

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master  
Spécialité Energétique et installation énergétique et turbomachine

**Un progiciel pour la caractérisation d'un incendie de  
compartiment ventilé naturellement**

**Encadreur :** Abdallah Benarous

**Co-encadreur :** Abdelhadi.Ikhlef

**Réalisé par :**

Khenfous Chahinez

Benfares Lamia

2023/2024

## *Remerciements*

*Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers Allah, le miséricordieux, le plus puissant et le plus clément, qui nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

*Ce travail n'aurait jamais atteint son niveau actuel sans l'aide, le soutien, les encouragements et la générosité d'un grand nombre de personnes.*

*Nous tenons à remercier, dans ces quelques lignes, toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet, tant sur le plan humain que sur le plan scientifique.*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude à nos encadreur, Professeur A. Benarous, nous n'oublions pas, le CO- Encadreur A. Kkhefet R. Hachanaqui partagé leur expérience avec nous, ainsi que leur confiance, leur remarques, leur conseils et leur disponibilité. Un sincère remerciement est également adressé aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger et d'examiner notre travail. Nous n'oublions pas les enseignants qui ont consacré des efforts considérables à notre égard dans notre intérêt.*

*Enfin, nous exprimons notre reconnaissance envers nos familles respectives et nos amis pour leur soutien constant et leur disponibilité tout au long de notre parcours de travail.*



## *Dédicace*

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à : Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, A mes chères sœurs : Nada, Fatima, Abir, Keltoum et Raouane pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral A toute ma famille « Khenfous » pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. A toutes mes chères copines : Cylia, Hanane, Loubna, Zahra, Linda, Hadile, Kahina et Khaoula. Tous mes enseignants chacun avec son nom. Tous mes collègues : Oumaima, Imene, Mayada, Nesrine, Khadidja, Yousra, Achraf, Mohamed et Zahi. Chaque personne qui m'a aidé chacun avec son nom. Merci d'être toujours là pour moi.



*Chahinez*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail  
au meilleur des peres et a ma tres chère maman qu'ils  
trouvent en moi la source de leur fierté qui ne cessent de me  
donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver a  
ce que je suis aujourd'hui.*

*A mes sœurs et mes freres :  
Asma, Soumia, Wafa, Abdou, Faycel*

*A mes chères neveux et nièces : Ines,  
Racim, Iyed, Eline, Ania, Omar*

*et a toutes mes amies : Takwa, Marwa, Chahinez. etsourtout  
ma belle hanane .*

*A tous ceux qui me sont chers, aix personnes qui m'on aidé  
et encouragé de près ou de loin, qui etaient toujours a mes  
cotés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études*

*Lamia*



# ***TABLE DES MATIRES***

---

**LISTE DES**

**FIGURES**

**Tableaux**

**URE**

**INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1**

## ***CHAPITRE 1 : CARACTERISTIQUE OBSERVEES DES FEUX D'INCENDIES***

<b>1.1</b>	<b>Introduction ..... 3</b>
<b>1.2</b>	<b>Définitions ..... 3</b>
<b>1.3</b>	<b>Combustion ..... 4</b>
<b>1.4</b>	<b>Combustible ..... 5</b>
<b>1.5</b>	<b>Chaleur ..... 6</b>
<b>1.6</b>	<b>Développement des sciences du feu ..... 6</b>
<b>1.7</b>	<b>Développement du feu en termes de température d'enveloppe ..... 7</b>
<b>1.8</b>	<b>Intervention et évacuation lors des incendies ..... 11</b>
<b>1.9</b>	<b>Modélisation des incendies ..... 11</b>
<b>1.10</b>	<b>Normes et aspects législatifs ..... 12</b>
<b>1.11</b>	<b>Incendie et le génie logiciels ..... 16</b>
<b>1.12</b>	<b>Conclusion ..... 18</b>

## ***CHAPITRE 2 : LA MODELISATION THERMOPHYSIQUE DANS***

# **TABLE DES MATIRES**

---

## ***LESECOULEMENTSDE FUMEE***

<b>2.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Lesmodèles corrélatifs.....</b>	<b>21</b>
2.2.1	Modèlescorrélatifs pour les panaches.....	21
2.2.2	Modèlescorrélatifs pour les écoulementsstratifiés (Ceinlingjets).....	28
<b>2.3</b>	<b>La courbe ISO834.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4</b>	<b>Les courbes paramétrique .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>31</b>

