République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

Université "Yahia FARES" de Médéa.

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière Génie Mécanique

Projet de fin d'études

En vue l'obtention d'un diplôme de Master en Energétique

Thème

Etude Numérique de la propagation d'un feu itinérant dans une structure à compartiments

Réaliser par :

⇨ *Ms. Boukhalfa Younes*

⇨ *Ms. Badani Mohammed*

Dirigé par :

⇨ *Pr. Alliche Mounir*

⇨ *Pr. BENAROUS Abdellah*

Promotion 2024/2025

Remerciements

*On tient tout d'abord à remercier « **Allah** » le tout puissant.*
*Les plus sincères remerciements vont également à nos encadrants Professeur **Alliche Mounir** de l'Université Yahia Fares de MEDEA, et Professeur **BENAROUS Abdellah de l'Université de Blida1** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et pour la qualité de leur encadrements et leurs encouragements qui ont été indispensables pour garder le moral dans les moments les plus compliqués, pour toutes leur orientations et conseils mais aussi et surtout pour leur qualités humaines et scientifiques toujours en toute modestie, sa passion du métier et la confiance qu'il a bien voulu m'accorder tout au long de ce travail. Pour leur brillantes intuitions et pour l'optimisme qu'il a su me transmettre.*
On souhaite également remercier les membres du jury, Pr TRIKI Zakaria et Dr REBHI Redha qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à notre mémoire.
Merci à nos collègues et amis avec lesquels on a beaucoup partagé, en particulier.
Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont encadrés tout au long des cinq années, pour les conseils qu'ils nous ont prodigués aussi bien dans la vie académique que personnelle. Del 'Université Yahia Fares de MEDEA
Un grand merci à toute la famille, et surtout à nos parents, nos frères et à nos sœurs, merci pour votre soutien inconditionnel.

Dédicaces

On dédie ce modeste travail

A mes très ***chers parents***

A' mes frères Mohammed et Ismaïl à ma seul sœur Et à leurs enfants et toute la famille.

A' mes amis et mes collègues qui cannaient

A' toute les fanatics

A' ceux qui ont fait de leur mieux pour notre

Soutenir Durent ce travail
A' amis de la section de

Énergétique.

Younes

Dédicaces

On dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

A' mes frères et à nos sœurs et toute la famille.

A' mes amis et mes collègues qui cannaient

A' ceux qui ont fait de leur mieux pour notre

Soutenir Durent ce travail
A' amis de la section de

Énergétique.

MOUHAMED

RESUME :

Actuellement, nous observant que la majorité des incendies survenant à travers le monde sont d'une ampleur considérable et d'une extrême gravité, causant d'importantes pertes humaines pouvant atteindre des milliers de victimes. D'un point de vue matériel, les dégâts sont également colossaux. À titre d'exemple, l'incendie survenu en Californie (États-Unis) en 2020 s'est propagé sur des centaines de kilomètres. Face à de tels phénomènes, un nouveau concept a vu le jour : celui du feu itinérant. Dans le cadre de la lutte contre ce type de feux, une approche innovante a également été développée : la méthodologie améliorée des feux itinérants (iTFM).

Cette méthodologie vise à mieux prendre en compte la nature mobile des incendies dans les grands compartiments, à analyser l'effet de la géométrie des lieux et l'interaction avec les charges de combustible, afin d'identifier les conditions favorisant le développement d'un feu itinérant. L'étude inclut également l'influence marquée du plafond sur le comportement du feu.

Dans le cadre d'un projet consacré à la lutte contre ces incendies, cette thèse a été élaborée selon les principes de l'iTFM. Nous y avons étudié l'impact de la densité du combustible, du taux de dégagement de chaleur, ainsi que des caractéristiques de la pièce sur le développement du feu en général, et sur les variations de température dans le champ proche en particulier. Un concept fondamental, celui du battement de flamme, a été introduit pour expliquer ces variations. iTFM permet notamment de localiser le pic de température le long du trajet du feu. Il s'est avéré que ce point dépend principalement du taux de dégagement de chaleur et du taux de propagation du feu, ce dernier qui influencent directement la longueur et la taille du feu. Cette étude offre ainsi un éclairage précieux sur la dynamique des feux itinérants, soulignant l'importance cruciale de leur prise en compte dans la conception des bâtiments, afin de garantir des structures sûres et résistantes au feu.

Mots clés : feu itinérant, iTFM, taux de dégagement de chaleur, propagation du feu

ملخص :

في لوقت الراهن، تشهد العديد من مناطق العالم حرائق هائلة تتسم بطابعها الكارثي، مخلفة خسائر بشرية فادحة قد تصل إلى آلاف الوفيات، فضلًا عن أضرار مادية جسيمة لا تُحصى. ومن أبرز الأمثلة على ذلك، حريق كاليفورنيا الذي اجتاح مناطق شاسعة في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2020، ممتدًا على مسافات تجاوزت مئات الكيلومترات. وقد أدت هذه الكوارث إلى بروز مفاهيم جديدة في مجال دراسة الحرائق، لعل أبرزها مفهوم "النار المتنقلة"، الذي يعكس الطبيعة الديناميكية للحريق داخل الفضاءات الكبيرة. وفي إطار الجهود الرامية إلى التصدي لهذا النوع المعقد من الحرائق، تم تطوير منهجية علمية متقدمة تُعرف باسم "المنهجية المحسّنة للحرائق المتنقلة .(iTFM) "وقد جاءت هذه الأطروحة كجزء من مشروع بحثي طموح يهدف إلى دراسة الخصائص المميزة لهذه الحرائق، من خلال تحليل تأثير هندسة الغرف، وتفاعلها مع أحمال الوقود، وفهم الظروف التي تؤدي إلى نشوء وتطور حريق متنقل.

تتضمن الدراسة أيضًا فحص التأثير المهم لسقف الغرفة على سلوك الحريق، إلى جانب تقييم دور الكثافة الوقودية، ومعدل إطلاق الحرارة، وخصائص الغرفة في تشكيل الظواهر الحرارية، لا سيما في المجال القريب من اللهب. ولتفسير التقلبات الحرارية الملحوظة، تم تقديم مفهوم "خفقان اللهب" كعنصر جديد لفهم هذا السلوك. وتُستخدم هذه المنهجية لاحقًا لتحديد موقع الذروة الحرارية على طول مسار الحريق، وهو موقع تبين أنه يرتبط بشكل وثيق بمعدل إطلاق الحرارة وسرعة انتشار اللهب، مما يؤثر مباشرة على حجم الحريق وطوله .توفر هذه الدراسة رؤى عميقة حول طبيعة الحرائق المتنقلة، وتؤكد على الأهمية البالغة لأخذها بعين الاعتبار عند تصميم المباني، بما يضمن تحقيق معايير السلامة والمقاومة في مواجهة مثل هذه الظواهر المتقدمة والمعقدة.

الكلمات المفتاحية: النار المتنقلة، منهجية الحرائق المتنقلة، المجال القريب، معدل انتشار الحريق، معدل انبعاث الحرارة

ABSTRACT:

Currently, we observe that the majority of fires occurring around the world are of considerable magnitude and extreme severity, causing significant human losses that can reach thousands of victims. From a material standpoint, the damage is equally colossal. For example, the wildfire that occurred in California (USA) in 2020 spread over hundreds of kilometers. In response to such phenomena, a new concept has emerged: that of travelling fires. As part of efforts to combat this type of fire, an innovative approach has also been developed: the Improved Travelling Fire Methodology (iTFM). This methodology aims to better account for the mobile nature of fires in large compartments, to analyze the effect of compartment geometry and its interaction with fuel loads, in order to identify the conditions that favor the development of a travelling fire. The study also includes the significant influence of the ceiling on fire behavior.

As part of a project dedicated to combating such fires, this thesis was developed based on the principles of the iTFM. We studied the impact of fuel density, heat release rate, as well as compartment characteristics on fire development in general, and on near-field temperature variations in particular. A fundamental concept, flame beating, was introduced to explain these variations. The iTFM notably allows for the identification of the peak temperature location along the fire path. It was found that this point mainly depends on the heat release rate and the fire spread rate, both of which directly influence the length and size of the fire. This study thus provides valuable insights into the dynamics of travelling fires, highlighting the crucial importance of considering them in building design to ensure safe and fire-resistant structures.

Keywords: iTFM, length and size of the fire, flame beating, travelling fires, peak temperature

Table des matières

Remerciements **i2**
Dédicaces **i3**
RESUME : **i5**
LISTE DES FIGURES **i10**
Nomenclature et liste des symboles **i12**
LISTE DES TABLEAUX **i13**
INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**
Chapitre I : Revue de Littérature **1**
I.1 Fondamentaux sur les feux : **4**
I.1.1- Introduction : 4
I.1.2 Définition de combustion : 4
I.1.3 Propagation du feu : 5
I.1.4 Catégories des flammes : 5
I.1.4.1-Flammes de pré-mélange : 5
I.1.4.2-Flammes de diffusion : 6
I.2 Présentation de l'objectif de l'étude : **7**
I.3 ETAT DE L'ART : **8**
Chapitre II : Formulation Mathématique **13**
II.1. Introduction : **14**
II.2. Caractéristiques de la flamme : **14**
II.2.1. Panaches de feu et hauteurs de flammes : 14
II.2.1.1. Flamme de diffusion : 14
II.2.1.2. Flammes dominées par la flottabilité ou par l'impulsion : 14
II.2.1.3. Turbulence : 14
II.2.1.4.la hauteur moyenne de la flamme : 15
II.2.1.5. Nombre de Froude : 15
II.2.1.6. Le taux de dégagement de chaleur : 16
II.2.2. Panache axisymétrique flottant : 17
II.2.3 Plume idéale : 18
II.2.3.1. Équations constitutives : 19
II.2.3.2. Équation de continuité pour la masse : 19
II.2.3.3. Équation de la quantité de mouvement et de la flottabilité : 20
II.2.3.4. Expressions analytiques résultantes : 21
II.2.4. Le panache d'Heskestad : 21
II.2.4.1. Origine virtuelle : 22
II.2.4.2. Hauteur moyenne de la flamme : 22
II.2.4.3. Taux de restitution d'énergie : 22
II.2.4.4. Rayon du panache : 22
II.2.4.5. Température de la ligne centrale du panache : 23

II.2.4.6 Vitesse de l'axe central du panache : 23
Ⅱ.2.4.7. Débit massique du panache : 23
II.2.5. Jets de plafond et flammes de plafond : 23
II.2.5.1Corrélation d'ALPERT : 24
II.2.5.2. Autres corrélations - Jets de plafond : 25
II.3. Description du Modèle Numérique (formulation Mathématique utilisé dans nous système) : **25**
II.3.1. Plage valide de tailles d'incendie : 25
II.3.2. Champe lointain : 26
II.3.3. Champe proche - battement de flamme : 28
Chapitre III : Présentation de Code MATLAB **13**
III.1 Introduction : **32**
III.2 Explication détaillée de code : **32**
III.2.1 Paramètres d'entrée : 32
III.2.2 Calculs préliminaires : 32
III.2.3 Calcul du champ de déviation : 33
III.2.4 Boucles de simulation : 33
III.2.5 Affichage des résultats : 33
III.3. Organigramme de programmer Matlab: **34**
III.4 Conclusion : **37**
Chapitre IV Résultats et Analyse **30**
IV.1 Introduction : **39**
IV.2 Modélisation de phénomène : **39**
IV.3 Résultats et Analyse : **39**
IV.3.1 L'effet de Taux de dégagement de chaleur par unité de surface (kW/m2) $\dot{Q}$ **:** 39
IV.3.2 L'effet de la densité de charge de combustible QF : 44
IV.3.3 L'effet de la température de room T_{ROOM}**(°C) :** 47
IV.3.4 L'effet de la hauteur de la chambre : 50
IV.4 Plage valide de tailles d'incendie : **53**
IV.5 Angle de battement : **57**
Conclusion : **59**
RÉFÉRENCES **57**
ANNEXE ..... Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES

N°	Titre de figure	Page
Fig (1.1)	Triangle de feu	5
Fig (1.2)	Structure d'une flamme de pré-mélange	6
Fig (1.3)	Structure de flamme de diffusion	7
Fig (1.4)	Illustration d'un feu itinèrent et de la distribution des températures des gaz	9
Fig (2.1)	L'état turbulence de feu	15
Fig (2.2)	Représentation schématique de la hauteur de flamme et de sa distribution thermique la longe de la base	15
Fig (2.3)	Représentation des trois régimes du panache thermique	17
Fig (2.4)	La variation de vitesse et la température de panache	18
Fig (2.5)	Plume idéale	18
Fig (2.6)	Panache en forme de cône au-dessus de la source	22
Fig (2.7)	Développement d'une couche d'aire coud sous le plafond	23
Fig (2.8)	Représentation de la langueur de battement (f)ou plafond et l'angle θ	28
Fig (4.1)	Élévation et plan d'étage de bâtiment utilisé pour l'étude de cas	39
Fig (4.2)	Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =300(kW/m2)).	40
Fig (4.3)	Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =300(kW/m2)).	41
Fig (4.4)	Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =500 (kW/m2)).	41
Fig (4.5)	Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =500 (kW/m2)).	42
Fig (4.6)	Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =700 (kW/m2)).	42
Fig (4.7)	Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =700 (kW/m2)).	43
Fig (4.8)	Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants pour une valeur de densité de charge de combustible (QF =420000 (kJ/m2))	44
Fig (4.9)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à une valeur de densité de charge de combustible. (QF =420000 (kJ/m2))	45
Fig (4.10)	Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants pour une valeur de densité de charge de combustible (QF =720000 (kJ/m2))	45

Fig (4.11)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à une valeur de densité de charge de combustible (QF =720000 (kJ/m2))	46
Fig (4.12)	Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=10 (°C).	47
Fig (4.13)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=10 (°C).	48
Fig (4.14)	Variation de température du gaz température en fonction de la position à différents instants à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=40 (°C).	48
Fig (4.15)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=40 (°C).	49
Fig (4.16)	Variation de température du gaz en fonction de la position à différents instants pour un hauteur (H=7 m)	50
Fig (4.17)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions pour un hauteur (H=7 m)	51
Fig (4.18)	Variation de température du gaz en fonction de la position à différents instants une hauteur(H=10m)	51
Fig (4.19)	Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions pour un hauteur(H=10m)	52
Fig (4.20)	L'évolution de la longueur minimale et maximale du feu en fonction de Taux de dégagement de chaleur par unité de surface ($\dot{Q}$).	54
Fig (4.21)	: La relation entre la densité de combustible (QF) et la longueur maximale atteinte	55
Fig (4.22)	La relation entre la densité de combustible (QF) et le temps de combustion local TB.	55
Fig (4.23)	Langueur maximale de feu pour différents taux de dégagement de chaleur et densités de charge de combustible.	56
Fig (4.24)	La variation de la longueur maximale de feu pour différents taux de dégagement de chaleur et densités de charge de combustible	56
Fig (4.25)	Variation de la température réduite du champ proche avec l'angle de battement et la taille du feu.	58

Nomenclature et liste des symboles

Variable	Designation	Unite
Fr	Nombre de Froude	[S^{-1}]
u	Vitesse d'écoulement	[m/S]
$\dot{Q}$"	Le taux de dégagement de chaleur par unité de surface	[Kw/m^2]
$\dot{m}$	Débit massique	[Kg/S]
ΔH_c	L'augmentation de temperature	[C°]
α	Le coefficient d'entrainement	[-]
dF	Force de flottabilité	[N]
$\dot{m}_p u$	Taux de dynamique temporelle	[N]
l	Hauteur moyenne de flamme	[m]
b	Le rayon de panache	[m]
$\dot{m}p$	Débit massique de panache	[Kg/S]
$T_{\max}$	Température maximale du gaz	[C°]
T_∞	Température ambiant ($T_{chambre}$)	[C°]_
r	Distance radiale sous le plafond	[m]
r_0	Pointe d'intersection de T max (équation d'ALPERT) avec TNF	[m]
r_2	Distance du centre de feu au bord de la zone de battement	[m]
TB	Le temps de combustion local	[S]
QF	Densité de charge de combustible	[Kj /m^2]
Q	Taux de dégagement de chaleur totale	[KW]
$L_{f,\max}$	Possible de l'incendie en termes de longueur le long du trajet de feu	[m]
$L_{f,\min}$	Taille minimale du feu en termes de langueur le long du trajet de feu	[m]
$S_{\min/\max}$	Vitesse maximale ou minimale de propagation de feu	[m/s]
H	Hauteur de plafond	[m]
W	Largeur de la chambre	[m]
L	Longueur, de compartiment	[m]
LF	Longueur, de feu	[m]
$FSIZE$	la taille variable et sans dimension du feu qui dépend de l'emplacement du bord d'attaque du feu	[-]
T_{TOTAL}	Durée totale d'incendie	[S]

$\dot{x}$	Localisation du bord d'attaque de l'incendie par apport l'extrémité du compartiment ou l'incendie a débuté	[m]
$T_{NIER-FILD}$	Température de champ proche	[C°]
T_{FF}	Température de champ lointain	[C°]
t	Le temps	[s]
Lt	Taille variable d'un incendie sans dimension qui dépend de l'emplacement du bord d'attaque	[m]
θ	Angle de battement	[°]
f	Longueur de battement	[m]
g	La gravité	[m/s^2]
x	Localisation d'intérêt dans le compartiment	[m]
x^*	Emplacement sans dimension dans le compartiment le long du trajet du feu	
ρ	Densité volumique	[kg/m^3]
T_f	Champ proche réduite en raison du battement	[C°]
D	Diamètre de la source d'écoulement	[m]

LISTE DES TABLEAUX

N^{O}	TITRE DU TABLEAU	PAGE
1.1	Taux de propagation du feu réaliseé, basé sur les donn.es issues d'expériences et d'incendies réels	11
2.1	Autres corrélations -Jet de plafonds	25
4.1	Influence du taux de dégagement de chaleur par unit. De surface sur les paramètres thermique et dynamiques de l'incendie	40
4.2	Paramètres de transfert thermique et de flux pour différentes charges de combustible	44
4.3	Influence de la température ambiante sur les paramètres de combustion et la température de la champ proche	47
4.4	Influence de la hauteur de la chambre sur les paramètres de combustion et la température de la champ proche	50
4.5	Récapitulatif des langueurs de feu selon le taux de dégagement de chaleur	53
4.6	Récapitulatif des langueurs de feu selon la densité de combustible	54

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'incendie est un risque majeur du fait de son effet destructeur sur l'activité économique et humaine. L'obligation de réduire la probabilité d'occurrence d'un incendie et d'en limiter son impact sur l'environnement, conduit au développement d'activités spécifiques. Celles-ci concernent la production de biens pour la surveillance (détecteurs), l'intervention (systèmes d'aspersion) ainsi que la réalisation d'études pour le dimensionnement d'équipements et l'analyse des risques.

Les études récentes et actuelles se sont principalement intéressées aux incendies de grande ampleur, qui se caractérisent par une propagation progressive d'une zone à une autre à l'intérieur d'un même compartiment, voire d'un bâtiment à un autre. Ces incendies se propagent de manière aléatoire sur toute la surface, et ce phénomène est désigné par le terme "incendie itinérant" (*travelling fire*). Ce type d'incendie est considéré comme plus réaliste, notamment dans les grands espaces et les surfaces ouvertes, comme les centres commerciaux ou les gratte-ciels. Étant donné que le contrôle d'un incendie itinérant est plus complexe que celui d'un incendie localisé ou fixe, nous avons choisi d'orienter notre étude vers ce phénomène. En effet, son analyse est essentielle pour améliorer les normes de conception des bâtiments et garantir la sécurité des structures.

Dans le cadre de la lutte contre ce type d'incendies, une méthodologie appelée "méthodologie de feu itinérant" **TFM** a été développée pour mieux représenter le comportement du feu dans de grands compartiments. Parmi ses déclinaisons figurent les modèles **ETFM** et **iTFM**. Dans notre travail, nous avons adopté le modèle amélioré iTFM, car il offre une représentation plus précise de la dynamique du feu itinérant par rapport aux approches précédentes. Il permet notamment de simuler une distribution non uniforme de la chaleur à l'intérieur du compartiment, tout en prenant en compte plusieurs paramètres variables, tels que la vitesse de propagation des flammes, le taux de dégagement de chaleur, ainsi que les emplacements des pics thermiques. De plus, iTFM intègre le battement de flamme, ce qui permet une meilleure estimation des températures dans les zones proches du foyer de l'incendie.

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres de la façon suivante :

Le premier chapitre présente une présentation claire de l'objectif de l'étude, soulignant l'importance de la compréhension de la dynamique du feu en fonction de la géométrie du compartiment, avec des généralités sur les incendies et aussi une synthèse bibliographique et une revue sur les travaux effectués auparavant par plusieurs auteurs à l'égard du problème.

Dans le second chapitre, nous discuterons la formulation mathématique, et on mise en équations du problème d'un feu itinérant (équations de conservation et Équation de continuité avec certain Corrélation.

Le troisième chapitre présente une explication détaillée du code Matlab a été écrit pour le calcul des températures des gaz de combustion des feux itinérants selon la méthodologie améliorée des feux itinérants (iTFM), (Détails de l'implémentation MATLAB : Paramètres d'entrée, Boucles temporelles et spatiales, Conditions limites).

La dernière partie, intitulée « RÉSULTATS ET DISCUSSION », dans laquelle nous avons présenté les résultats des simulations pour chaque scénario, avec des visualisations graphiques et des tableaux de données clés. Aussi une Évaluation quantitative de l'impact de la géométrie du compartiment sur la propagation et l'intensité du feu. En outre une discussion approfondie sur les conditions spécifiques menant au développement de feux itinérants et leur influence sur les structures métalliques

Enfin, une conclusion générale comprend les points suivants :

- Résumé des principales conclusions de l'étude, soulignant les contributions majeures à l'ingénierie de la sécurité incendie.
- Recommandations pour l'application pratique des découvertes dans la conception architecturale et la planification urbaine.

Chapitre I : Revue de Littérature

I.1 Fondamentaux sur les feux :

I.1.1- Introduction :

La combustion est un phénomène extrêmement répandu dans la nature, et c'est grâce à elle, en majeure partie, que l'activité humaine a pu se développer et se développe encore, quelquefois trop. Dans l'antiquité et jusqu'au moyen âge, le feu était même considéré comme l'un des quatre éléments de base dont l'univers entier était constitué. C'est dire que l'étude et la compréhension de ce qui concerne la combustion et le feu a un intérêt tout à fait important.[2]

I.1.2 Définition de combustion :

La combustion est un phénomène physico-chimique basé sur trois facteurs, le combustible, le comburant et énergie d'activation. [3] Ils peuvent être définis comme suit :

- Combustible : toute matière qui dégage de la chaleur lorsqu'elle brûle (papier, bois, liquide, gaz…)
- Comburant : encore appelé oxydant, généralement l'oxygène, comme la substance chimique qui, associée au combustible, permet sa combustion dans certaines conditions.
- L'énergie d'activation : Pour que la réaction ait lieu, il faut qu'une certaine quantité d'énergie (allumette, court-circuit, flamme…).

