédéfinis et un temps de réponse court, les outputs forment des valeurs clés pour l'évacuation du personnel, la maîtrise de l'incendie par les moyens de lutte et la prédiction du flash over.	Relations clients Quel type de relation chaque segment de clientèle attend-il que nous établissions et maintenons avec lui ? Lesquelles avons-nous établies ? Comment sont-elles intégrées au reste de notre modèle d'affaires ? Quel est leur coût ? Assurer la fidélité des clients par la mise à jour de l'application et l'ajout des paramètres avancés. Les Canaux Par quels canaux nos segments de clientèle souhaitent-ils être atteints ? Comment les atteignons-nous actuellement ? Comment nos canaux sont-ils intégrés ? Lesquels fonctionnent le mieux ? Lesquels sont les plus rentables ? Comment les intégrons-nous aux routines des clients ? Les moyens de communication et de distribution envisagés sont : <ul style="list-style-type: none"> - les salons sur la sécurité et l'incendie, - Ventes directes aux industries sensibles 	Segment Clients Pour qui créons-nous de la valeur ? Qui sont nos clients les plus importants ? -Tout organisme disposant d'un entrepôt ou d'office building se préoccupant de la sécurité de ses biens et de son personnel, bureaux d'études -Industries sensibles, comme l'armement
	Les ressources clés Quelles ressources clés nos propositions de valeur nécessitent-elles ? Nos canaux de distribution ? Les relations avec les clients ? Les sources de revenus ? Moyens immatériels : - hébergement SaaS Moyens Humains : - 1 développeur, 1 spécialiste des feux			
Structures de coûts Quels sont les coûts les plus importants inhérents à notre modèle d'affaires ? Quelles ressources clés sont les plus coûteuses ? Quelles activités clés sont les plus coûteuses ? Coûts variables : - Développement technologique - Formation et support Coûts fixes : - Infrastructure informatique (hébergement du site)		Les revenus Pour quelle valeur nos clients sont-ils vraiment prêts à payer ? Pourquoi paient-ils actuellement ? Comment paient-ils actuellement ? Comment préféreraient-ils payer ? Quelle contribution chaque source de revenus apporte-t-elle aux revenus globaux ? Licence entreprise par abonnement annuel récurrent		

Annexe C: interface utilisateur du logiciel