## **CHAPITRE3 :PRESENTATION ET FONCTIONNALITE DU PROGICIEL POUR LA CARACTERISATION D'UN INCENDIE DANS UN COMPARTIMENT VENTILE NATURELLEMENT**

<b>3.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Descriptionsdu cas d'étude .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Corrélations et calculs analytiques .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Courbes de Température- temps .....</b>	<b>36</b>
3.4.1	Courbe nominales température temps .....	36
3.4.2	Courbe du feu paramétré .....	38
<b>3.5</b>	<b>Interprétations.....</b>	<b>39</b>
<b>3.6</b>	<b>Organigramme.....</b>	<b>40</b>
<b>3.7</b>	<b>Présentation de l'outil .....</b>	<b>42</b>
<b>3.8</b>	<b>Présentation du progiciel .....</b>	<b>42</b>
<b>3.9</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>49</b>
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>51</b>

# ***TABLE DES MATIRES***

---

<b>LISTEBIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>53</b>
-----------------------------------	-----------

# *LISTE DES FIGURES*

---

<b>FIGURE1.2.</b> Schématisation de la cinétique des flammes pour un combustible solide .....	5
<b>FIGURE1.3.</b> Stades de développement d'un feu .....	6
<b>FIGURE1.4.</b> Schéma descriptif du système de ventilation longitudinale .....	7
<b>FIGURE1.5.</b> Schéma descriptif du système de ventilation transversale .....	8
<b>FIGURE1.6.</b> Variation de la température (°C) selon la norme ISO 834 .....	9
<b>FIGURE1.7.</b> Les courbes hydrocarbures.....	10
<b>FIGURE1.8.</b> La courbe température-temps «RWS» .....	11
<b>FIGURE1.9.</b> La courbe température-temps «RABT» .....	12
<b>FIGURE2.1.</b> Schéma simplifié du panache idéal .....	22
<b>FIGURE 2.2.</b> Schématisation du panache de zukoski. ....	23
<b>FIGURE2.3.</b> Propriétés du panache de Heskestad .....	24
<b>FIGURE 2.4.</b> Représentation schématique du foyer débitant sous un plafond .....	29
<b>FIGURE3.1.</b> Schéma de la géométrie du compartiment d'incendie .....	34
<b>FIGURE3.2.</b> Variation de la température selon ISO 834.....	37
<b>FIGURE3.3.</b> La courbe hydrocarbure.....	37
<b>FIGURE3.4.</b> Variation de la température selon EPFC .....	38
<b>FIGURE3.5.</b> Variation de la température selon courbe A .....	39
<b>FIGURE3.6.</b> Interfacegraphiqueprincipale .....	43
<b>FIGURE3.7.</b> Interfacegraphiquepour le dimensionnement du bac du feu.....	43
<b>FIGURE3.8.</b> Interfacegraphiquepour la puissance du feu .....	44
<b>FIGURE3.9.</b> Interfacegraphiquepour le taux de dégagement de chaleur .....	45
<b>FIGURE3.10.</b> Interfacegraphiquepour caractériser la flamme .....	46
<b>FIGURE3.11.</b> Interfacegraphiquepour caractériser le panache du feu.....	46
<b>FIGURE3.12.</b> Interfacegraphiquepour la courbe HRR stationnaire .....	47
<b>FIGURE3.13.</b> Interfacegraphiquepour la courbe ISO834.....	48
<b>FIGURE3.14.</b> Interfacegraphiquepour la courbe Hydrocarbure .....	48
<b>FIGURE3.8.</b> Interfacegraphiquepour la courbe EPFC .....	49