Ce principe est représenté par le triangle du feu comme indique la Fig. (1.1)

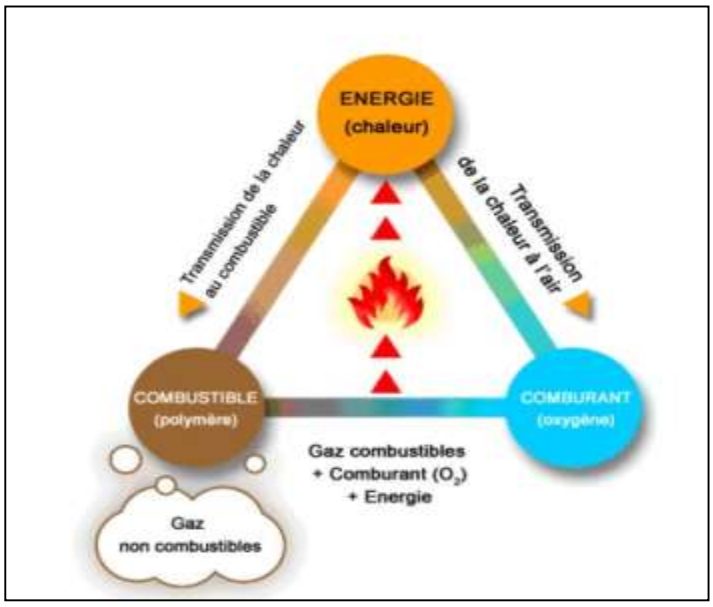


Figure 1.1 : Triangle du feu

I.1.3 Propagation du feu :

Comme indiqué précédemment, le feu génère de la chaleur par conséquent, l'énergie se propage ('Heat Release Rate 'caractéristique de feu.) Sous la méthode fournie par : conduction, Convection, Rayonnement, et par les petites flammes qui brûlent du foyer. Conduction et la Convection, connue sous le nom de transfert de chaleur solides et par les fluides en mouvement, respectivement. Alors que le rayonnement se produit lorsqu'il dépasse 400 °C par L'émission d'ondes électromagnétiques [3].

I.1.4 Catégories des flammes :

La lumière émise lors d'un incendie est le résultat d'une réaction de combustion exothermique, communément appelée **flamme**. Celle-ci se divise en deux types, dont nous citons :

I.1.4.1-Flammes de pré-mélange :

On peut dire qu'il s'agit d'une flamme prémélange lorsque le combustible et le comburant sont mélangés avant l'allumage. C'est-à-dire que le combustible est à l'état gazeux. En réalité, tout combustible gazeux prémélange possède une température

spécifique à laquelle ce mélange peut s'enflammer et permettre la propagation de la flamme. [4,27]

La structure de la flamme de pré-mélange est constituée de trois zones principales illustrées par la **figure 1.2**:

- Une zone de préchauffage dans laquelle les gaz frais (imbrûlés) sont chauffés à la température d'allumage, d'épaisseur δl avoisinant les 3 mm.
- Une zone de réaction, épaisseur δr d'environ 1 mm, où se déroule l'essentiel de la combustion. C'est la partie visible de la flamme.
- Une zone de post flamme, caractérisée par de hautes températures et la recombinaison des radicaux.

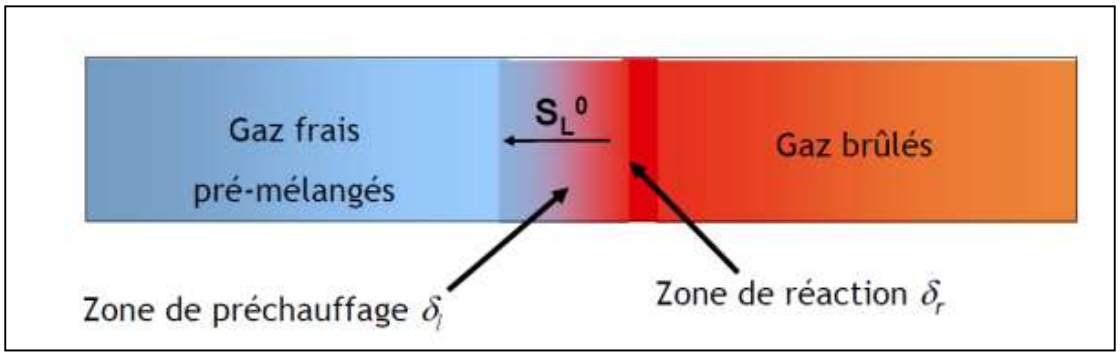


Figure 1.2 : Structure d'une flamme de pré-mélange

I.1.4.2-Flammes de diffusion :

Contrairement à la flamme de prémélange, dans la flamme de diffusion, le combustible et le comburant sont initialement séparés. La combustion se produit dans la zone de réaction, c'est-à-dire dans la région où le combustible rencontre le comburant. Ce type de flamme provient le plus souvent d'un combustible liquide (comme l'essence) ou solide (comme le bois). C'est pourquoi les combustibles gazeux sont délibérément exclus de ce passage. Que ce soit donc pour un feu de solide, de liquide ou de gaz,[4] on observe :

- Au centre de la flamme : un gaz combustible ;
- À l'extérieur de la flamme : le comburant, en général le dioxygène de l'air, et les produits de réaction (gaz et particules).

La structure de la flamme de diffusion est illustrée par la **figure 1.3** :

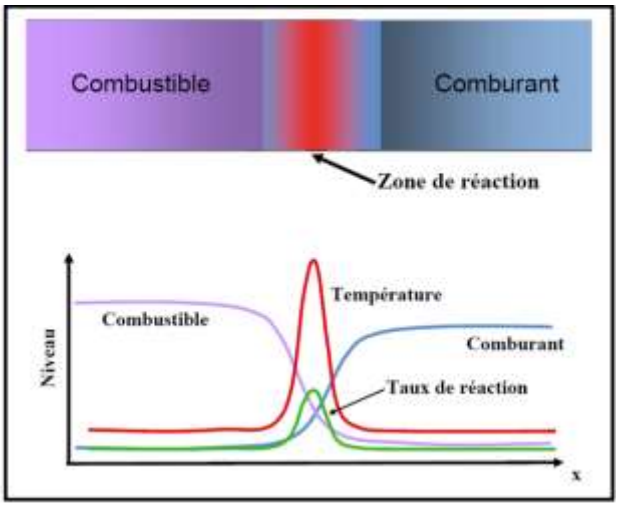


Figure 1.3: Structure de flamme de diffusion

I.2 Présentation de l'objectif de l'étude :

La réponse des structures exposées au feu dépend fortement du type de feu qui se produit, lequel dépend lui-même beaucoup de la géométrie du compartiment. Dans le cadre de ce projet, des simulations à l'aide d'un code MATLAB pour le calcul des températures des gaz en déplacement ont été réalisées pour analyser l'influence de géométrie du compartiment et l'interaction avec des charges de combustible représentatives afin d'explorer les conditions conduisant au développement d'un feu itinérant. L'influence observée de la hauteur du plafond, de l'espacement des caissons et de la géométrie des ouvertures dans le contrôle des vitesses de propagation tend à confirmer la possibilité de prédire l'apparition ou non d'un feu itinérant.

Dans ce travail est de réaliser le programme MATLAB développé par Egle Rackauskaite qui a été créé sur la base de plusieurs scénarios pour simuler la propagation d'un incendie dans lequel plusieurs paramètres ont été modifiés, tels que : la densité de charge combustible QF (kJ/m^2), et le taux de dégagement de chaleur par unité de surface $\dot{Q}''(kW/m^2)$,la hauteur (m) et la température (C°) de chambre , pour obtenir plusieurs résultats sous forme de courbes, qui sont ensuite utilisées par les ingénieurs en sécurité d'incendie, et pour la construction de bâtiments et pour l'intervention rapide des pompiers en cas d'incendie

Cette analyse est essentielle car la géométrie du compartiment peut considérablement influencer la dynamique du feu. Par exemple, des études antérieures ont montré que la présence de plafonds en bois exposés dans de grands espaces

décloisonnés peut modifier la propagation et l'intensité du feu, affectant ainsi la structure environnante [5][6]. L'impact de la ventilation, qui est une composante critique lorsqu'on examine les compartiments à plan ouvert, a également été soulignée dans les recherches, car elle peut influencer la manière dont un feu se propage ou se développe [6].et cela ce qui ont prouvé par les études de Thomas en 2005, ce qui était la principale conclusion était que les incendies dans les compartiments profonds sont fortement affectés par la ventilation.

D'autres recherches ont exploré comment différentes configurations de feu, comme les feux voyageant sous des conditions de ventilation ouvertes, affectent les structures environnantes [7]. Ces études montrent que la compréhension des interactions entre la géométrie du compartiment, les charges de combustible et les conditions de ventilation est cruciale pour prévoir et atténuer les risques structurels en cas d'incendie.

Ainsi, ces simulations que nous avons réalisée dans le cadre de cette étude fourniront des perspectives précieuses sur les conditions qui favorisent le développement des feux itinérants, en mettant en lumière l'importance de divers facteurs architecturaux (forme des compartiments ou obstacles) et environnementaux dans la dynamique des incendies.

I.3 ETAT DE L'ART :

Les feux dans les grands compartiments n'atteignent pas toujours un état de feu post « flashover » et il s'agit plutôt d'un feu plus localisé qui peut se propager à l'intérieur du compartiment. Plus récemment, la terminologie « feu itinérant » a été utilisée pour définir les feux brûlants localement et se déplaçant sur des plaques de plancher entières sur une période de temps [8].

Les incendies accidentels peuvent être désastreux, en particulier dans les bâtiments. A titre d'exemple nous citons les incendies de Los Angeles, en Californie du sud (2025), qui est actif depuis trois semaines et ont brûlé une superficie de plus de 150 kilomètres. Aussi l'incendie de la tour Windsor à Madrid (2005) et l'incendie du One Meridian Plaza à Philadelphie (1991), Ce sont les deux derniers ont duré jusqu'à 7 ou même 20 heures [9]. Des durées d'incendie aussi longues ne sont pas prises en compte et ne peuvent pas être comprises par les codes de conception actuels. Un concept

innovant appelé la méthodologie des incendies itinérants (TFM "Travelling Fires Methodology «) a été développé pour prendre en compte ce comportement d'incendie non uniforme. TFM fournit une approche pour la génération de courbes de température des gaz en fonction du temps au plafond d'un compartiment de hauteur moyenne à n'importe quel endroit du compartiment. Le plafond est la cible car c'est là que les températures maximales sont attendues. TFM considère que les incendies de conception sont composés de deux régions mobiles : le champe proche (flammes) et le

Champe lointain (fumée). Une illustration des deux champs est présentée dans **Figure 1.4.**

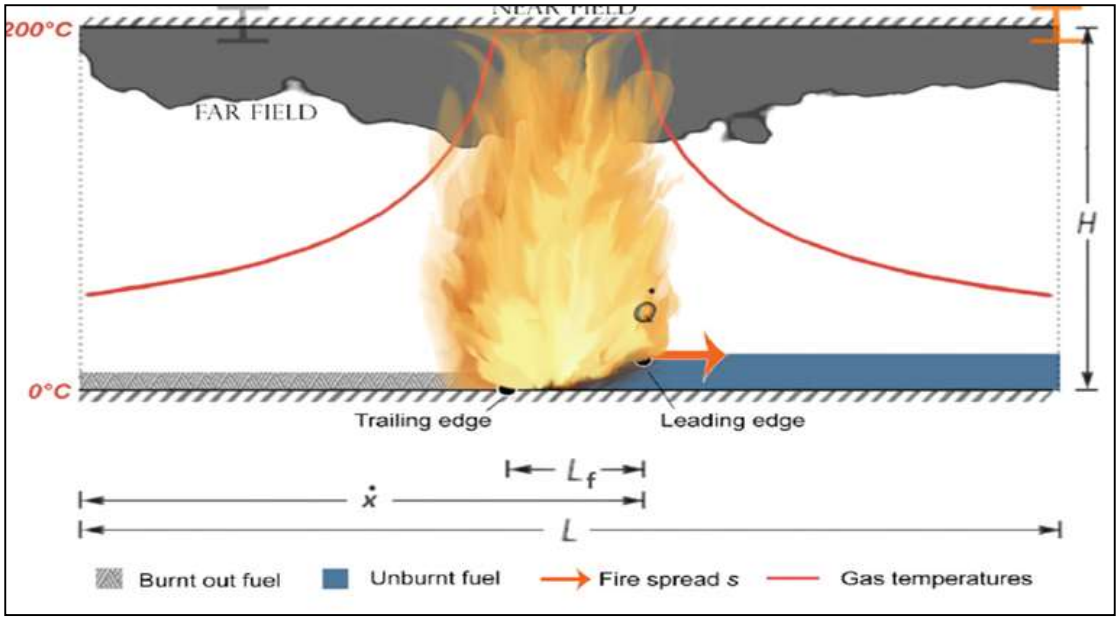


Figure1.4 : Illustration d'un feu itinérant et de la distribution des températures des gaz.

Le champe proche représente les flammes frappant directement le plafond et suppose les températures maximales des flammes. Le modèle de champe lointain représente les températures de fumée qui diminuent avec la distance par rapport au feu en raison du mélange avec l'air. Et ceci corroboré par les données d'essai des essais à grands compartiments de St. Lawrence Burns réalisés en 1958 [10].

Clifton a été le premier à introduire l'approche de développement des relations température-temps qui prendrait en compte les feux itinérants [11]. L'approche de Clifton divise le compartiment (firecell) en quatre zones distinctes à tout moment :

préchauffage, feu, combustion et fumée. Cependant, le modèle n'a pas été développé ni utilisé davantage.

Rein et al. Ont utilisé La dynamique des fluides computationnelle (CFD) a été utilisée pour générer des champs de température [12]. Elle a ensuite été simplifiée pour un seul étage afin de transmettre moins d'informations à l'analyse structurelle ultérieure tout en fournissant des résultats réalistes. Elle a utilisé une corrélation de jet de plafond pour décrire le champ de température.

Stern-Gottfried, Law et Rein [12,13,14,15] qui ont développé un nouveau concept de conception de la méthodologie des feux itinérants (TFM). Ce cadre intègre l'effet des incendies non uniformes dans les grands espaces ouverts. Il ne remplace pas les méthodes de conception traditionnelles, mais peut être utilisé en complément de celles-ci et étudie une gamme de dynamiques d'incendie possibles au lieu d'un ou deux incendies de conception seulement. Il prend en compte les distributions de température non uniformes le long du compartiment et une large gamme de tailles de feu (surface de plancher en feu).

La méthodologie des feux itinérants est appelée TFM et la méthodologie des feux itinérants avec des formulations améliorées présentées dans l'article de Ègle-Rackauskaite et all. est appelée iTFM (**Improved Travelling Fires Methodology**) [14]. Dans ce dernier article, ITFM est appliquée aux compartiments génériques en béton et en acier pour étudier l'effet du chauffage non uniforme associé aux incendies itinérants en examinant l'emplacement de la température maximale le long du trajet du feu. On constate qu'elle dépend principalement de la vitesse de propagation du feu et du taux de dégagement de chaleur. Et ont conclu que l'emplacement du pic de température dans le compartiment est fonction à la fois de la taille de l'incendie (c'est-à-dire du taux de dégagement de chaleur et des températures de fumée résultantes) et de la vitesse de propagation (c'est-à-dire du temps pendant lequel les éléments de structure sont exposés au préchauffage).

Les données disponibles sur les vitesses de propagation typiques d'un incendie de compartiment sont très limitées. Un résumé des taux de propagation du feu signalés et des valeurs estimées est présenté dans le tableau suivant :

Tableau1.1 : Taux de propagation du feu réalistes, basé sur des données issues d'expériences et d'incendies réels.

Vitesse de propagation (S_{min} / S_{max})	Détails	Référence
0,1 / 2	Crèches en bois à ciel ouvert Étalement	[16]
1	Latéral ou vers le bas sur des solides épais	[17]
1,5 / 19,3	Essais sur feux naturels dans des compartiments à grande échelle	[18]
2,5 / 16,7	Reconstitution des incendies du WTC (2001	[19]
7,5 / 13	Essais de brûlures à St. Lawrence (1958) Premier	[20][21]
14.5	Incendie sur une autoroute inter-États (1988)	[22][23]

Les données compilées présentent des taux de propagation du feu très variables, allant de 0,1 mm/s à plus de 19 mm/s, selon le type de scénario, les matériaux en cause et les conditions expérimentales ou réelles. Egle Rackauskaite [24] suggérer Ces valeurs comme vitesses minimales et maximales de propagation du feu pour déterminer une plage valide de tailles d'incendie.il a conclu que la plage valide de tailles d'incendie peut être décrite comme suit : Depuis $\frac{L_{f,\min}}{L}$ A $\frac{L_{f,\max}}{L}$

Où $L_{f,\min}$ / $L_{f,\max}$ est la taille minimale ou maximale possible du feu en termes de langueur le long du trajet du feu (m) ;(L_f connaissance dans l'équation n°2.44)

En plus du modèle de Clifton en 1996 [11], et du Le modèle de Rein et ses versions ultérieures raffinées à partir de 2007 [9],[12]. En 2016 DAI et ALL, proposé un cadre méthodologique étendu de détection des incendies itinérants (**ETFM** " **Extended Travelling Fire Methodology** "). Le cadre ETFM est développé en « mobilisant » le modèle d'incendie localisé de Hasemi [25] pour le panache de feu près

de la structure (c'est-à-dire en champe proche). De plus, comme l'équation de Hasemi est applicable aux incendies localisés dans un espace non confiné et que l'accumulation de fumée n'est pas prise en compte dans son modèle, cela peut conduire à ce que les flux de chaleur prédits en champe lointain basés sur le modèle de Hasemi soient inférieurs aux expositions réelles dans un espace confiné (bien que le modèle de Hasemi ne soit applicable qu'au champe proche). Par conséquent, le modèle de Hasemi est combiné à un calcul de couche de fumée chaude (c'est-à-dire le modèle de zone FIRM [26]) qui permet intrinsèquement au cadre ETFM de prendre en compte à la fois la conservation de l'énergie et de la masse pour la conception dans un grand compartiment. On suppose alors que les flux de chaleur radiants et convectifs vers les surfaces structurelles peuvent être calculés sur la base d'addition du flux de chaleur du modèle de feu localisé de Hasemi et du flux de chaleur du modèle de zone FIRM. Cela pourrait être conservateur dans la zone de chevauchement. Il est à noter que les méthodologies de feu itinérant proposées précédemment n'ont pas tenté de tenir compte explicitement du bilan massique et énergétique dans le compartiment. Ainsi, le cadre ETFM aborde en principe davantage la dynamique du feu.

Plus important encore, il convient de noter que l'ETFM dans la nature est un cadre c'est-à-dire que les utilisateurs pourraient choisir de remplacer le modèle de Hasemi par d'autres modèles d'incendie localisés, ou FIRM par d'autres modèles de zone, en fonction de l'applicabilité des modèles d'incendie dans leurs conditions d'incendie de conception spécifiques.

Chapitre II : Formulation Mathématique

II.1. Introduction :

La masse des gaz chauds et moins denses entourés de gaz plus froids s'élève en raison de la différence de densité.

Ce flux flottant y compris toutes les flammes au-dessus d'une source de combustible en feu est appelé panache de feu.

De l'air plus froid est entraîné dans le panache tandis que les gaz chauds montent.

La taille et la géométrie des flammes sont importantes pour :

- L'ingénieur en sécurité incendie
- Conception d'équipements de détection et d'extinction d'incendie

L'étude du feu nécessite la connaissance de divers des disciplines telles que le :

- Transfert de chaleur.
- La mécanique des fluides.
- L'ingénierie des réactions.
- Les écoulements multiphasiques.

II.2. Caractéristiques de la flamme :

II.2.1. Panaches de feu et hauteurs de flammes :

II.2.1.1. Flamme de diffusion :

Le carburant et l'oxygène sont initialement Les gaz se séparent et se mélangent par diffusion. La combustion et l'inflammation se produisent lorsque la concentration du mélange est favorable à la combustion.[27]

II.2.1.2. Flammes dominées par la flottabilité ou par l'impulsion :

L'écoulement dans une flamme est dominé par la flottabilité si la vitesse à laquelle le carburant est injecté n'est pas trop élevée, Au contraire les écoulements formés au-dessus de sources de carburant à haute pression sont dominés par l'impulsion.[27]

II.2.1.3. Turbulence :

- Écoulement laminaire observé dans de très petites flammes.
- Les tourbillons s'enroulent le long de l'extérieur du panache et sont Le résultat de l'instabilité entre l'air chaud et l'air froid.

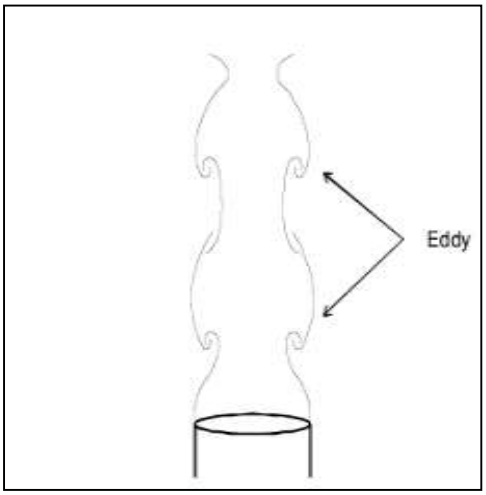


Figure 2.1 : l'état turbulence de feu

II.2.1.4.la hauteur moyenne de la flamme :

La hauteur moyenne de flamme est celle à laquelle l'intermittence est égale la moitié, elle est définie comme la hauteur au-dessus de laquelle les flammes apparaissent plus de la moitié du temps [29].

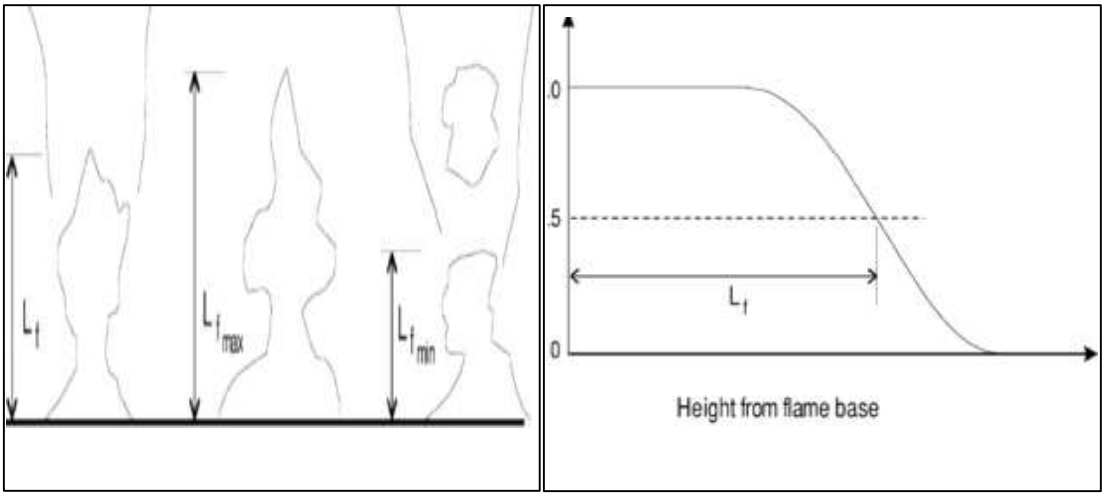


Figure 2.2: Représentation schématique de la hauteur de flamme et de sa distribution thermique le long de la base

II.2.1.5. Nombre de Froude :

Le nombre de Froude, de l'hydrodynamicien anglais William Froude, est un nombre adimensionnel qui caractérise dans un fluide l'importance relative des forces liées à la vitesse et à la force de pesanteur et exprimée par la relation suivante :

$$Fr = \frac{u^2}{g \times D} \qquad (2.1)$$

Où

- u = vitesse d'écoulement
- D = diamètre de la source d'écoulement

Le nombre de Froude, désigne le rapport entre les forces d'inertie et les forces de flottabilité.de sorte que Plus le nombre de Froude initial est faible, plus la région de panache est importante. Les limites de ces régions vont alors dépendre essentiellement de ce nombre et donc des masses volumiques initiales des fluides.

II.2.1.6. Le taux de dégagement de chaleur :

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_c = \rho u\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)\Delta H_c \qquad (2.2)$$

Tel que :

- $\dot{Q}$: le taux de dégagement de chaleur
- ṁ : Débit massique
- ΔH_c : L'augmentation de la température
- D : le diamètre

On réarrangement :

$$u = \frac{Q}{\Delta H_C \rho\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \qquad (2.3)$$

Substitution dans l'expression du nombre de Froude :

$$Fr = \frac{\dot{Q}^2}{D^5} \qquad (2.4)$$

- La géométrie des flammes de diffusion turbulentes est trouvée à l'échelle de la racine carrée de Nombre de Froude :

$$\sqrt{Fr} = \frac{l}{D} = \sqrt{\frac{\dot{Q}^2}{D^5}} = \frac{\dot{Q}}{D^{\frac{5}{2}}} \qquad (2.5)$$

- Exprimé en termes de taux de restitution d'énergie sans dimension

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_P T_\infty D^2\sqrt{g \times D}} \qquad (2.6)$$

Pour $\dot{Q}^*$ <10 la plupart des situations d'incendie y compris les grands incendies

- Corrélation Heskestad :

$$\frac{l}{D} = 3.7 \times \dot{Q}^{*\frac{2}{5}} - 1.02 \qquad (2.7)$$

Donne uniquement la hauteur moyenne de la flamme

II.2.2. Panache axisymétrique flottant :

- Causé par une flamme de diffusion formée au-dessus d'un Carburant en combustion.
- On suppose qu'un axe de symétrie existe le long de la ligne médiane verticale du panache.
- Divisé en trois zones [27,28,30] :

1. Zone de flamme continue :

   Augmentation de la vitesse Ascendante

2. Zone de flamme intermittente :

   Vitesse ascendante presque constante

3. Zone de champ lointain :

   La vitesse diminue avec la hauteur

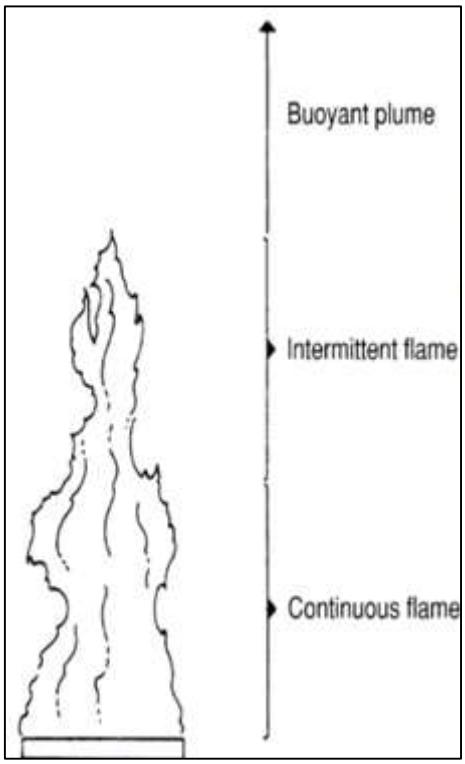


Figure2.3 : Représentation des trois régimes du panache thermique

•La vitesse et la température du panache sont maximales sur la ligne centrale et diminuent vers le bord du panache

• Rayon du panache :

-Le rayon du panache de la source ponctuelle s'étend approximativement avec un angle de15° par rapport à la verticale.

-Correspond approximativement au point où l'augmentation de température a diminué à $0,5\Delta T_0$.

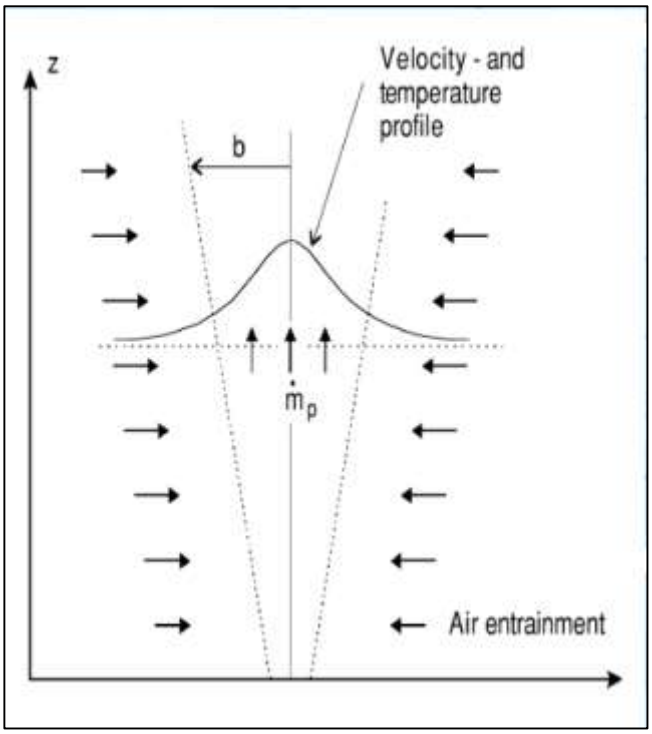


Figure 2.4: la variation de vitesse et la température de panache.

II.2.3 Plume idéale :

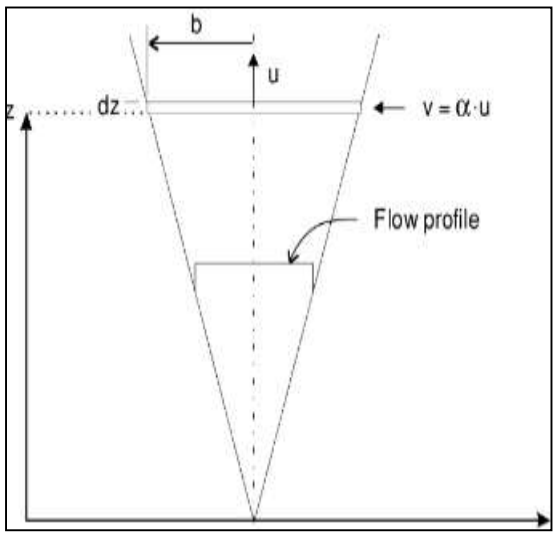


Figure 2.5 : Plume idéale.

- L'énergie est injectée à la source ponctuelle et reste dans le panache. Aucune perte due au rayonnement.
- Approximation de Boussinesq : les variations de densité le long de la hauteur du panache sont faibles. Seule la différence (ρ_∞-ρ) doit être prise en compte. (Hypothèse de panache faible/hauteurs plus grandes). [27,30]
- Profil haut de forme pour la vitesse et la température.
- L'entraînement d'air est proportionnel à la vitesse locale du gaz dans le panache c'est-à-dire :

$$v = \alpha \times u \tag{2.8}$$

Avec α : est le coefficient d'entraînement.

II.2.3.1. Équations constitutives :

- Débit massique :

$$\dot{m}p = \pi b^2 \times \rho u \tag{2.9}$$

- Force de flottabilité différentielle :

$$dF = g\left(\rho_\infty - \rho\right) \times dz \times \pi b^2 \tag{2.10}$$

- Taux de dynamique temporelle :

$$\dot{m}_p u = \pi b^2 \times \rho u^2 \tag{2.11}$$

- Relation entre la différence de densité et le taux de restitution d'énergie :

$$\dot{Q} = \dot{m}_p c_p \Delta T = \pi b^2 \rho u \times c_p \Delta T \tag{2.12}$$

Avec :

(Par la loi des gaz parfaits)

$$\Delta T = \frac{\Delta \rho}{\rho} \times T_\infty \tag{2.13}$$

$$\Delta \rho b^2 = \frac{\dot{Q}}{\pi u c_p T_\infty} \tag{2.14}$$

II.2.3.2. Équation de continuité pour la masse :

L'augmentation de la masse circulant à travers un élément différentiel **dz** doit être entraînée à travers les côtés de l'élément **dz**

- Taux de variation de la masse en fonction de la hauteur dz :

$$\frac{d\dot{m}_p}{dz} = \frac{d\left(\pi b^2 \rho u\right)}{dz} \tag{2.15}$$

- Taux d'air entraîné par unité de longueur :

$$2\pi b \times dz \times \alpha \times u \times \frac{\rho}{dz} \tag{2.16}$$

- Égalisation des deux et utilisation de l'hypothèse d'un panache faible ($\rho_\infty = \rho$) :

$$\frac{d}{dz}\left(b^2 u\right) = 2\alpha \times u \times b \tag{2.17}$$

II.2.3.3. Équation de la quantité de mouvement et de la flottabilité :

Le taux de variation de l'impulsion doit être égal aux forces de flottabilité agissant par unité de hauteur.

- Le taux de variation de l'impulsion par unité de hauteur Z est :

$$\frac{d}{dz}\left(\dot{m}_p u\right) = \frac{d}{dz}\left(\pi \rho b^2 u^2\right) \tag{2.18}$$

- La force de flottabilité agissant sur l'élément différentiel dz par unité de hauteur est :

$$\frac{dF}{dz} = g\left(\rho_\infty - \rho\right) \times \pi b^2 \tag{2.19}$$

- En égalisant les deux et en utilisant la relation entre la différence de densité et le taux de libération d'énergie dérivée ci-dessus et l'hypothèse du panache faible nous obtenons :

$$\frac{d}{dz}\left(b^2 u^2\right) = \frac{g \times \dot{Q}}{\pi \times u \times c_p \times T_\infty \times \rho_\infty} \tag{2.20}$$

Solution des équations différentielles :

• on a Supposer que :

$$B = C_1 \times Z^m \tag{2.21}$$

$$U = C_2 \times Z^n \tag{2.22}$$

• En effectuant une substitution dans les équations différentielles (2.17) et (2.20) et en comparant les coefficients et la puissance de **z** on obtient :

Pour :m=1 $\longrightarrow$ $C_1 = \frac{6}{5}\alpha$ (2.23)

Et pour : $n = \frac{1}{3}$ $\longrightarrow$ $C_2 = \left(\frac{25}{48\alpha^2} \times \frac{g\dot{Q}}{\pi c_p \times T_\infty \rho_\infty} \right)^{\frac{1}{3}}$ (2.24)

II.2.3.4. Expressions analytiques résultantes :

- le Rayon du panache:

$$b = \frac{6}{5}\alpha \times z \quad (2.25)$$

- La Vitesse du panache :

$$u = \left(\frac{25}{48\alpha^2} \times \frac{g\dot{Q}}{\pi c_p \times T_\infty \rho_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \times z^{-\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

(en utilisant α = 0,15)

$$u = 1{,}94 \left[\frac{g}{c_p \times T_\infty \times \rho_\infty} \right]^{\frac{1}{3}} \times \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \times z^{-\frac{1}{3}} \quad (2.27)$$

- Débit massique du panache :

$$\dot{m}_p = 0.2 \left(\frac{\rho_\infty{}^2 \times g}{c_p \times T_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \times \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \times z^{\frac{5}{3}} \quad (2.28)$$

- L'augmentation de la température du panache :

$$\Delta T = 5 \left(\frac{T_\infty}{g \times c_p{}^2 \times \rho_\infty{}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \dot{Q}^{\frac{2}{3}} \times z^{-\frac{5}{3}} \quad (2.29)$$

II.2.4. Le panache d'Heskestad :

- Hypothèse de source ponctuelle assouplie par l'introduction d'une origine virtuelle[29]
- Perte d'énergie du panache.
- Profil gaussien pour la vitesse ou la température.
- Approximation de Boussinesq supprimée décrit de forts panaches.

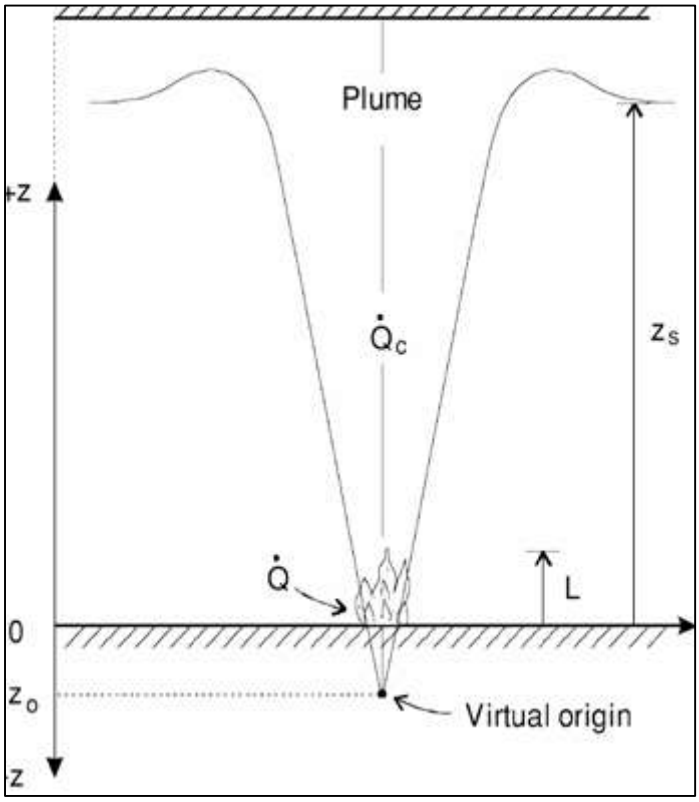


Figure 2.6 : Panache en forme de cône au-dessus de la source.

II.2.4.1. Origine virtuelle :

(Meilleur ajustement à partir des expériences)

$$Z_0 = 0.083\dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02D \tag{2.30}$$

II.2.4.2. Hauteur moyenne de la flamme :

$$l = 0.235\dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1.02D \tag{2.31}$$

II.2.4.3. Taux de restitution d'énergie :

Autres propriétés corrélées avec le taux de restitution d'énergie par convection ~ (20 à 40) % du taux de restitution d'énergie total :

$$0.6\dot{Q} \langle \dot{Q}_C \langle 0.8\dot{Q} \tag{2.32}$$

II.2.4.4. Rayon du panache :

$$b = 0.12\left(\frac{T_0}{T_\infty}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(Z - Z_0\right) \tag{2.33}$$

II.2.4.5. Température de la ligne centrale du panache :

$$\Delta T_0 = 9.1\left(\frac{T_\infty}{g \times {c_p}^2 \times {\rho_\infty}^2}\right)^{\frac{1}{3}} \times \dot{Q}_C^{\frac{2}{3}} \times \left(Z - Z_0\right)^{-\frac{5}{3}} \quad (2.34)$$

II.2.4.6 Vitesse de l'axe central du panache :

$$u_0 = 3.4\left(\frac{g}{c_P \times T_\infty \times \rho_\infty}\right)^{\frac{1}{3}} \times \dot{Q}_C^{\frac{1}{3}} \times \left(Z - Z_0\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2.35)$$

II.2.4.7. Débit massique du panache :

a. Hauteur de flamme supérieure à la moyenne :

$$\dot{m}_p = 0.071\dot{Q}_C^{\frac{1}{3}} \times \left(Z - Z_0\right)^{\frac{5}{3}} + 1.92 \times 10^{-3} \times \dot{Q}_C \quad (2.36)$$

b. Hauteur de flamme inférieure à la moyenne :

$$\dot{m}_p = 0.0056\dot{Q}_C \times \frac{Z}{l} \quad (2.37)$$

II.2.5. Jets de plafond et flammes de plafond :

Lorsque le panache atteint le plafond l'air chaud le constituant se répand alors dans les Directions radiales. Afin de déterminer le temps de réponse des équipements de détection et d'extinction d'incendie, L'entraînement d'air à l'interface de la couche lorsque le jet se déplace radialement vers l'extérieur ainsi que le transfert de chaleur vers le plafond refroidissent le flux.

Il est important de déterminer la température et la vitesse de l'air chaud qui se propage sous le plafond (Figure 2.7). [27,31]

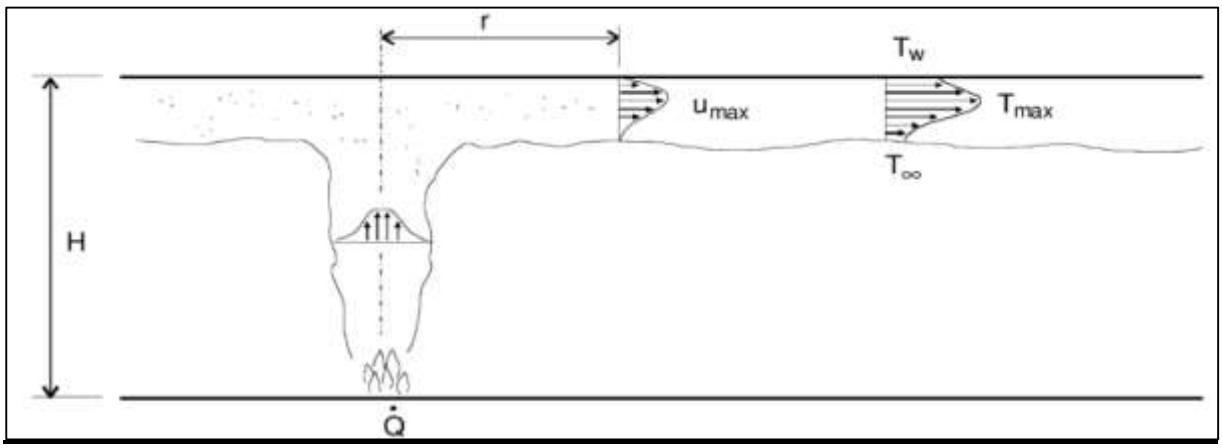


Figure 2.7 : Développement d'une couche d'air chaud sous le plafond.

II.2.5.1Corrélation d'ALPERT - Jets de plafond pour une température et une vitesse « maximales » :

Les Corrélation d'ALPERT sont utilisées dans la conception des systèmes de sprinklers automatiques, car l'équation d'Alpert a été développée à partir d'une vaste série d'expérimentations. En outre, cette équation fournit des résultats comparables à ceux des modèles complexes. Ainsi, l'utilisation des relations d'Alpert permet de réduire les erreurs de modélisation et d'accélérer les calculs, puisqu'il s'agit d'une formule mathématique simple qui peut être directement intégrée dans un modèle analytique, sans qu'il soit nécessaire de diviser l'espace ni de recourir à des logiciels complexes tels que la CFD.

Grâce aux expériences qu'il a réalisées, Alpert a réussi à établir des relations qui permettent de décrire comment la chaleur et l'air chaud générés par un incendie se diffusent sous le plafond. [27,32]. Par conséquent :

• L'équation 2.38 illustre l'augmentation maximale de température observée près du centre du feu.

• L'équation 2.39 sert à évaluer la baisse de température, une réduction qui est attribuée à la distance croissante du foyer de l'incendie.

• Les équations 2.40 et 2.41 illustrent le changement de la vitesse d'écoulement de l'air chaud en fonction de la distance H, qui correspond à l'épaisseur entre la source du feu et le plafond.

$$T_{\max} - T_{\infty} = 16.9 \times \dot{Q}^{\frac{2}{3}} \left(H - Z_0\right)^{-\frac{5}{3}} \qquad pour\ r \langle 0.18H \qquad (2.38)$$

$$T_{\max} - T_{\infty} = 5.38 \left(\frac{\dot{Q}}{r}\right)^{\frac{2}{3}} \left(H - Z_0\right)^{-1} \qquad pour\ r \rangle 0.18H \qquad (2.39)$$

$$u_{\max} = 0.96 \left[\frac{\dot{Q}}{\left(H - Z_0\right)}\right]^{\frac{1}{3}} \qquad pour\ r \langle 0.15H \qquad (2.40)$$

$$u_{\max} = 0.195 \left[\dot{Q}^{\frac{1}{3}} \times \left(H - Z_0\right)^{\frac{1}{2}}\right] \times r^{-\frac{5}{6}} \qquad pour\ r \rangle 0.15H \qquad (2.41)$$

Avec : r = distance radiale sous le plafond (m)

II.2.5.2. Autres corrélations - Jets de plafond :

Pour une température « maximale »

$$\Delta T_{max} = \left(T_{max} - T_{\infty}\right) = \dot{Q}^{-\frac{2}{3}} \times H^{*-\frac{5}{3}} \times F\left(\frac{r}{H^{*}}\right) \qquad (2.42)$$

Tableau N°2.1 : Autres corrélations - Jets de plafond [33].

Investigateur	$\Delta Tm / \dot{Q}^{2/3} H^{-5/3}$	MIN	MAX
Albert (1972)	$5.38\left(\frac{r}{H}\right)^{-\frac{2}{3}}$	0.18	2.0
HESKESTAD et DELICHATSIOS (1978)	$2.75\left(0.188+0.313\times\frac{r}{H}\right)^{-\frac{4}{3}}$	0.0	8.00
Cooper (1982)	$28.1EXP\left(-1.77\times\frac{r}{H}\right)$	0.0	0.75
Cooper (1982)	$5.77\left(\frac{r}{H}\right)^{-0.88}$	0.75	4.0
MOTEVALLI et MARKS (1990)	$0.23\left(\frac{r}{H}\right)^{-2}+5.2\left(\frac{r}{H}\right)^{-1}+2.7$	0.26	2.0
TOMAS (1955). PICKARD (1957)	$6.85\left(\frac{r}{H}\right)^{-0.57}$	0.2	4.0

II.3. Description du Modèle Numérique (formulation Mathématique utilisé dans nous système) :

II.3.1. Plage valide de tailles d'incendie :

L'évolution de l'incendie est analysée à partir des caractéristiques du combustible. Ainsi, la densité de charge combustible QF (kJ/m^2), et le taux de dégagement de chaleur par unité de surface $\dot{Q}''$(kW/m^2), constituent des facteurs essentiels dans l'étude [24]. Temps de combustion local TB(s), (par exemple 1900 s ou 32 min) est ensuite calculée en fonction de ces paramètres, selon l'équation suivante [24] :

$$TB = \frac{QF}{\dot{Q}''} \tag{2.43}$$

Cette variable quantifie le temps nécessaire pour qu'une zone impliquée dans un incendie brûle complètement.

Les tailles des incendies limités peuvent être déterminées à partir des vitesses de propagation, lesquels influencent directement l'avancée du front de feu (bord d'attaque voire Figure 1.4). Cette analyse permet d'évaluer la distance maximale parcourue par le front de feu avant son extinction, comme dans l'équation ci-dessous :

$$LF_{\min/\ \max} = S_{\min/\max} \times TB \tag{2.44}$$

Où LF min/max est la taille minimale ou maximale possible du feu en termes de langueur le long du trajet du feu (m) ;

Et S min/max est la vitesse de propagation réaliste minimale ou maximale d'un incendie de bâtiment (m/s)

II.3.2. Champe lointain :

Les températures de fumée plus froide (les températures de champe lointain) représenter par conception de sprinklers de sort que ces températures diminuent avec la distance par rapport au feu. Il est illustré par l'équation suivant :

$$T_{\max} - T_{\infty} = 5.38 \times \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{r}\right)^{\frac{2}{3}}}{H} \tag{2.45}$$

Où :

- T_{max} est la température du gaz chaud près du plafond (◦C)
- T_{∞} est la température ambiante (◦C).
- $\dot{Q}$ est le taux de dégagement de chaleur total (kW)
- r est la distance radiale par rapport au feu (m)
- H est la hauteur du plafond (m).

Le taux total de dégagement de chaleur peut être calculé par l'équation suivante :

$$\dot{Q} = W \times LF \times \dot{Q}'' \tag{2.46}$$

Où :

- W :la largeur de la chambre (m)
- LF : la langueur de feu (m)

La langueur de feu défini par l'équation suivant :

$$LF = L \times \text{FSIZE} \tag{2.47}$$

Tel que :

- L : la langueur du compartiment (m)
- FSIZE : la taille variable et sans dimension du feu qui dépend de l'emplacement du bord d'attaque du feu (langueur de feu / la langueur de compartiment).

Nous pouvons expliquer la vitesse de propagation du feu S (m/s) et la durée totale de l'incendie T_{total} (s) à l'aide des équations suivantes, respectivement :

$$S = \frac{LF}{TB} \tag{2.48}$$

$$T_{TOTAL} = TB \times \left(\frac{1}{FSIZE + 1} \right) \tag{2.49}$$

L'emplacement du bord d'attaque de l'incendie par rapport à l'extrémité du compartiment où l'incendie a commencé $\dot{x}$(m) peut être calculé comme suit :

$$\dot{x} = S \times t \tag{2.50}$$

Avec t(s) est le temps.

La corrélation entre les températures des gaz en champe proche et en champe lointain près du plafond T_{max}, à n'importe quel endroit x (m) le long du trajet du feu et le temps (s) résulte de l'ensemble des équations (2.45,2.50).tel que :

$$T_{\max}(x,t) = T_{\infty} + \frac{5.38}{H} \times \left(\frac{LF \times W \times \dot{Q}}{\left| x + 0.05LF - \dot{x}_t \right|} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{2.51}$$

$$T_{\max}(x,t) = T_{nf}, \ if \begin{cases} T_{ff} \rangle T_{nf}; \\ \left| x - 0.5LF - \dot{x}_t \right| \le 0.5LF; \end{cases} \tag{2.52}$$

$$for \ \ \dot{x} \le L \rightarrow \dot{x}_t = S \times t; \ FSIZE_t = \min[L, \frac{S \times t}{L}] \tag{2.53}$$

$$\dot{x} \rangle L \rightarrow \dot{x}_t = L \ ; \ FSIZE_t = 1 + \frac{(LF - S \times t)}{L} \tag{2.54}$$

Tel que :

- $\dot{x}_t$: test l'emplacement dépendant du temps du bord d'attaque de l'incendie par rapport à l'extrémité du compartiment où l'incendie a commencé (m).
- T_{nf} : est la température du champe proche (◦C)

Conditions décrites par l'équation (2.52) représentent la température du champ proche. Cela implique que les températures du gaz (c'est-à-dire du champ lointain) décrites par l'équation (2.51) ne peut pas dépasser la température de flamme en champ proche. Il définit également la valeur de température en champ proche pour toute la durée de la zone touchée par l'incendie ($FSIZE_t$)

Les équations (2.53,2.54) sont utilisées pour définir des tailles d'incendie variables) et l'emplacement du bord d'attaque (Lt) en fonction du fait que le feu continue de croître en taille ou qu'il est à sa taille maximale (équation (2.53)) ou a atteint l'extrémité du compartiment et est en décomposition (équation (2.54)).[24]

II.3.3. Champe proche - battement de flamme :

La température moyenne sur la langueur (f) du plafond affecté par les variations du feu incident (voir la figure 2.8) est calculée en tenant compte à la fois les températures des zones proches et éloignées du feu, toutes deux considérées à 1 200 °C. cela conduit une diminution de la température dans la zone proche. Cette dernière température réduite est ensuite utilisée pour établir les courbes temps-température d'un feu mobile, en remplacement de la valeur de crête fixe de 1 200 °C. [24]

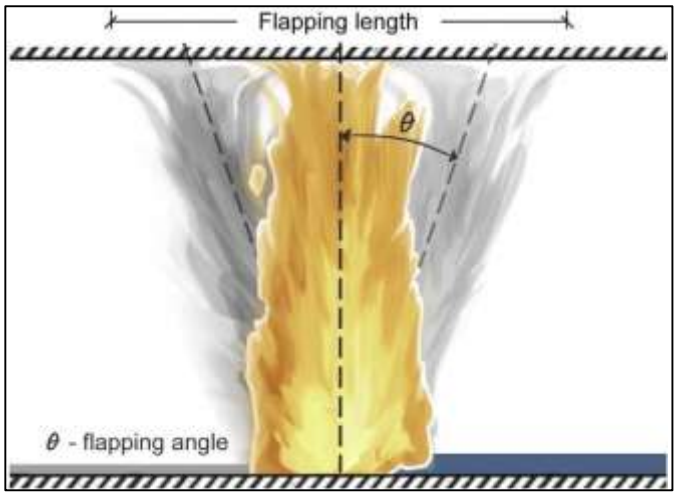


Figure 2.8 : Représentation de la langueur de battement (f)au plafond et à l'angle (θ).

L'équation utilisée pour calculer la température réduite du champe proche due au battement, découvrez|-le comme suit :

$$T_f = T_\infty + \frac{T_{nf}\left(2r_{x1} + LF\right) - 2T_\infty \times r_{x2}}{f} + \frac{32.28\dot{Q}^{\frac{2}{3}}}{H \times f}\left(r_2^{\frac{1}{3}} - r_{x2}^{\frac{1}{3}}\right) \quad (2.55)$$

Tel que :

$$r_2 = \frac{f}{2} \quad (2.56)$$

$$r_{x1} = \max\left[0, r_0 - \frac{LF}{2}\right] \quad (2.57)$$

$$r_{x2} = \max\left[\frac{LF}{2}, r_0\right] \quad (2.58)$$

$$r_0 = \dot{Q} \times \left(\frac{5.38}{H \times \left(T_{nf} - T_{ROOM}\right)}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.59)$$

$$f = LF + 2 \times H \times \tan\left(FANGLE \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (2.60)$$

$$T_{nf} = 1200\ C°$$

L'angle de battement permet de déterminer la langueur

Où :

- r_2 : distance du centre de feu au bord de la zone de battement en (m)
- $T_{CHAMBRE}$: température ambiante de la chambre
- f : la langueur de flapping
- r_0 : pointe d'intersection de T_{max} (équation d'ALPERT) avec T_{nf}

  On peut dire que r_0 est la condition qui ne permet pas aux températures en champe lointain d'être supérieures à la température en champe proche.

Chapitre III : Présentation de Code MATLAB

III.1 Introduction :

Ce chapitre détaille l'algorithme de programme (MATLAB) conçu pour modéliser la température maximale (T_{MAX}) en chaque point d'un espace donné, en tenant compte de la dynamique d'un incendie. Il expose les différentes étapes de calcul, depuis l'initialisation des paramètres de l'environnement et de l'incendie jusqu'à la détermination de la température en champe proche et lointain. Le programme prend en compte des facteurs tels que les dimensions de la pièce, les caractéristiques du feu (taille, intensité, durée), et le phénomène de "battement" (déviation de la flamme) À travers une série de conditions et de boucles, il simule la propagation du feu et son impact thermique sur l'environnement

III.2 Explication détaillée de code :

III.2.1 Paramètres d'entrée :

1. Géométrie de compartiment :
- (La langueur, la largeur, la hauteur : dimensions du local en mètres).
2. Paramètres de l'incendie :
- FSIZE : fraction de la langueur totale occupée par le feu.
- $\dot{Q}''$: le taux de dégagement de chaleur par unité De surface (kW/m^2).
- QF : densité de charge de combustible (kJ/m2).
- $T_{CHAMBRE}$: température ambiant (C°).
- T_{NF} : température maximale dans le champe proche. (C°).
3. Angle de flamme (battement) :
- F_{ANGLE} : influence de la géométrie des flammes sur la langueur, effective de feu.
4. Pas de temp et d'espace :
- dt,dx : résolution spatiale et temporelle (Temps et positions d'intérêt),en (s) et (m).

III.2.2 Calculs préliminaires :

1. Temps de combustion local `TB` par l'équation (2.43) en (s).
2. 'LF' : langueur de feu par l'équation (2.47) en (m).
3. `S` : la vitesse de propagation de feu par l'équation (2.48) en (m/s).
4. `$T_{TOTAL}$` : Utilise l'équation (2.49), pour calculer la durée totale de feu (s)
5. 'T_{LIMIT}' : durée de durée totale de simulation. (s)
6. Génération des vecteurs `tt` (temps en (s)) et `xx` (positions en (m)).

III.2.3 Calcul du champ de déviation :

1. Calcul de la langueur de battement` $f$ `par l'équation (2.60) en (m)
2. Le taux de dégagement totale $\dot{Q}$ par l'équation (2.46) en (kW/m^2)
3. Calcul de la température maximale dans le champe proche `T $_{\text{NEAR FIELD}}$` (C°) :

- Basé sur l'équation d'Alpert par (l'équation 2.45)

$$T_{NEAR-FIELD\infty} = 5.38 \times \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{r}\right)^{\frac{2}{3}}}{H} + T_{chambre}$$

- SI r_0(distance critique est calculer par l'équation 2.59 en (m)) est a l'intérieur du champe proche ($r_0 > F / 2$), T $_{\text{NEAR FIELD}}$ =T_{NF}
- Sinon, une intégrale est utilisée pour calculer la température moyenne pondérée dans la région ″battement″ (les équations 2.55, 2.56, 2.57, 2.58).

III.2.4 Boucles de simulation :

1. Temps :

Pour chaque pas de temps, on calcule :

- La position du front de feu (Lt) et la taille effective (Ft), par les équations (2.53,2.54)
- Trois cas : feu n'a pas encore atteint la fin, atteint exactement, ou dépasse (fin du feu).

2. Position :

A chaque point spatial :

- Calculer r : distance au centre du feu.
- Appliquer les règles :

Si feu terminé ⟶ température ambiante

Si dans le champe proche ⟶ température maximale

Sinon, utiliser l'équation d'Alpert pour le champe lointain, avec

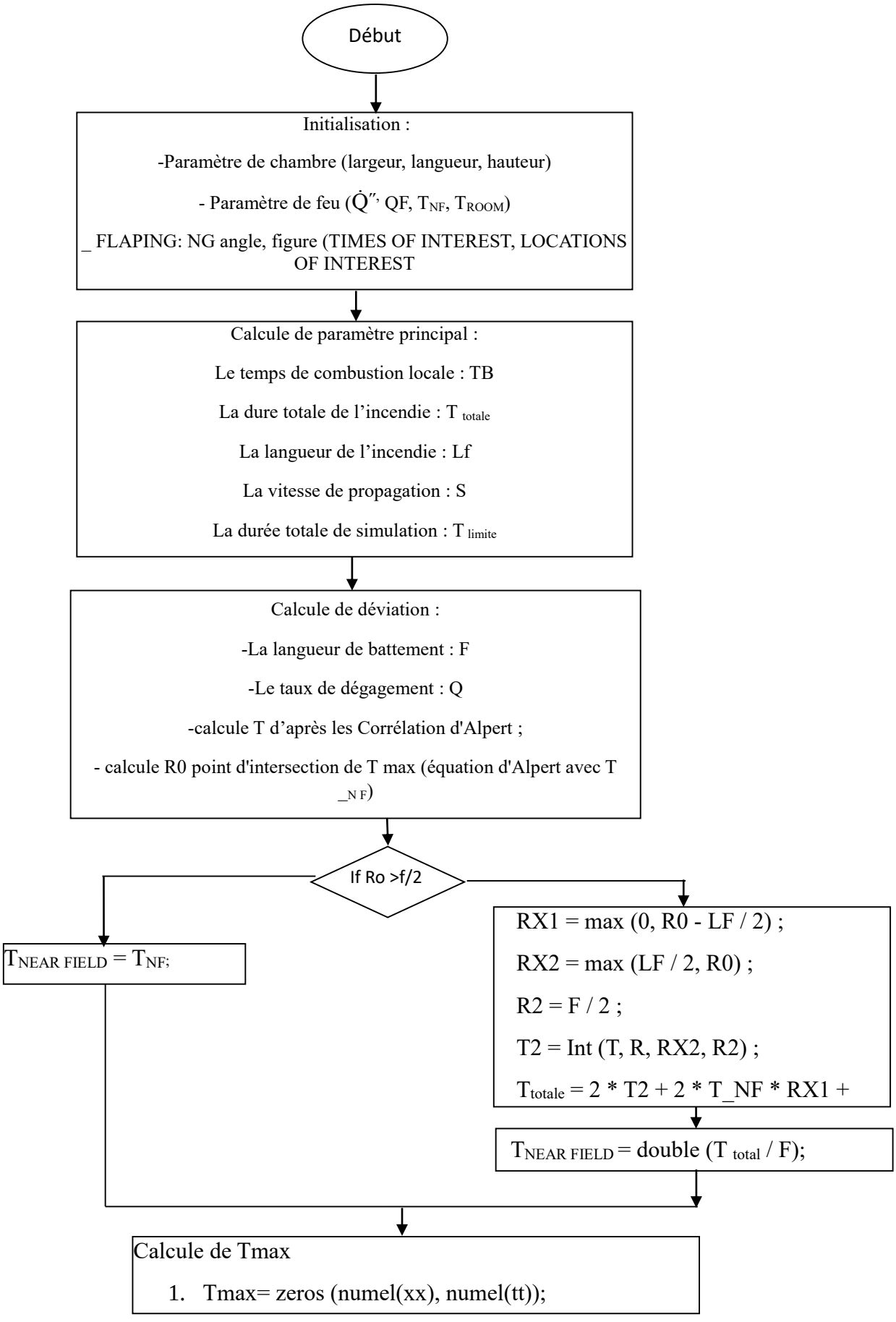
Plafonnement à T $_{\text{NEAR FIELD}}$.

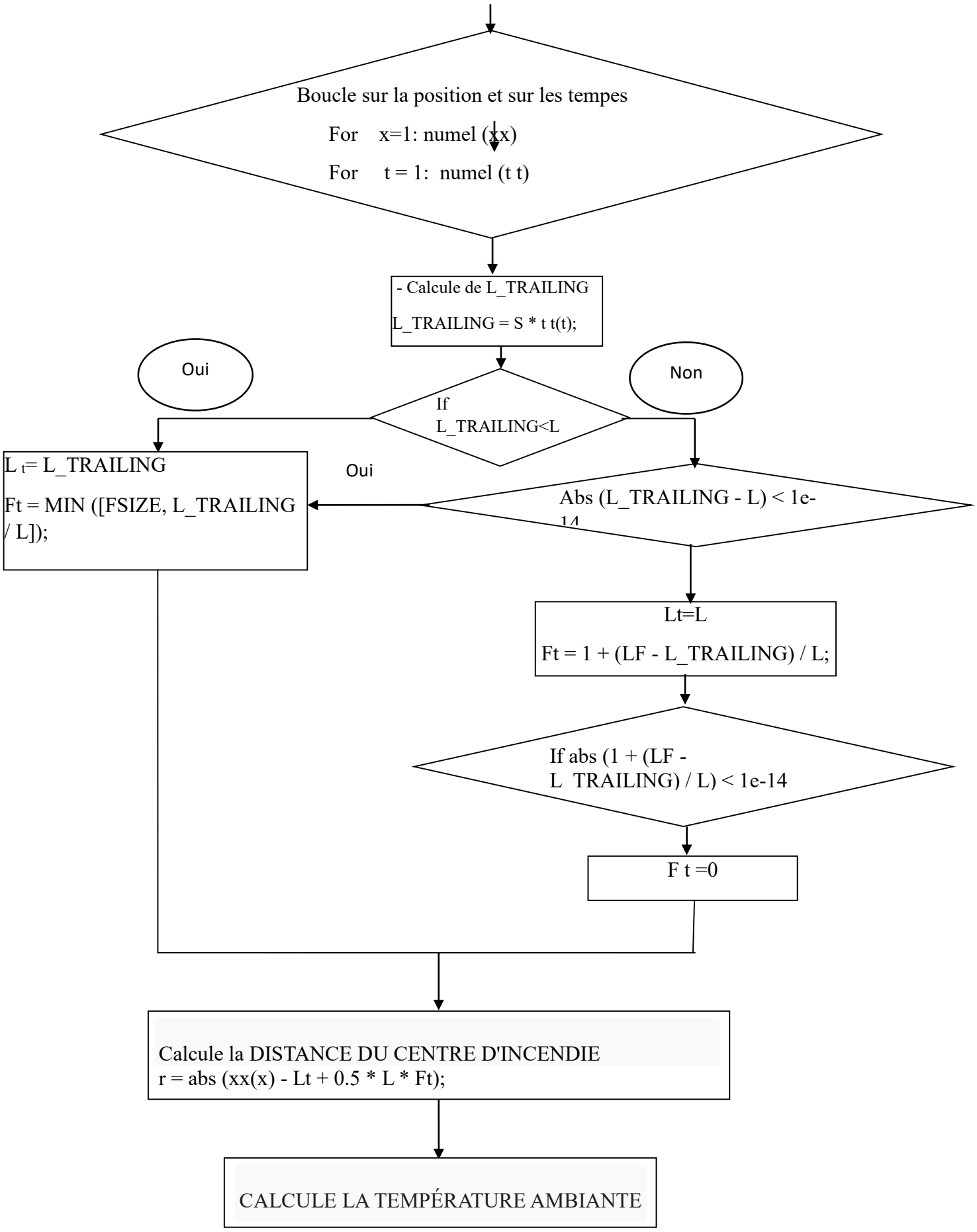
III.2.5 Affichage des résultats :

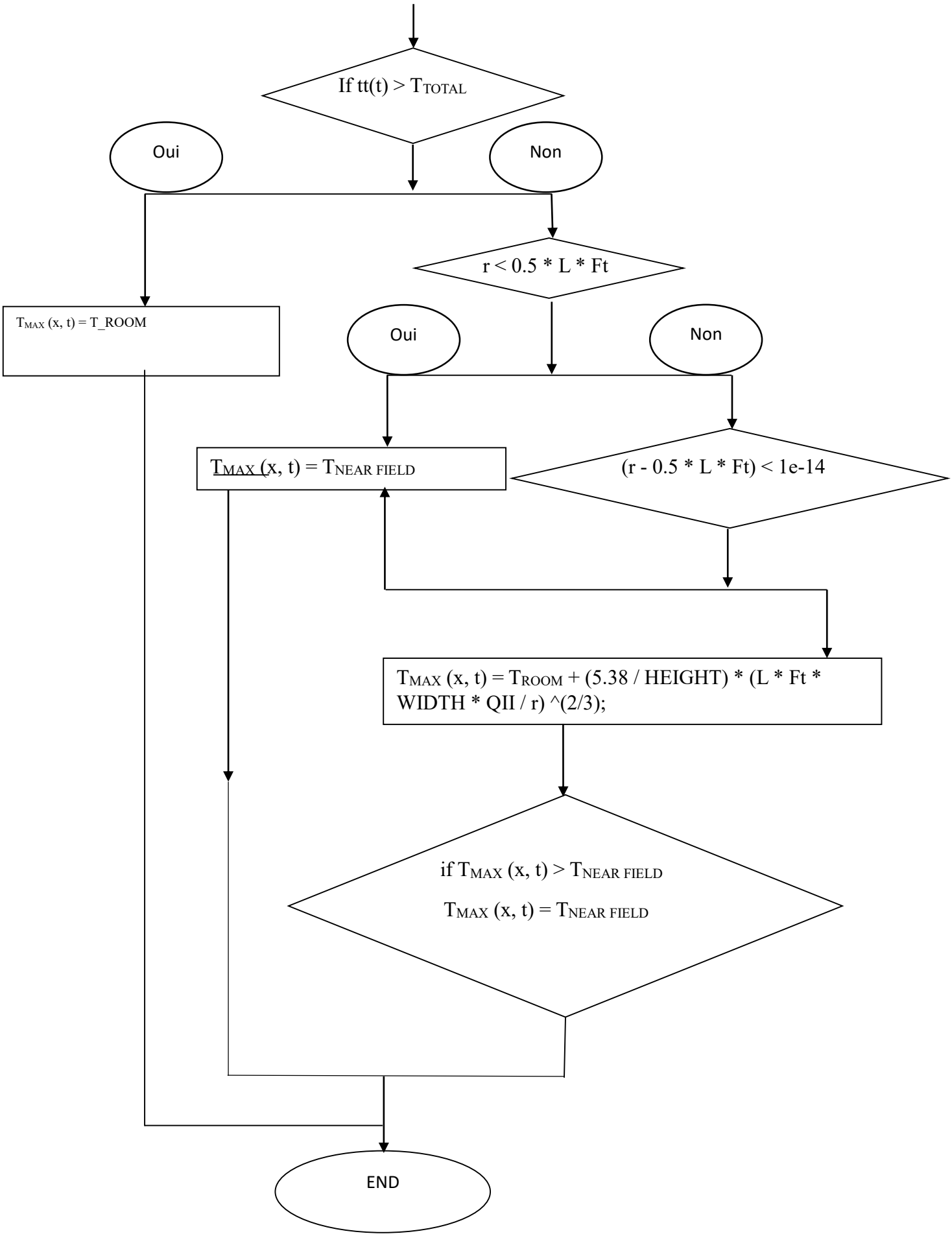
1. Deux figures sont générées (comme la figure 4.2) :

- Figure 1 : température en fonction de temps pour plusieurs positions ;
- Figure 2 : température le long du chemin du feu a différents instants.

III.3. Organigramme de programmer Matlab:




Boucle sur la position et sur les tempes
For x=1: numel (xx)
For t = 1: numel (t t)
- Calcule de L_TRAILING
L_TRAILING = S * t t(t);
Oui
Non
If
L_TRAILING<L
L t= L_TRAILING
Ft = MIN ([FSIZE, L_TRAILING / L]);
Oui
Abs (L_TRAILING - L) < 1e-14
Lt=L
Ft = 1 + (LF - L_TRAILING) / L;
If abs (1 + (LF - L TRAILING) / L) < 1e-14
F t =0
Calcule la DISTANCE DU CENTRE D'INCENDIE
r = abs (xx(x) - Lt + 0.5 * L * Ft);
CALCULE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE


If tt(t) > TTOTAL
Oui
Non
r < 0.5 * L * Ft
TMAX (x, t) = T_ROOM
Oui
Non
TMAX (x, t) = TNEAR FIELD
(r - 0.5 * L * Ft) < 1e-14
TMAX (x, t) = TROOM + (5.38 / HEIGHT) * (L * Ft * WIDTH * QII / r) ^(2/3);
if TMAX (x, t) > TNEAR FIELD
TMAX (x, t) = TNEAR FIELD
END

III.4 Conclusion :

Ce code MATLAB est un programme développé qui a été créé sur la base de plusieurs scénarios pour simuler la propagation d'un incendie dans un milieu confiné dans lequel plusieurs paramètres ont été modifiés, tels que le Paramètres de l'incendie : FSIZE, $\dot{Q}''$, QF, T_{ROOM}, T_{NF}, pour obtenir plusieurs résultats sous forme de courbes qui sont ensuite utilisées par les ingénieurs en sécurité d'incendie, et pour la construction de bâtiments et pour l'intervention rapide des pompiers en cas d'incendie

Chapitre IV Résultats et Analyse

IV.1 Introduction :

On présente dans ce chapitre les résultats obtenus par les simulations numériques à l'aide du logiciel MATLAB, Ce dernier simule un incendie itinérant (feu qui se déplace progressivement dans un compartiment) et calcule les températures maximales des gaz à différents endroits et à différents moments, en tenant compte de la géométrie de la pièce, des caractéristiques du feu.

IV.2 Modélisation de phénomène :

Afin d'étudier l'impact de l'iTFM sur les températures résultantes au sein des éléments structurels, nous l'avons appliqué aux ossatures en acier et en béton. Un plancher donné a été supposé 16 Mesurant 24 m de large, 40 m de long et 3,5 m de haut, comme pour un immeuble de bureaux classique, il a été divisé en cinq travées de 8 m de long chacune, sur toute la longueur du compartiment. [24]

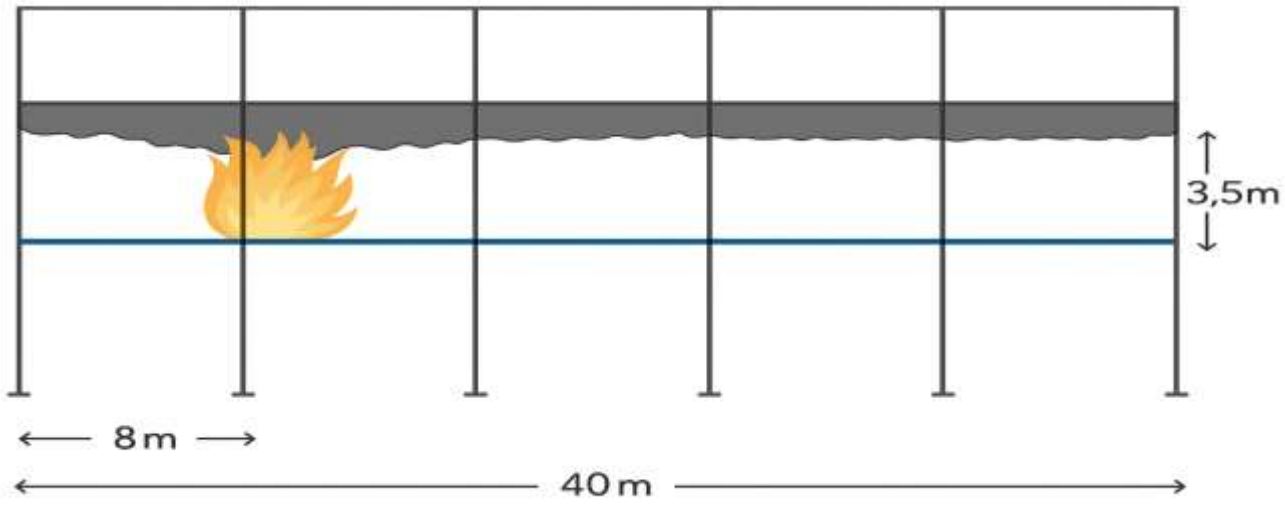


Figure 4.1 : Élévation et plan d'étage du bâtiment utilisé pour l'étude de cas.

IV.3 Résultats et Analyse :

IV.3.1 L'effet de Taux de dégagement de chaleur par unité de surface (kW/m2) $\dot{Q}$:

On prendre trois valeurs (300,500,700)

Tableau N° 4.1: Influence du Taux de Dégagement de Chaleur par Unité de Surface ($\dot{Q}$) sur les Paramètres Thermiques et Dynamiques de l'Incendie.

$\dot{Q}$ (KW/m2)	TB(S)	TTOTAL(S)	S(m/s)	LF(m)	Q (Kw)	$T_{NEAR\ FIELD}$ (c°)
300	1900	20900	0.0021	4	21600	1121.1
500	1140	12540	0.0035	4	36000	1168.8
700	814.2857	8957.1	0.0049	4	50400	1199.9

IV.3.1.1 Cartes de température en fonction du temps et de la position :

- Si $\dot{Q}$=300(kW/m2) :

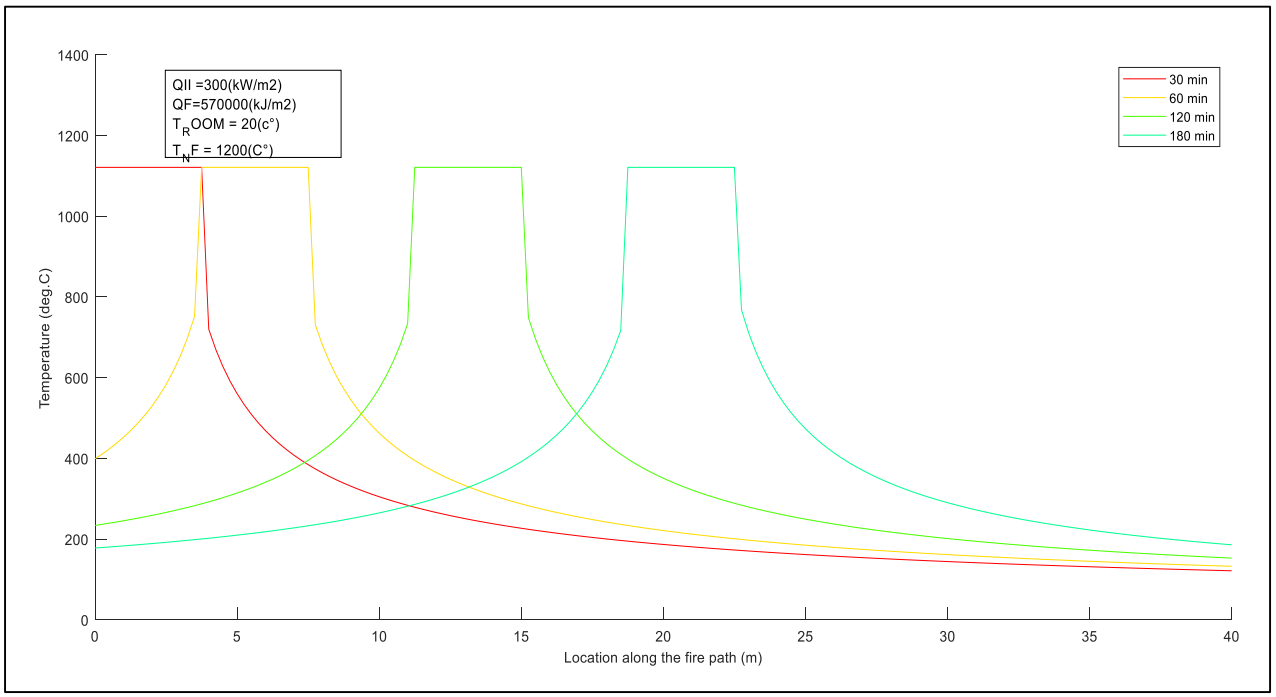


Figure 4.2 : Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$=300(kW/m2)).

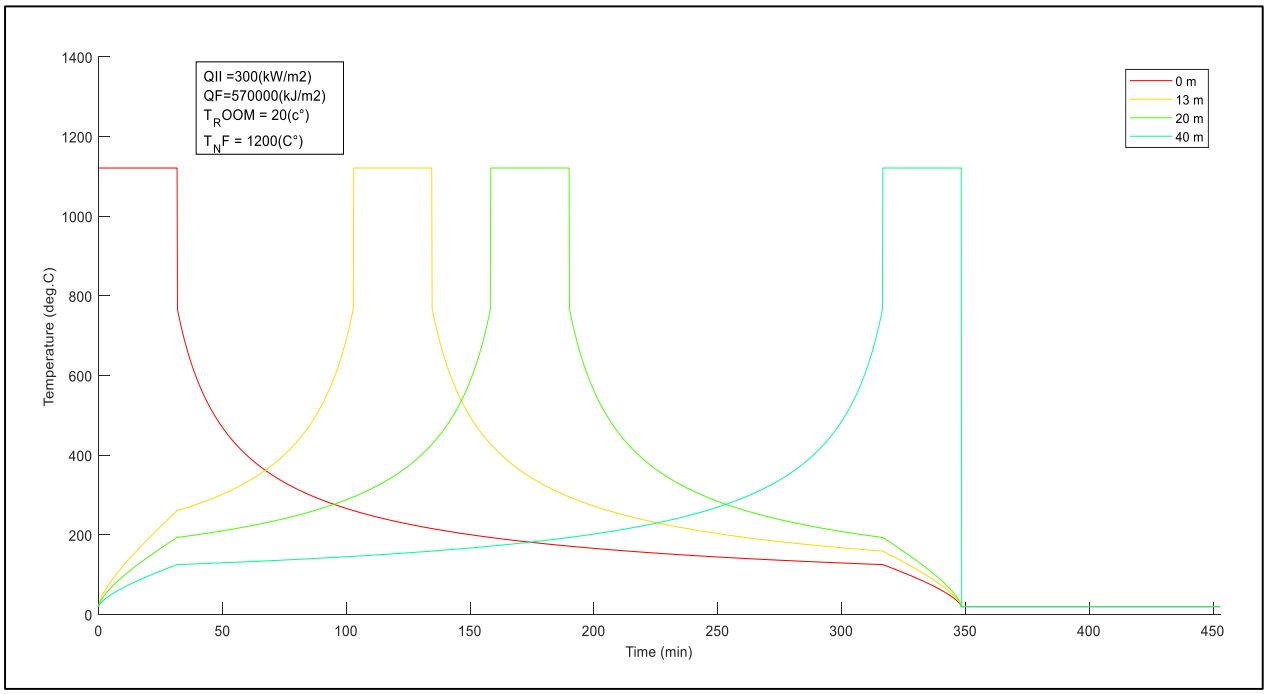


Figure 4.3 : Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =300(kW/m2)).

❖ Si QII= 500 (kW/m2) :

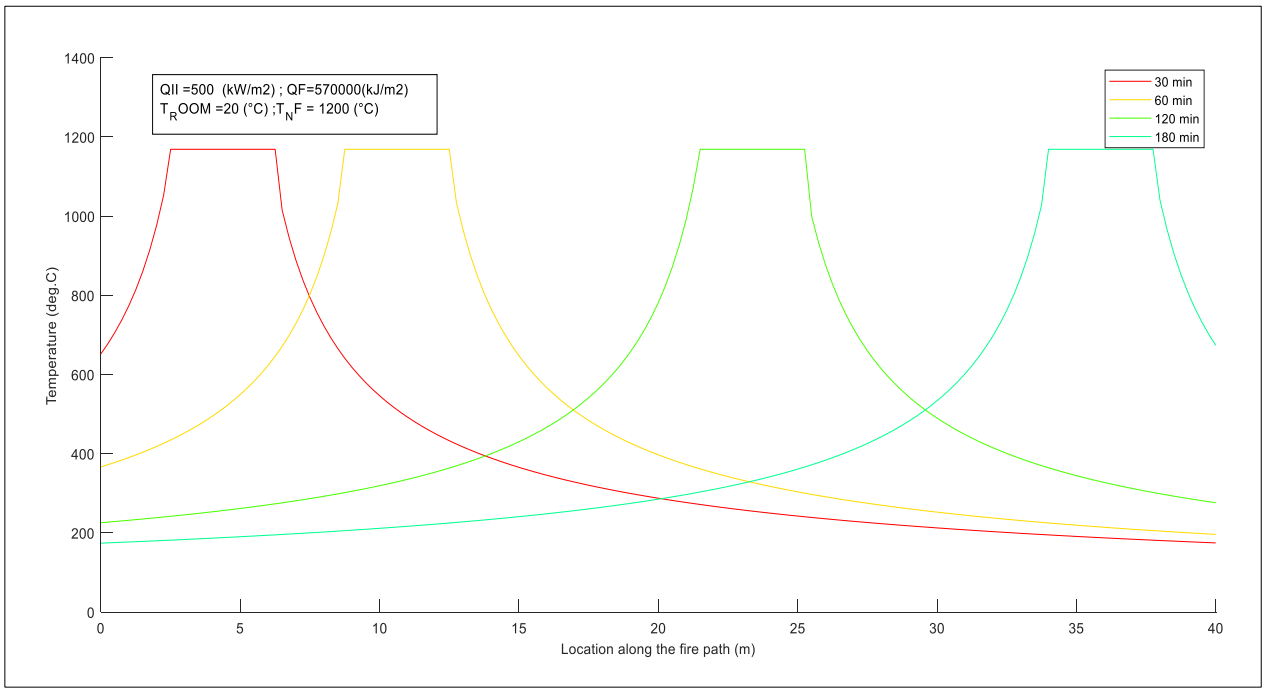


Figure 4.4 : Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =500 (kW/m2)).

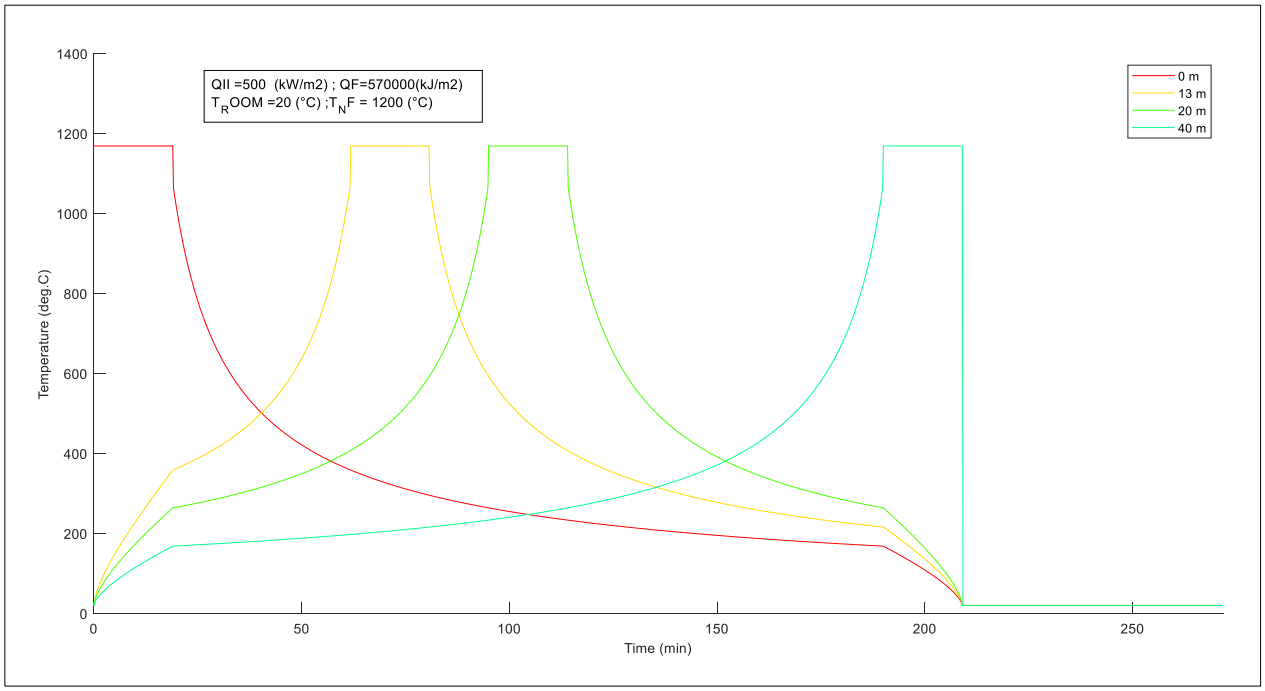


Figure 4.5: Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =500 (kW/m2)).

❖ Si $\dot{Q}$ = 700 (kW/m2) :

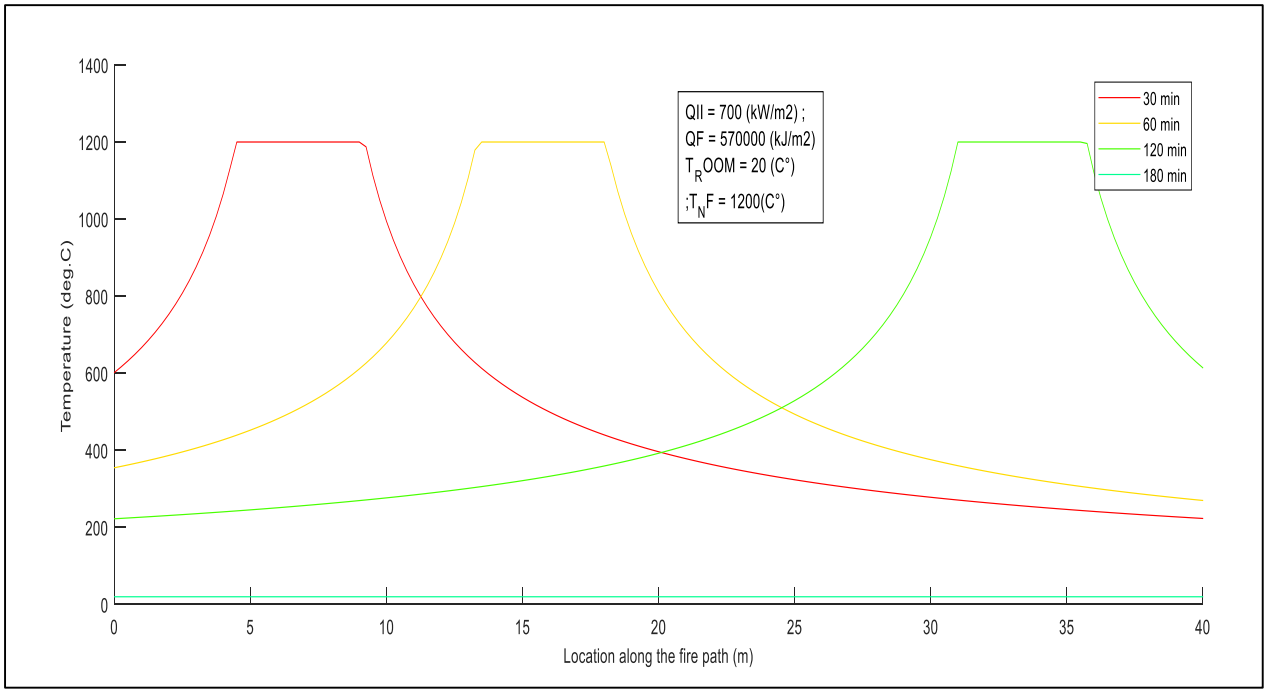


Figure 4.6 : Variation de température du gaz température le long du chemin du feu a différents instants pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =700 (kW/m2)).

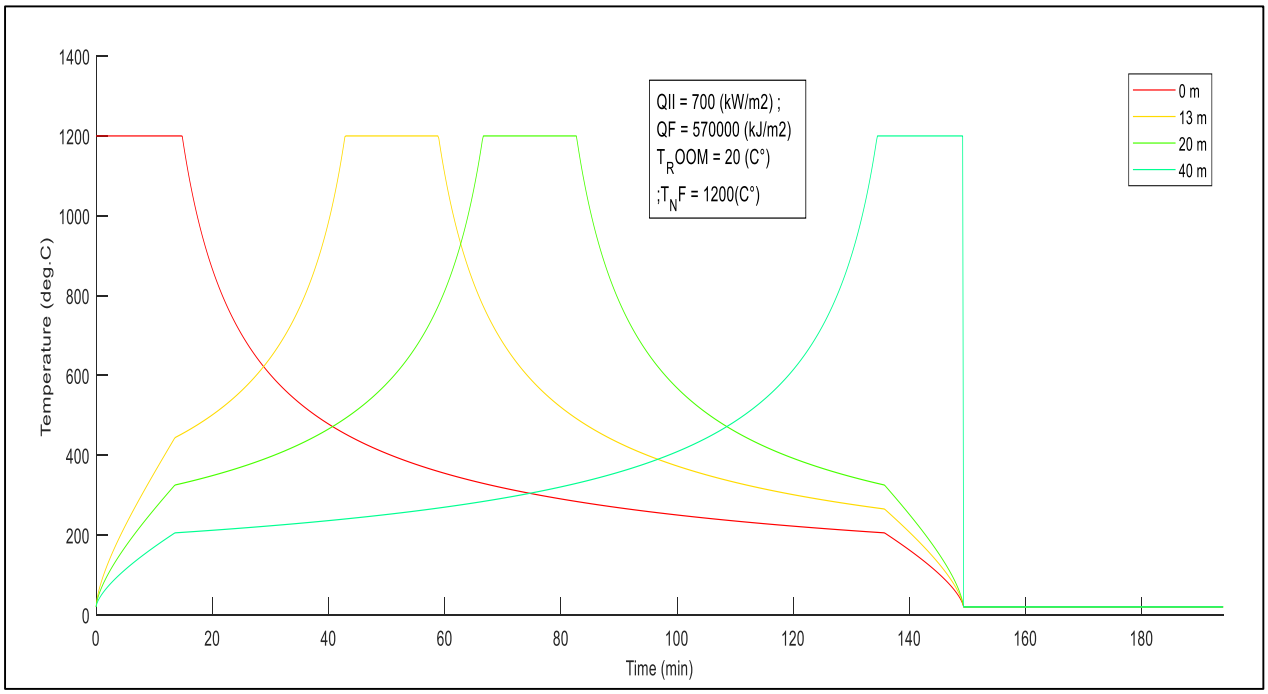


Figure 4.7: Variation de température du gaz en fonction de temps pour plusieurs positions pour une Valeur de taux de dégagement ($\dot{Q}$ =700 (kW/m2)).

IV.3.1.2 Discutions :

D'après le tableau n°1 et les figures (4.2, 4.3, 4.4) nous observent :

La durée de l'incendie diminue progressivement, passant de 20 900 (S) à 12 540 (S) puis à 8 957.1 (S), en parallèle avec l'augmentation du Taux de Dégagement de Chaleur par Unité de Surface, qui évolue de 300 à 500 puis à 700 (kW/m2). Cela illustre clairement l'impact significatif de la vitesse de propagation sur la réduction du temps de combustion. Parallèlement, la vitesse de propagation de l'incendie augmente de manière significative avec le Taux de Dégagement de Chaleur, indiquant une relation directement proportionnelle entre les deux. Cela signifie que plus le feu se propage rapidement, plus il devient difficile à maîtriser, nécessitant une intervention rapide et des mesures de contrôle efficaces."

Des températures locales plus élèves dans le champe poche par apport les températures du champ lointain, ces températures des gaz (c'est-à-dire du champ proche) varient généralement en continu entre les températures observées de 800 et 1200◦C [17,34,35]. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus et montrés dans les courbes précédentes. Dans nous cas la température augmente de 1121,1 C° à 1199.9 C°, avec l'augmentation du $\dot{Q}$.

IV.3.2 L'effet de la densité de charge de combustible QF :

On prendre les trois cas suivants :

1-èr cas → QF =420000 (kJ/m2)

2 -ème cas → QF=570000 (kJ/m2)

3 -ème cas → QF=720000 (kJ/m2)

Nous avons enregistré les résultats obtenus dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°4.2 : Paramètres de transfert thermique et de flux pour différentes charges de combustibles (QF)

QF (kJ/m2)	TB(S)	TTOTAL(S)	S(m/s)	LF(m)	Q (KW)	T_NEAR_FIELD (c°)
420000	840	9240	0.0048	4	36000	1168.8
570000	1140	12540	0.0035	4	36000	1168.8
720000	1440	15840	0.0028	4	36000	1168.8

IV.3.2.1 Cartes de température en fonction du temps et de la position :

1-èr cas : QF =420000 (kJ/m2)

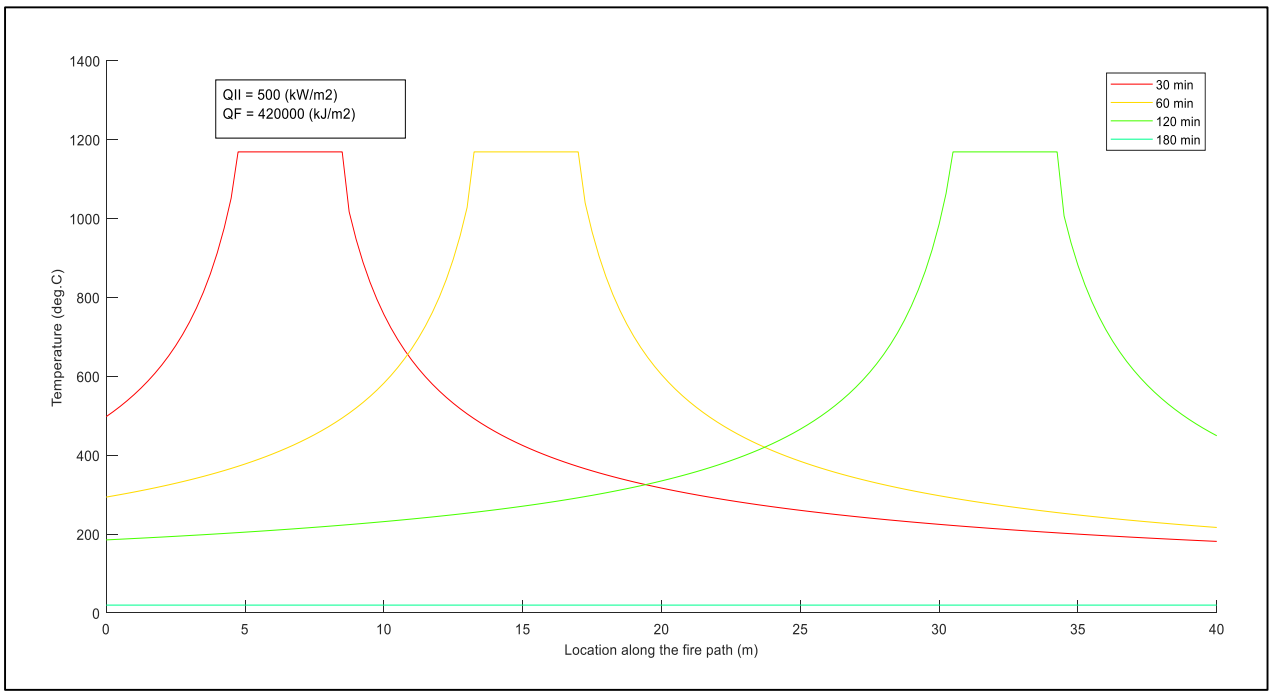


Figure 4.8: Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants pour une valeur de densité de charge de combustible (QF =420000 (kJ/m2))

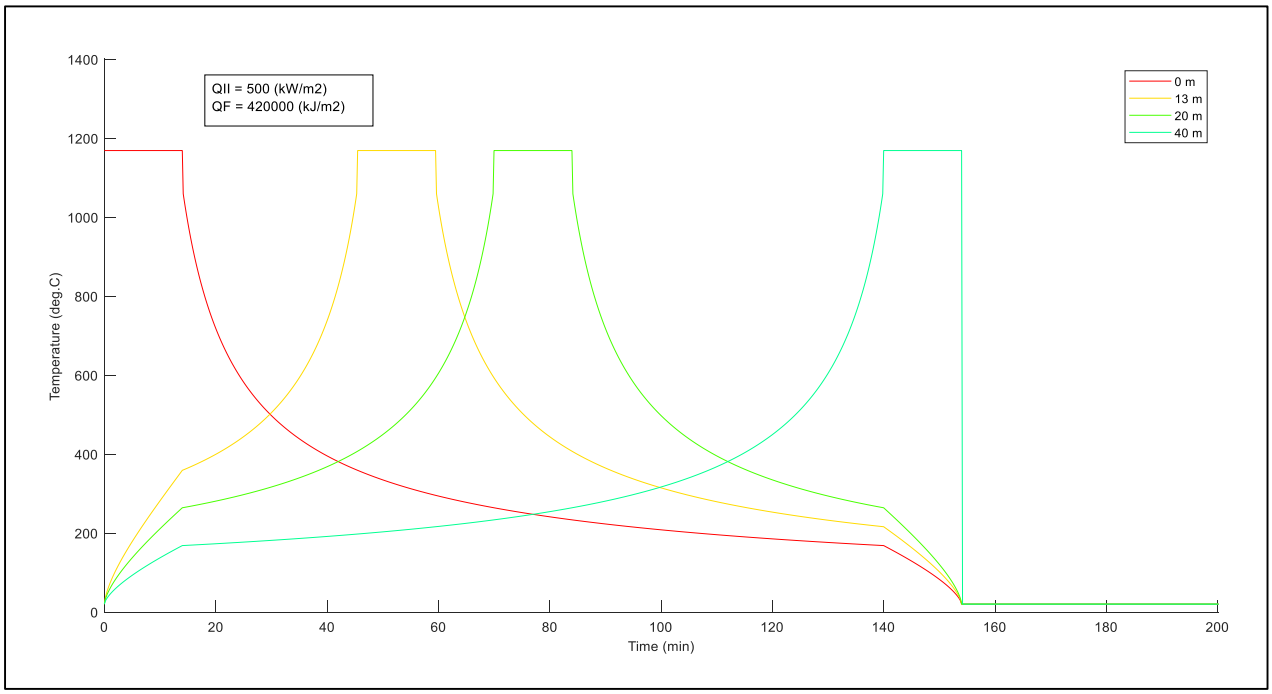


Figure 4.9 : Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à une valeur de densité de charge de combustible. (QF =420000 (kJ/m2))

3 -ème cas : QF=720000 (kJ/m2)

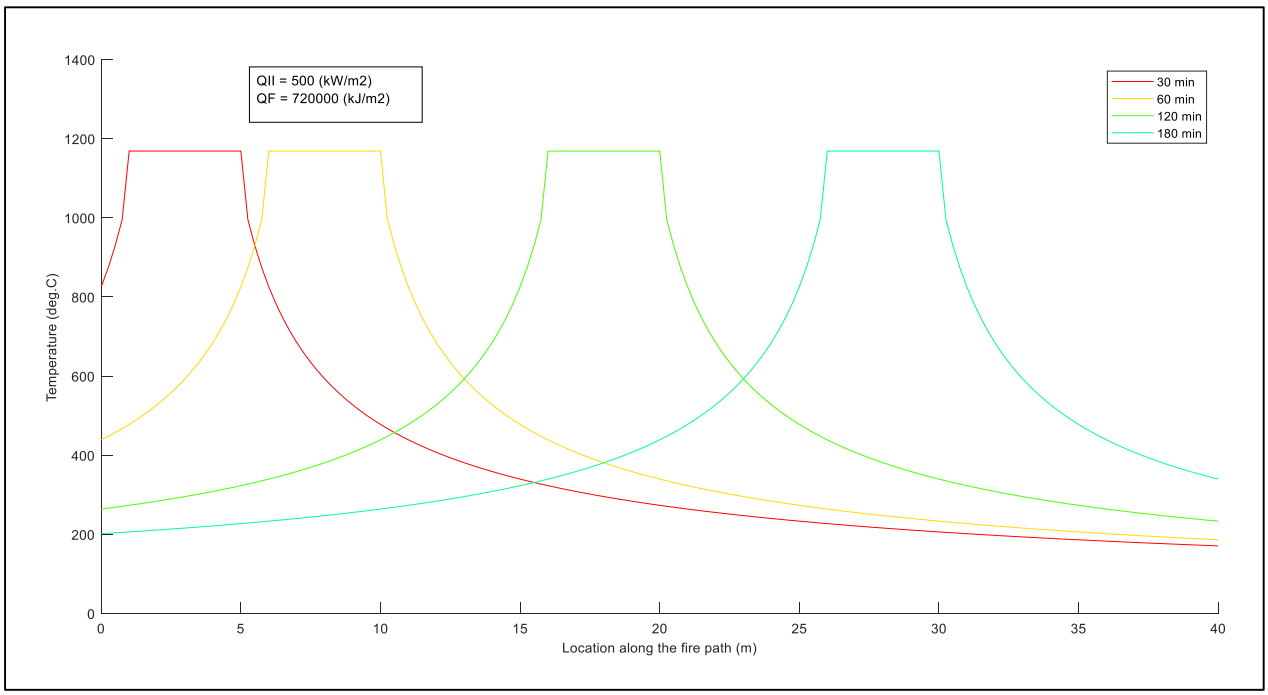


Figure 4.10: Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants pour une valeur de densité de charge de combustible (QF =720000 (kJ/m2))

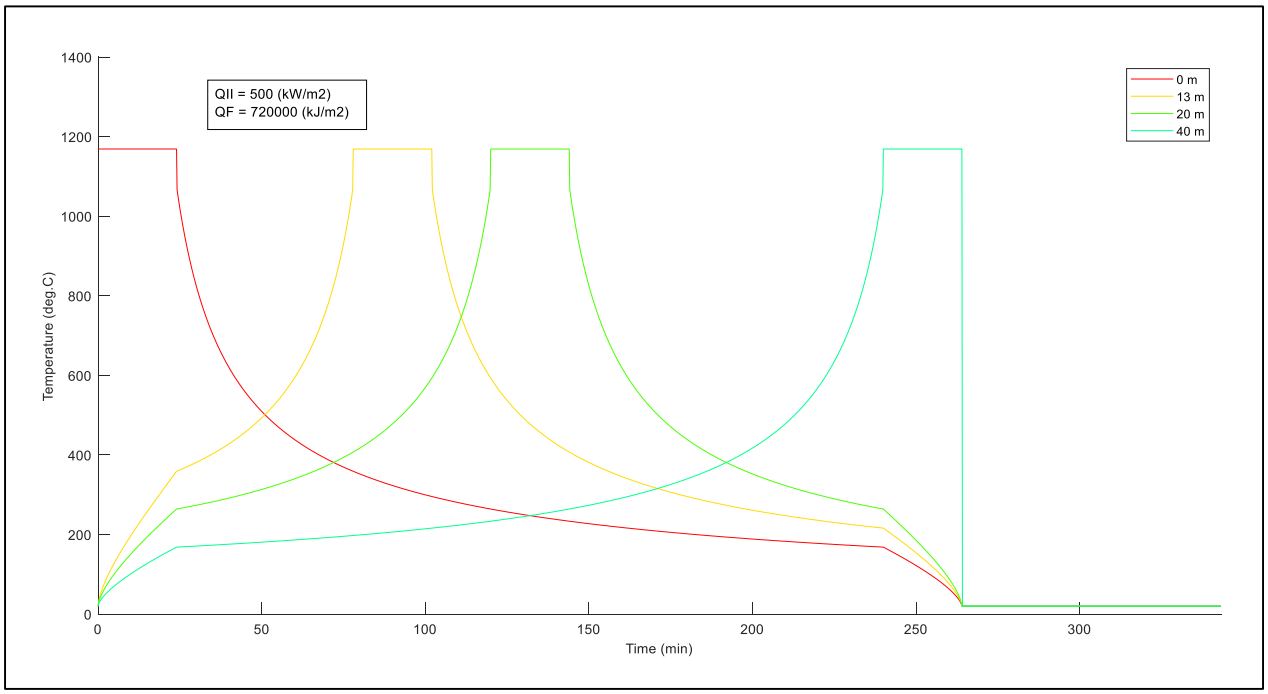


Figure 4.11 : Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à une valeur de densité de charge de combustible (QF =720000 (kJ/m2))

IV.3.2.2 Discutions :

Le taux de dégagement total 'Q ', et les températures du champ proche. Ces deux paramètres ne sont pas affectés par les changements de la densité de charge de combustible (indépendamment de QF). Alors que' TB' et 'T_{TOTAL}', augmenter. Cela peut indiquer que le système met plus de temps à réagir ou à atteindre un état stable sous flux plus élevé.

L'augmentation de la densité de chaleur ne signifie pas nécessairement une accélération du processus ou une augmentation de la vitesse de propagation du feu. Cela peut plutôt indiquer une plus grande résistance thermique. (C'est ce que les résultats de cette simulation ont montré, donc il existe une relation inverse entre QF et S).

L'augmentation de la densité de chaleur signifie entraîne :

- Une élévation des températures maximales au centre de l'incendie
- Un élargissement des zones où la température reste élevé le long du parcours de feu avec un ralentissement de la diminution de la température avec le temps et la distance. [Voire les figures 4.3,4.5,4.6]. Contrairement l'augmentation de Taux de dégagement de chaleur `$\dot{Q}$`, ce qui mène de l'accélération de la diminution de la température [voir les figures 4.2, 4.3, 4.4]

IV.3.3 L'effet de la température de room T_{ROOM}(°C) :

Afin d'étudier l'effet de la température de la chambre (ambiant) sur l'incendie et ses paramètres, nous avons modifié sa valeur trois fois et. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau N°4.3 : Influence de la température ambiante sur les paramètres de combustion et la température de champ proche.

T_ROOM(°C)	TB(S)	TTOTAL(S)	S(m/s)	LF(m)	Q (KW)	T NEAR FIELD (c°)
10	1140	12540	0.0035	4	36000	1167.2
20	1140	12540	0.0035	4	36000	1168.8
40	1140	12540	0.0035	4	36000	1172.1

IV.3.3.1 Cartes de température en fonction du temps et de la position :

Si : $T_{CHAMBRE}$=10 (°C).

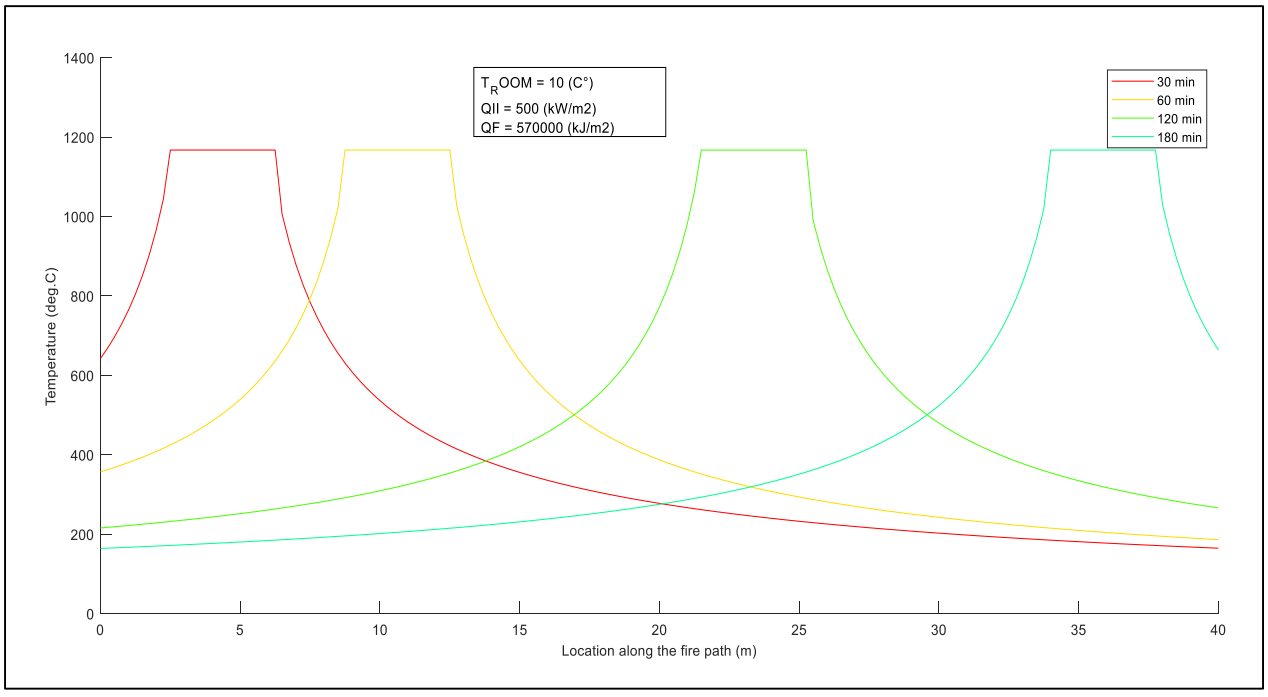


Figure 4.12: Variation de température du gaz température en fonction de la position a différents instants à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=10 (°C).

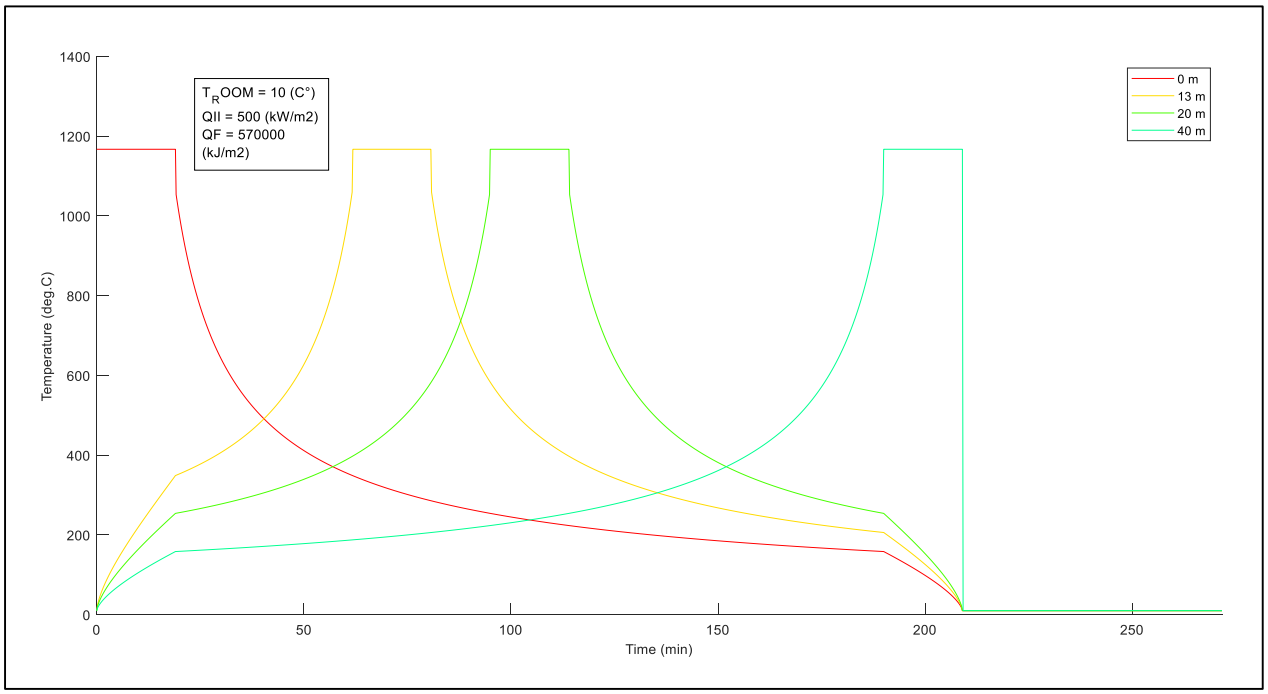


Figure 4.13: Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=10 (°C).

Si : $T_{CHAMBRE}$=40 (°C)

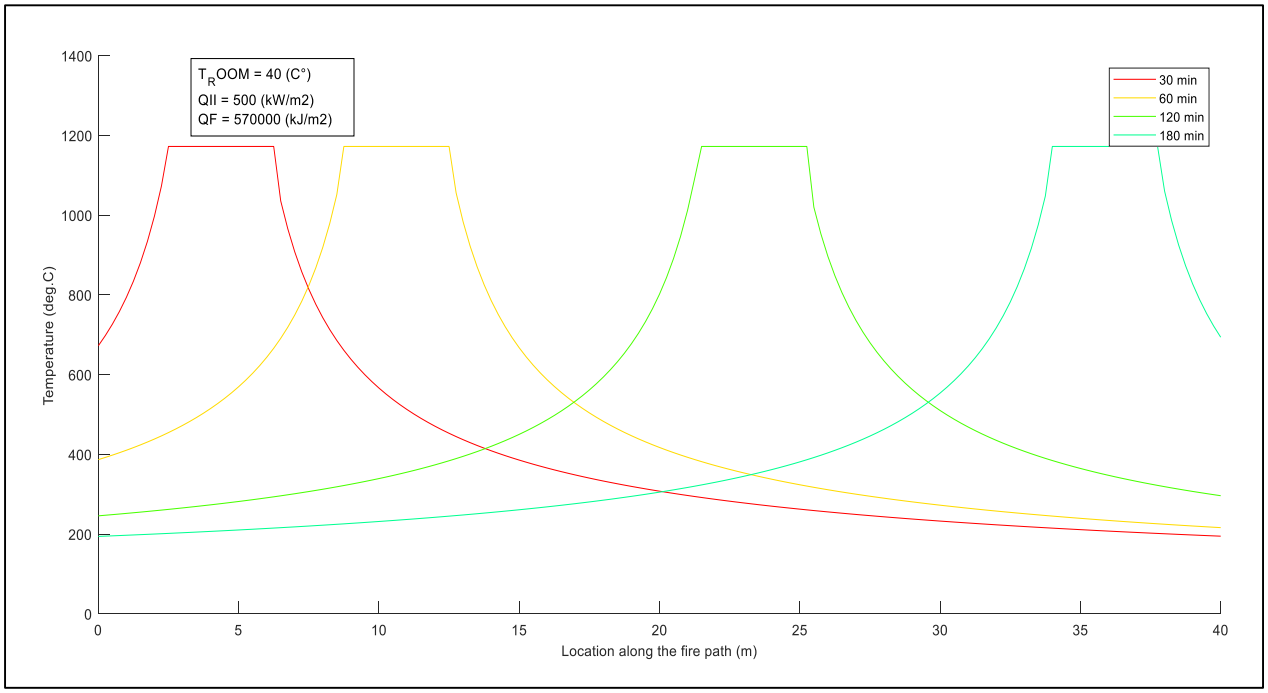


Figure 4.14: Variation de température du gaz température en fonction de la position à différents instants à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=40 (°C).

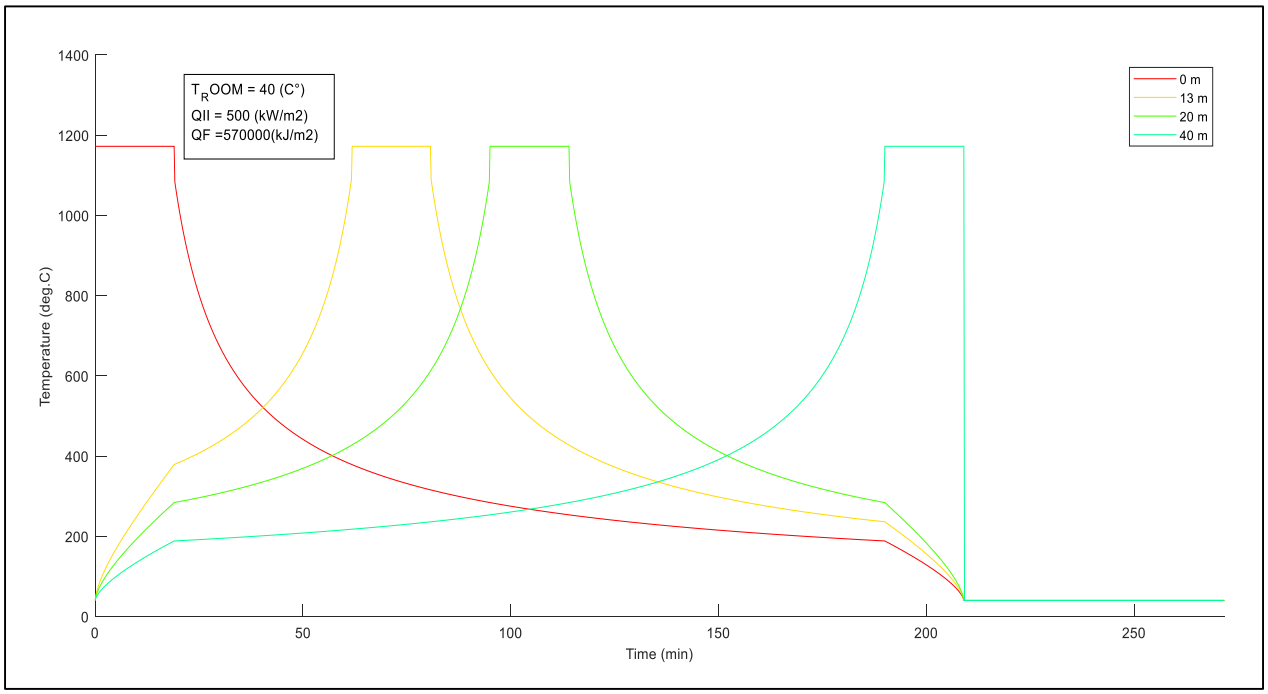


Figure 4.15: Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions à température ambiant constant $T_{CHAMBRE}$=40 (°C).

IV.3.3.2 Discutions :

Toutes les valeurs de (TB, Q, S, T_{TOTAL}, LF,) sont restées inchangées à travers les trois essais (c'est à dire ces paramètres indépendamment de T_{ROOM}). On observe une augmentation progressive de la valeur de $T_{NEAR\ FIELD}$, cette légère et progressive hausse la température du champ proche avec l'augmentation de T_{ROOM}. (Si les températures ambiantes égal 10,20,40, alors $T_{TNEAR\ FIELD}$ égal 1167.2, 1168.8,1172.1 respectivement). Indique que la température ambiante influence directement l'environnement thermique proche de feu. Cet effet doit être pris en compte lorsque l'évaluation des risques d'incendie dans des environnements à températures élevées, car les gaz atteignent des températures dangereuses plus rapidement, ce qui rend le feu plus susceptible de se propager et plus difficile à contrôler.

IV.3.4 L'effet de la hauteur de la chambre :

Tableau N°4.4 : Influence de la hauteur de la chambre sur les paramètres de combustion et la température de champ proche

Hauteur (m)	TB(S)	TTOTAL(S)	S(m/s)	LF(m)	Q (KW)	T_NEAR_FIELD (c°)
3.5	1140	12540	0.0035	4	36000	1168.8
7	1140	12540	0.0035	4	36000	997.6
10	1140	12540	0.0035	4	36000	886.2

IV.3.4.1 Cartes de température en fonction du temps et de la position :

Si la hauteur (H=7 m) :

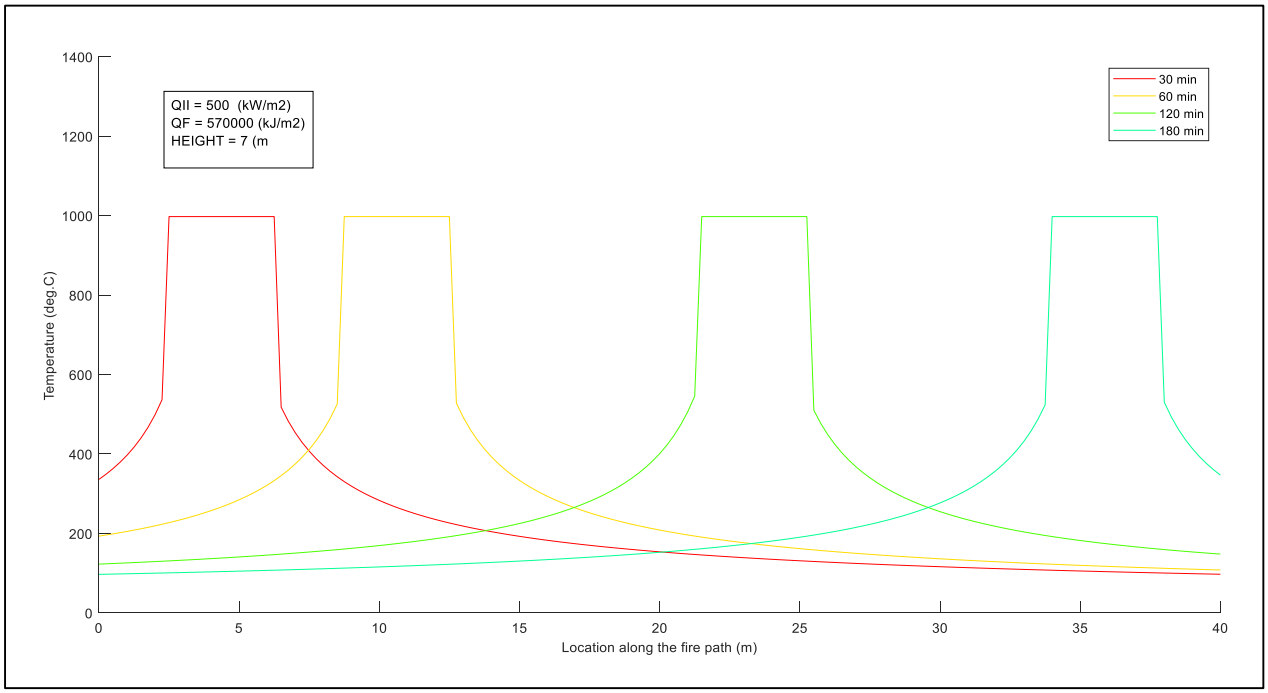


Figure 4.16: Variation de température du gaz en fonction de la position à différents instants pour un hauteur (H=7 m)

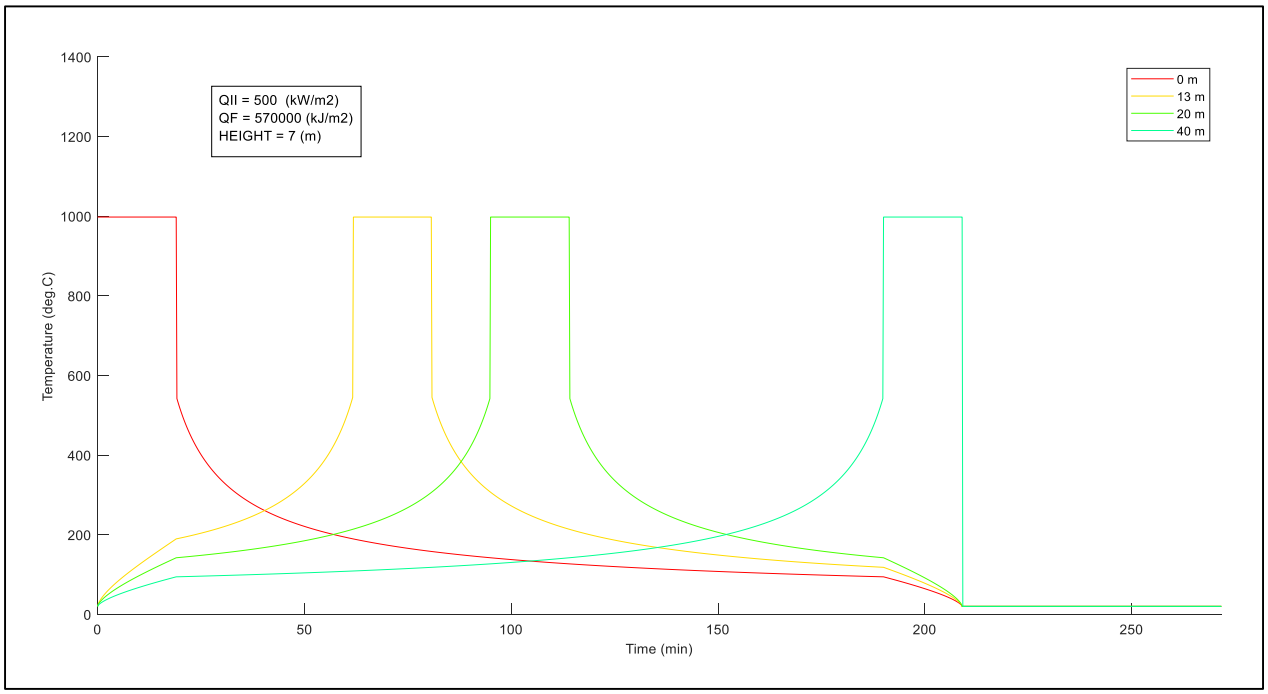


Figure 4.17: Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions pour un hauteur (H=7 m)

Si la hauteur (H=10m) :

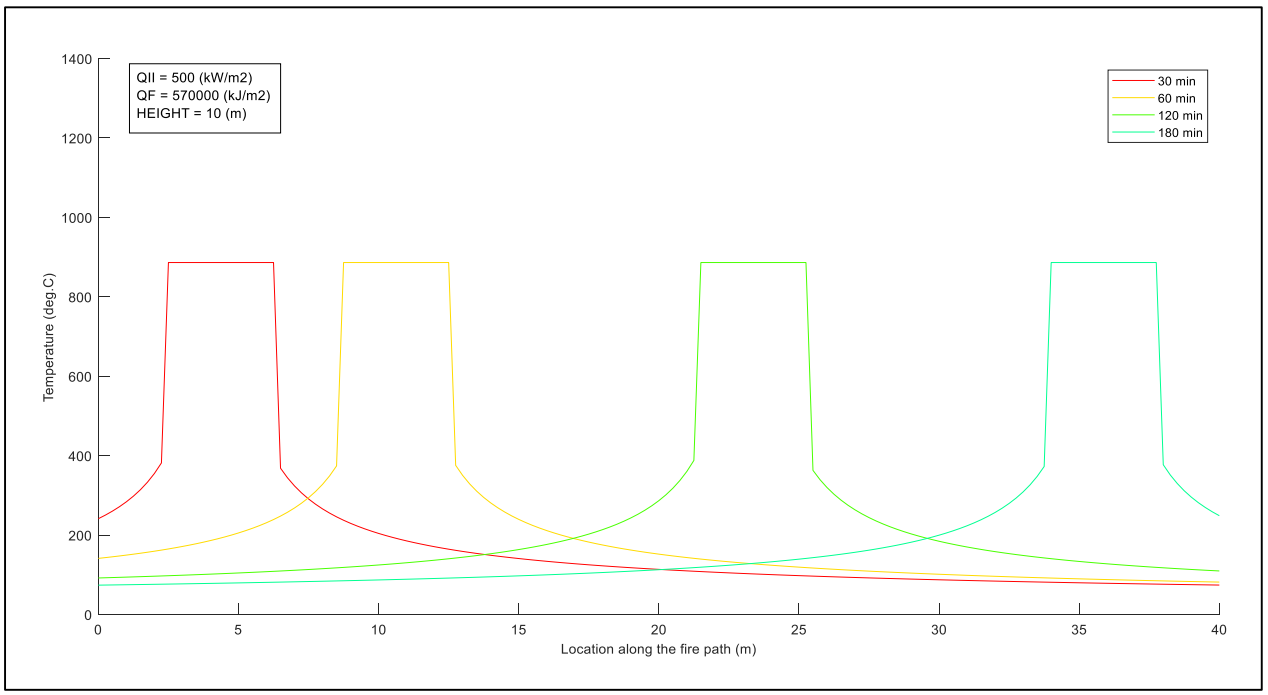


Figure 4.18: Variation de température du gaz en fonction de la position à différents instants une hauteur(H=10m)

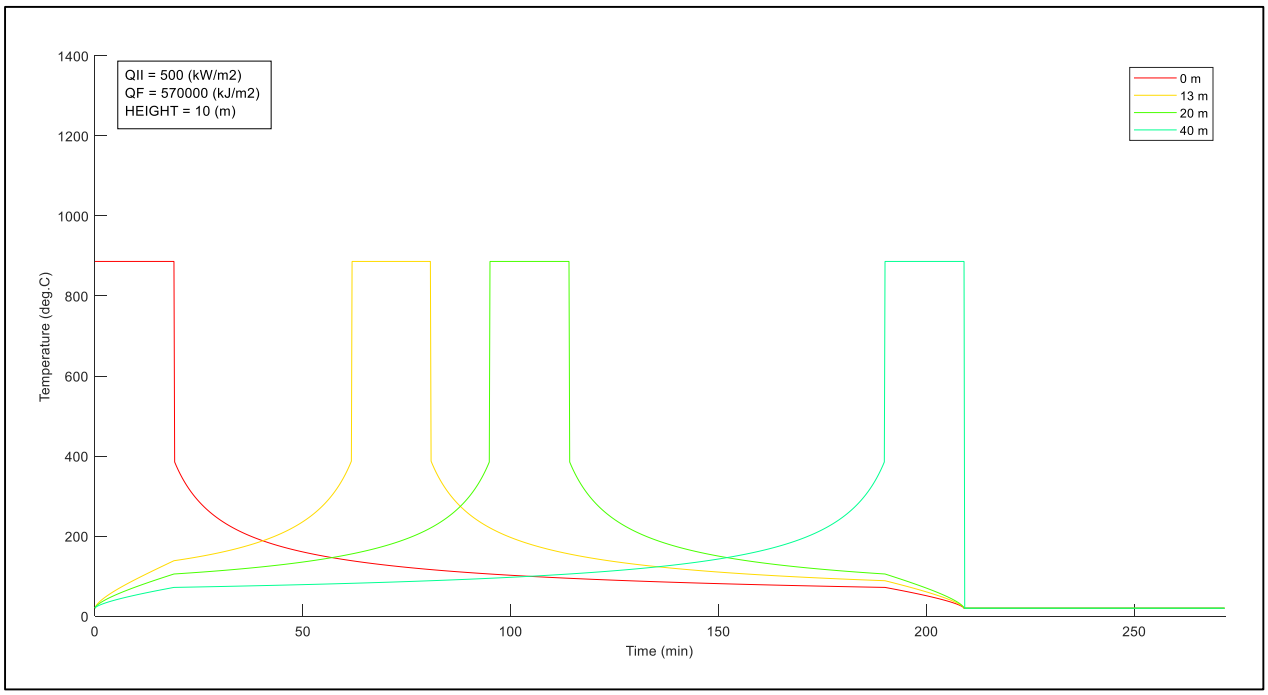


Figure 4.19 : Variation de température du gaz en fonction du temps pour plusieurs positions pour un hauteur(H=10m)

IV.3.4.2 Discutions :

D'après l'analyse des courbes [Figure (4.3,4.9,4.10)]et le tableau n° (4.4), il s'avère que la hauteur de la chambre affecte considérablement la façon dont les températures sont réparties à l'intérieur :

- L'augmentation de la hauteur de la chambre entraine une diminution de la température de champ proche ($T_{NEAR\ FIELD}$) :

$$H= 3.5 \longrightarrow T_{NEAR\ FIELD}=1168.8\ C°$$

$$H= 7 \longrightarrow T_{NEAR\ FIELD}= 997.6\ C°$$

$$H=10 \longrightarrow T_{NEAR\ FIELD}= 886.2C°$$

- À basse hauteur (3.5 m), les pentes après les températures maximales semblent plus raides [figure 4.3], tandis qu'à le grande hauteur (10 m) les courbes de refroidissement sont plus progressives et plus lentes [figure 4.10]
- Plus l'incendie dure plus la chaleur se propage. Cependant, dans une chambre haute cette chaleur est mieux répartie atténuant son impact à des points de mesure spécifiques.

Plus la hauteur sous plafond d'un compartiment est importante, plus la température mesurée en un point donné diminue, grâce à une meilleure dispersion et stratification de la chaleur. À l'inverse, dans une pièce basse, la chaleur se concentre davantage, ce qui entraîne une élévation des températures locales et augmente les risques d'incendies.

REMARQUE : Dans ces expériences, nous avons fixé la longueur de feu à 4 mètres.

IV.4 Plage valide de tailles d'incendie :

Les tailles limites des incendies pour l'étude de cas ont été calculées en fonction des taux de propagation du feu (**la méthode supposée par. Egle Rackauskaite**). Les valeurs obtenues sont présentées dans les tableaux (4.5,4.6)

Si le taux de dégagement de chaleur par unité de mase varié :

Tableau4.5 : récapitulatif des longueurs de feu selon le taux de dégagement de chaleur

$\dot{Q}$ (kW/m²)	TB (s)	Taux d'étalement *(mm/s)*	$L_{f,\ min}$ (m) (% de Lf total)	$L_{f,max}$ (m) (% de Lf total)
100	5700	0,1 - 19,3	0.75 m (1.4%)	110.01 m
300	1900	0,1 - 19,3	0,19 m (0,5%)	36,67 m (91,6%)
500	1140	0,1 - 19,3	0,11 m (0,3%)	22,00 m (55%)
700	814,28	0,1 - 19,3	0,08 m (0,2%)	15,71m (39,27%)
900	633.33	0,1 - 19,3	0,06 m (0.15%)	12 m (30%)

On observe qu'avec l'augmentation de Taux de dégagement de chaleur par unité de surface $\dot{Q}$, la longueur maximale LF de la flamme diminue de manière significative (**voir la figure 4.11**), accompagnée d'une réduction notable du temps de combustion **TB**.

Ce comportement indique bien que les incendies à densité plus élevée se développent plus rapidement. La consommation du combustible disponible plus rapide limite cependant leur distance.

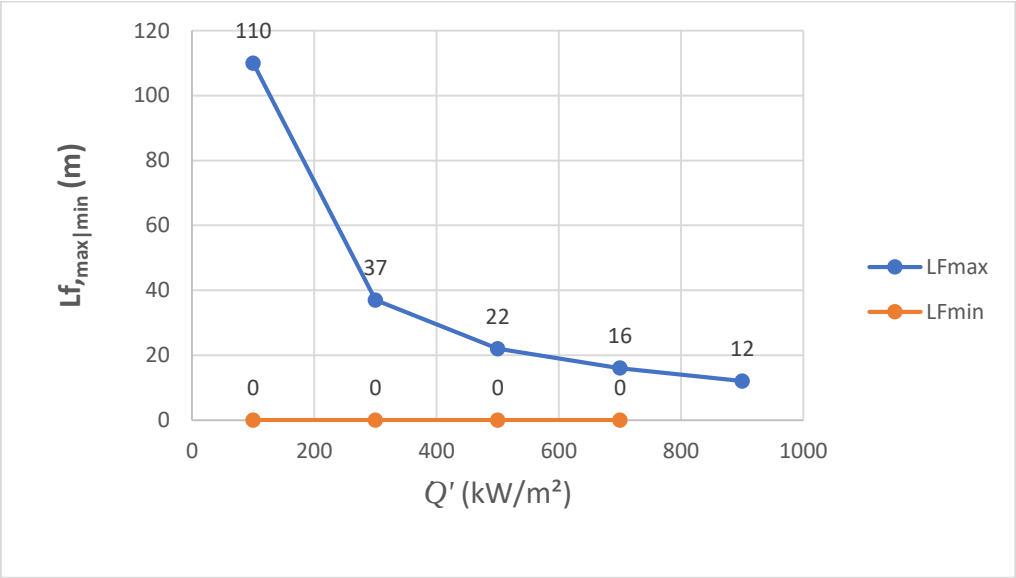


Figure 4.20: l'évolution de la longueur minimale et maximale du feu en fonction de Taux de dégagement de chaleur par unité de surface ($\dot{Q}$).

Si la densité de charge de combustible varie :

Tableau4.6 : récapitulatif des longueurs de feu selon la densité de combustible (QF)

QF (kJ/m^2)	**TB (s)**	**Taux d'étalement *(mm/s)***	**Lf,min (m) (% de Lf total)**	**Lf,max (m) (% de Lf total)**
100000	200	0,1 - 19,3	0.02 m (0.05%)	4 m (10%)
250000	500	0,1 - 19,3	0.05 m (0.12%)	9.65 m (24.12%)
420000	840	0,1 - 19,3	0.08m (0,2%)	16,21m (40.53%)
570000	1140	0,1 - 19,3	0,11 m (0,3%)	22 m (55%)
720000	1440	0,1 - 19,3	0.14m (0,4%)	27.79 m (69.47%)

Comme mentionné précédemment, une augmentation de la densité du combustible QF contribue à prolonger la durée de la combustion **TB**, accompagnée d'un développement notable de Longueur maximale du feu, aussi un développement léger de Longueur minimale du feu, cependant il peut considérer comme relativement stable.

Voici les deux figures :

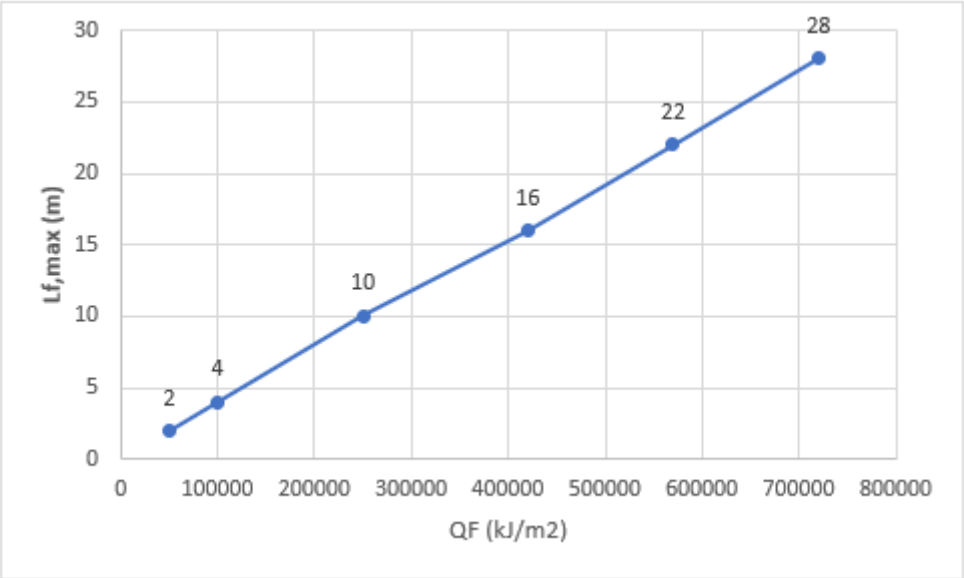


Figure 4.21 : La relation entre la densité de combustible (QF) et la longueur maximale atteinte.

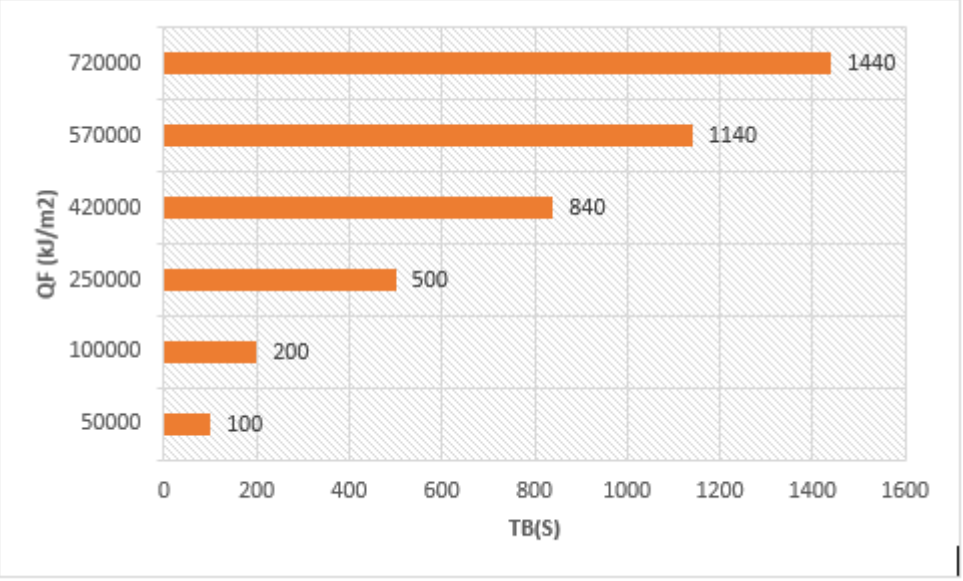


Figure 4.22: La relation entre la densité de combustible (QF) et le temps de combustion local TB.

D'après la figure **(4.14)** et le tableau **(4.5),** on constate que de faibles des taux de dégagement de chaleur conduisent à de grands incendies. Par exemple, pour des taux de dégagement de 300,500,900 **(kW/m²)** , les longueurs de la flamme atteint 36.67,22,12 m respectivement, et ce, malgré une densité de combustible constante égal 570000 (kJ/m2). Cela s'explique par une durée de combustion plus longue.

En revanche, lorsque la densité du combustible est faible, les incendies sont de plus petite taille. Tel que :

- Si QF= 250000 (kJ/m^2) alors Lf_{max}= 9.65 (m)
- Si QF= 420000 (kJ/m^2) alors Lf_{max}=16.21 (m)

pendant un taux de dégagement

- Si QF= 570000 (kJ/m^2) alors Lf_{max}=22 (m)
- Si QF= 720000 (kJ/m^2) alors Lf_{max}=27.79 (m)

$\dot{Q}$ =500(kW/m²)

Comme on peut le constater dans les deux cas, que ce soit en modifiant le taux de dégagement de la chaleur ou la densité du combustible, la taille de l'incendie est proportionnelle à sa longueur, comme indiqué dans les tableaux **4.5** et **4.6**. Cela est tout à fait attendu étant donné la relation mathématique qui les lie et qui montré dans l'équation n° (2.60).

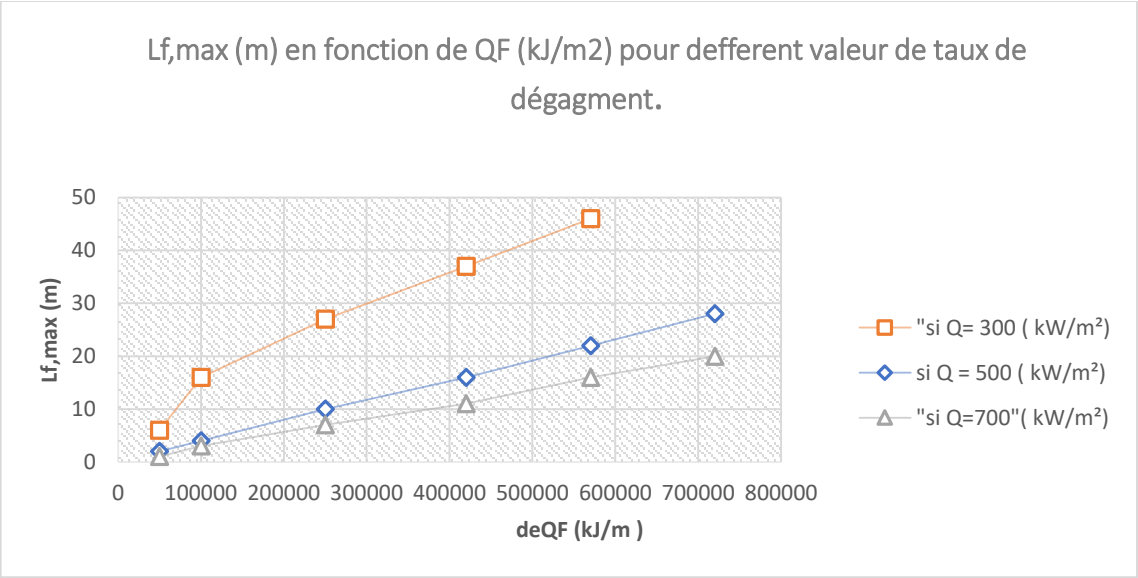


Figure 4.23 Langueur maximal de feu pour différents taux de dégagement de chaleur et densités de charge de combustible.

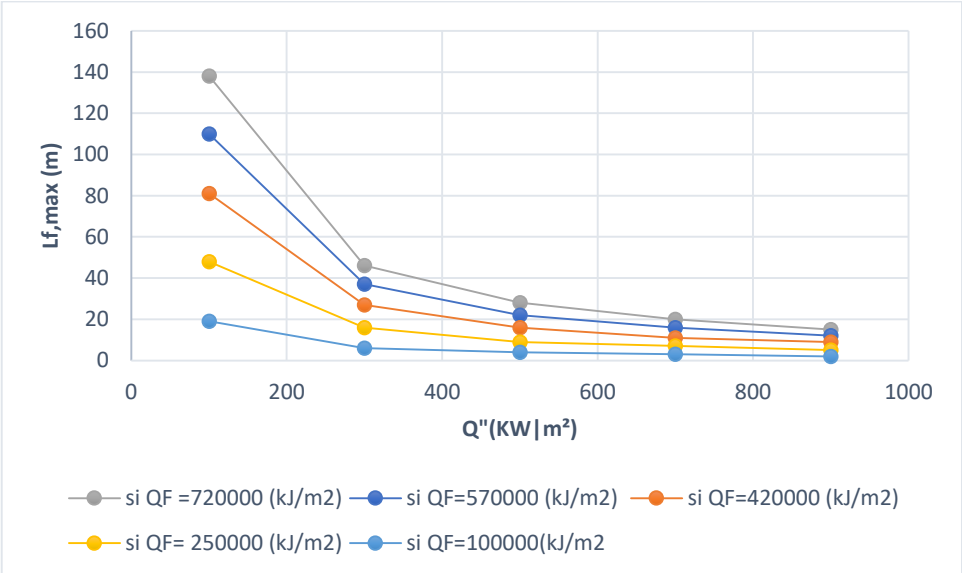


Figure 4.24: La variation de la longueur maximale de feu pour différents taux de dégagement de chaleur et densités de charge de combustible

L'image (**Figure 4.15**) illustre les variations de la longueur maximale de l'incendie en fonction de différents taux de dégagement de chaleur et pour des valeurs variables de la densité du combustible. À l'instar des valeurs de la densité du combustible utilisées par Ègle Rackauskaite [72000,570000,420000 (kJ/m^2)], nous avons ajouté deux nouvelles valeurs {250000 (kJ/m^2),100000(kJ/m^2)}et observé les changements qui en résultent. Nous avons ainsi obtenu les mêmes résultats que ceux présentés par Rackauskaite dans son travail exposé dans la thèse [24]. Ces résultats se résument comme suit :

- Une augmentation de la densité du combustible entraîne une augmentation de la longueur maximale de l'incendie (par exemple, pour une densité de 72000 (kJ/m^2), la longueur maximale du feu est de 110m, tandis qu'elle est de 20m pour une densité de 10000(kJ/m^2)).
- Une augmentation du taux d'émission de chaleur entraîne une diminution de la longueur maximale de l'incendie.

IV.5 Angle de battement :

Comme mentionné précédemment, la température dans la zone proche de la source d'incendie varie généralement entre 800 et 1200 °C. Afin de réduire ces valeurs élevées, le concept battement de flamme été introduit en raison des fluctuations latérales naturelles des flammes au plafond. Ce phénomène permet une diminution notable de la température dans la zone proche, cette diminution étant fortement influencée par l'angle de l'ondulation.

Pour mieux comprendre l'impact de la variation de l'angle de battement de la flamme sur la baisse de température dans cette zone, nous avons étudié plusieurs angles (0°, 6,5°, 18°, 36°, 55° et 70°) appliqués à des incendies de différentes tailles (5 %, 10 %, 20 % et 40 %). Les résultats obtenus sont synthétisés dans le graphique suivant :

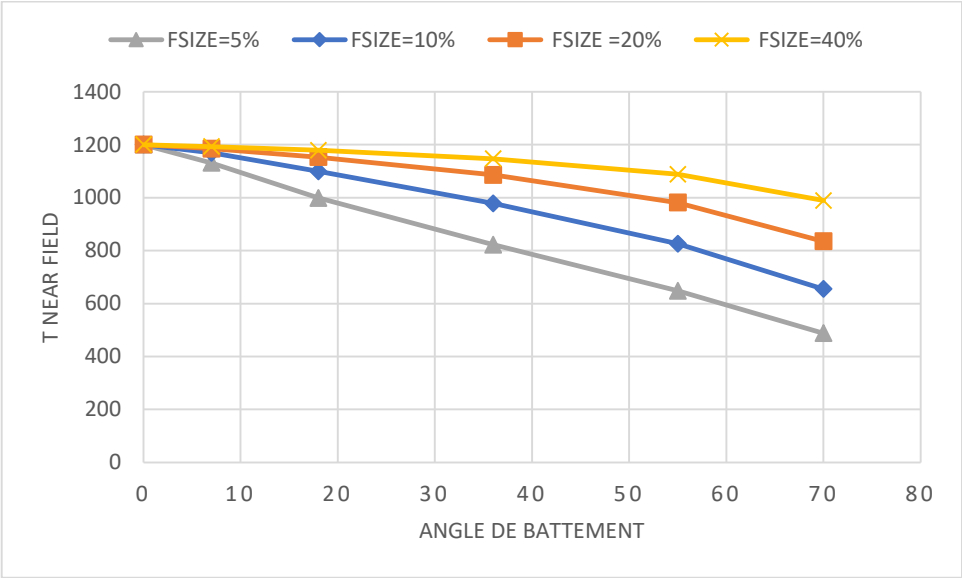


Figure 4.25 : Variation de la température réduite du champ proche avec l'angle de battement et la taille du feu.

La Figure 4.16 met en évidence que l'augmentation de l'intensité de battement de la flamme entraîne une diminution significative de la température dans la zone proche, et ce pour tous les volumes d'incendie considérés. Ce phénomène était prévisible, car une longueur de battement plus importante intègre une plus grande quantité de fumée qu'en cas d'impact direct avec les flammes. Ainsi, en raison du mélange de ces deux champs (flamme qui représenter le champe proche et la fumée qui représenter le champ lointain), les températures des gaz résultantes sont plus basses.

Toutefois, cet effet est nettement plus marqué dans le cas des petits feux par rapport aux incendies de plus grande envergure. Par exemple, pour un feu représentant 5 % de la surface, l'augmentation de l'angle de battement de 0° à 70° provoque une baisse importante de la température, passant de 1200 °C à 488 °C. En revanche, pour un feu de 40 %, la température est d'environ 1200 °C en l'absence de battement. Lorsque l'angle atteint 18°, la température diminue légèrement à 1179 °C, et continue de baisser jusqu'à 989 °C lorsque l'angle de battement atteint 70°.peut dire les petits feux sont plus sensibles aux perturbations dues au battement.

Conclusion générale

Conclusion :

À travers ces expériences portant sur l'étude de l'influence se plusieurs paramètres sur l'incendie et ses caractéristiques, nous sommes parvenus certain de conclusions importants, parmi lesquelles nous citons :

Les paramètres de la chambre, tels que la température ambiante (TB) et la hauteur sous plafond (hauteur), n'exercent pas d'influence notable sur les caractéristiques de l'incendie, telles que sa vitesse de propagation, sa durée totale ou encore son taux de dégagement de chaleur. En revanche, il a été constaté que ces paramètres (TB, hauteur) influencent la température dans le champ proche ($T_{NEAR\ FIELD}$). En effet, une élévation de la température de room entraine une augmentation de la température de champ proche, tandis qu'une hausse de la hauteur s'accompagne généralement d'une diminution de la température dans le même champ.

L'augmentation de la densité du combustible (QF) n'accélère pas la propagation de l'incendie, mais en entrave plutôt le transfert, ce qui contribue à l'élargissement de la zone où les températures sont les plus élevées.

L'augmentation de taux de dégagement de chaleur par unité de surface Q'' entraine :

- ✓ Une accélération du processus thermique. Cela signifie que le système atteint plus rapidement des températures élevées lorsque la puissance surfacique appliquée est plus grande. (Temps plus court pour atteindre les température cibles).
- ✓ Une propagation très rapide de la chaleur dans le système.

Le taux de dégagement totale augment proportionnellement avec Q''.

Les taux de dégagement de chaleur plus faibles entraînent des incendies plus importants en raison de durées de combustion locales plus longues. En revanche, lorsque la densité du combustible est faible, les incendies sont de plus petite taille. Cela indique également que des recherches approfondies sur les taux de propagation des flammes sont encore nécessaires afin de mieux comprendre la dynamique des incendies et d'optimiser les courbes de feu pour la conception des structures.

Conclusion générale

La réduction du taux d'émission de chaleur combinée à une augmentation de la densité de la charge combustible entraîne une diminution de la longueur de l'incendie, et par conséquent une réduction de son volume, ce qui permet de mieux le maîtrise.

Les petits incendies sont plus sensibles aux variations provoquées par le battement de la flamme. Ce battement contribue à la diminution de la température dans le champ proche, en raison du mélange de la flamme avec la fumée. Plus la longueur de battement augmente, plus cet effet de mélange s'accentue, entraînant ainsi une baisse plus marquée des températures environnantes.

Nous avons abordé l'effet de la ventilation sur le plan théorique, mais nous ne l'avons pas traité sur le plan pratique et nous ne l'avons pas intégré dans la modélisation mathématique La ventilation influence le taux de propagation et la vitesse de l'incendie, et elle fera l'objet d'études futures.

Comme conclusion tirée de ce travail et dans le cadre de la conception actuel des compartiments, il est nécessaire de prendre en considération les matériaux constituant le plafond en particulier, et le compartiment en général, dans la mesure où le matériau le moins dense contribue à la réduction de la taille de l'incendie

LES RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

[1] Hugues Prétrel, Phillipe Querre, Marc Forestier; Contribution à l'étude de la dynamique des incendies en milieu confiné et mécaniquement ventilé ; Science de la sécurité incendie - 2016

[2] R Borghi, M Destriau ,Combustion et les flamme... ; books.google.com - 1995

[3]. Borghi. R., Champion, M, Modélisation et théorie des flammes ; TECHNIP (2000)

[4] BAM Sambouni - Etudes numériques et expérimentales sur le risque **d**'inflammation des gaz imbrûlés au cours **d**'un incendie en milieu sous-ventilé - theses.hal. science -2016

[5] Kotsovinos, P., Rackauskaite, E., Christensen, E. G., Glew, A., O'Loughlin, E., Mitchell, H., Amin, R., Robert, F., Heidari, M., Barber, D., Rein, G., & Schulz, J. (2022). Fire dynamics inside a large and open plan compartment with exposed timber ceiling and columns. Fire and Materials, 47, 542-568. 2022

[6] Kotsovinos, P., Christensen, E. G., Rackauskaite, E., Glew, A., O'Loughlin, E., Mitchell, H., Amin, R., Robert, F., Heidari, M., Barber, D., Rein, G., & Schulz, J. (2022). Impact of ventilation on the fire dynamics of an open plan compartment with exposed timber ceiling and columns. Fire and Materials, 47, 569-596. 2022

[7] Nadjai, A., Naveed, A., Charlier, M., Vassart, O., Welsh, S., Glorieux, A., & Sjostrom, J. W. Large scale fire test; The development of a travelling fire in open ventilation conditions and its influence on the surrounding steel structure. Fire Safety Journal -(2022).

[8] J. Stern Gottfried, G. Rein ; Incendies itinérants pour la conception des structures – Partie I : Revue de la littérature. Incendie Journal de sécurité 54. p 74-85-(2012).

[9] Rackauskaite E, Hamel C, Law A, Rein G; Improved formulation of travelling fires and application to concrete and steel structures . Structure.;3:250-260. 2015

[10] .Gales J; Les feux itinérants et le projet St. Lawrence Burns. http://dx.doi.org/10.1007/s10694-013-0372-3. Fire Technol 2014

[11] Clifton CG; Modèles d'incendie pour les grandes cellules de feu. Rapport HERA R4-83 ; 1996.

[12] Rein G, Zhang X, Williams P, Hume B, Heise A, Jowsey A; Analyse des incendies à plusieurs étages pour les immeubles de grande hauteur. 11e Conférence internationale Interflam ; http:// hdl.handle.net/1842/1980. 2007

[13] Stern-Gottfried J, Rein G. , Traveling fires for structural design — part I : Fire Safety Journal 2012;54:74, http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.003.

[14] Stern-Gottfried J, Rein G. Traveling fires for structural design — part II : design methodology . Fire Safety J 2012;54:96–112, http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.011.

[15] Law A, Stern-Gottfried J, Gillie M, Rein G. L'influence des incendies itinérants sur une ossature en béton. Eng Struct 2011;33:1635–42.http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct. 2011.01.034.

[16] P. H. Thomas; Some Aspects of the Growth and Spread of Fire in the Open, Forestry, vol. PH Thomas – Foresterie : Revue internationale de foresterie – academic.oup.com1967

[17] J. G. Quintiere, Principles of Fire Behaviour. Cengage Learning, 1998.

[18] B. R. Kirby, D. E. Wainman, L. N. Tomlinson, T. R. Kay, and B. N. Peackok, Natural res in large scale compartments- A British Steel technical, Fire Research Station collaborative project, 1994

[19] R. G. Gann, A. Hamins, K. McGrattan, H. E. Nelson, T. J. Ohlemiller, K. R. Prasad, and W. M. Pitts, Reconstruction of the Fires and Thermal Environment in World Trade Center Buildings 1, 2, and 7, Fire Technology, vol. 49, pp. 679707, jul 2013.

[20] J. Gales, Travelling Fires and the St. Lawrence Burns Project, Fire Technology, vol. 50, pp. 15351543, nov 2014.

[21] G. Williams-Leir, St. Lawrence Burns Temperature Measurements, Tech. Rep. 152, National Research Council. Canada. Division of Building Research, Ottawa, 1959.

[22] H. E. Nelson, An Engineering view of the report of may 4, 1988 in the First Interstate Bank building Los Angeles, California, tech. rep., 1989.

[23] J. G. Routley, Interstate Bank Building Fire- USFA-TR-022, Tech. Rep. May, Homeland Security, 1988

[24] Egle Rackauskaite /iTFM: Improved Travelling Fires Methodology for Structural Design and the Effects on Steel Framed Buildings ;2017

[25] Hasemi Y, Yokobayashi Y, Wakamatsu T, Ptchelintsev AV. Modélisation du mécanisme de chauffage et de la réponse thermique des composants structurels exposés à des incendies localisés. Treizième réunion du Plan de recherche et de sécurité incendie de l'UJNR. 1996 : 237–247

[26] Janssens ML. Une introduction à la modélisation mathématique des incendies.2e éd. Lancaster, PA, États-Unis : CRC Press ; 2000

[27] Mathieu Suzanne. «Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie». Autre [cond-mat.other]. INSA de Rouen, 2009. Français. NNT: 2009ISAM0015. tel-00557898

[28] T.G. Ma, J.G. Quintiere Numerical simulation of axisymétric Fire plumes : accuracy and limitations ; Fire Safety Journal 38 (2003) 467–492

[29] Heskestad, G., « Fire Plumes », SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2e éd., Association nationale de protection contre les incendies, Quincy, MA, 1995.

[30] McCaffrey, BJ, Flammes de diffusion purement flottantes : quelques résultats expérimentaux , NBSIR 791910, Bureau national des normes, 1979.

[31] Taguemount Hatem ; analyse de l'ecoulement turbulent lors d'un incendie dans un local par la simulation des grande sechelles(mémoire Magister Spécialité : Génie Mécanique Option : En ergétique Numérique/ Université Dr. Yahia Farès de Médéa) .2011

[32] Björn Karlsson G. Quintiere ;Enclosure Fire Dynamics ;2000 by CRC Press LLC ; ISBN du livre électronique9780429122675; taylorfrancis.com; 1999

[33] Jim Mehaffey .Fire Dynamics II,Lecture # 2Ceiling Jets & Ceiling Flames,:Carleton University, 82.583 (CVG****), Fire Dynamics II, Winter 2003, Lecture # 2.

[34] P.-A. Santoni, T. Marcelli, and E. Leoni, Measurement of fluctuating temperatures in a continuous flame spreading across a fuel bed using a double thermocouple probe, Combustion and Flame, vol. 131, pp. 4758, oct 2002.

[35] Crauford, Nicola Lane ; The structure of an unconned buoyant turbulent diffusion flame . PhD thesis; Thèse (doctorat) University of Southampton , http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/52301 ; Dernière modification : 15 mars 2024 10:32