# ***LISTE DES TABLEAUX***

---

<b>TABLEAU1.1:</b> Comparaison entre réaction de combustion complète et incomplète .....	4
<b>TABLEAU2.1:</b> Valeur des constantes des équations du panache de McCaffrey .....	27
<b>TABLEAU3.1:</b> Propriétés thermo physiques des murs.....	33
<b>TABLEAU3.2 :</b> Valeurs du facteur d'ouverture .....	35
<b>TABLEAU3.3:</b> Dimensions et surface des portes .....	35
<b>TABLEAU3.4:</b> Dimensions et surface des fenêtres .....	35
<b>TABLEAU3.5:</b> La surface totale du mur, plafonds et sol.....	35

# NOMENCLATURE

---

## *Symboles*

$A_i, A_{NV}$	Surface de ventilation	(m <sup>2</sup> )
$c, c_p$	Chaleur massique à pression constante	(J/(kg·K))
$C_e, C_i, C_V$	Constantes du modèle thermodynamique	(J/(mol·K))
$D$	Diamètre (hydraulique) de la source de feu,	(m).
$D^*$	Diamètre réduit	
$g$	Accélération de la pesanteur	(m/s <sup>2</sup> )
$H$	Hauteur de plafond	(m)
$K$	Constante du modèle de Mc Caffrey	
$\dot{m}, M$	Débits massiques ( kg/s )	
$P$	Pression hydrodynamique	( N/m <sup>2</sup> )
$P_f$	Périmètre du bac de feu	( m )
$\dot{Q}, \dot{Q}_c$	Puissance thermique du feu, fraction convective de la puissance thermique (w ou J/s)	
$r$	Distance radiale à partir de l'axe vertical	( m )
$T$	Température statique	(°C ou K)
$V$	Volume	(m <sup>3</sup> )
$Z, z_0$	Distance ascensionnelle, élévation de la source (virtuelle) du feu	(m)
$Y$	Hauteur sans fumées	(m)

## *Symboles grecques*

$\eta$	Constante du modèle de Mc Caffrey
$\gamma$	Rapport isentropique des fumées
$\rho$	Masse volumique

## ***Indices***

$\infty$	Conditions ambiantes (airfrais)
<i>NV</i>	Ventilation naturelle
<i>s</i>	Conditions en couche de fumée
Steady Conditions	en régime stationnaire

## **Acronymes**

<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>GUI</i>	Graphical User Interfaces
<i>HRR</i>	Heat Release Rate.
<i>SHEVS</i>	Smoke and Heat Evacuation Systems

# *Introduction générale*

## **Introduction Générale**

L'ingénierie des incendies est une discipline qui s'impose comme technique relative à la sécurité active, puis passive des personnes, des équipements et des structures. Bien que la physique des feux (incendies) soit mieux comprise et fidèlement modélisée mathématiquement l'accès aux variables de décision, reste une problématique majeure. En effet, la disparité des échelles spatiales (flamme-ventilation) et temporelles (temps d'intermittence - temps d'observation), en sus de la non-reproductivité des puissances thermique dégagées lors des incendies, font que les tentatives numériques de résolution des équations gouvernantes, restent tributaires de plusieurs paramètres. Aussi les approches expérimentales ne semblent pas très attractives en raison des coûts des installations et des techniques d'acquisition et de traitement des variables aérothermiques. Tirant profits des modèles locales (à zone) et corrélatifs, on tente d'entreprendre d'abord des analyses préliminaires sur la dynamique et la thermique des fumées, pour les insérer ensuite dans des calculs de simulation par des modèles plus rigoureux (de champs). Le second objectif consiste à analyser l'interaction –jusque-là inexistante dans la bibliographie- entre les calculs de dimensionnement des systèmes d'évacuation de chaleur et de fumée, dans une géométrie semi-confinée. Le dernier objectif est d'ordre socio-économique dans le sens où l'on a voulu automatiser les étapes de prédimensionnement de comparaison des normes de sécurité et ce, par le développement d'un ensemble de routines informatiques, qu'on a implémenté sous forme d'interfaces graphiques (GUI) gérées dans un environnement Matlab. La présente thèse se compose de trois (03) chapitres :

Dans un premier chapitre, on rappelle quelques généralités sur les incendies, des notions académiques et technologiques relatives à l'étude de la sécurité incendie. Quelques définitions courantes en ingénierie des incendies sont suivies par les techniques utilisées dans le contrôle des mouvements de fumées.

Le deuxième chapitre décrit les modèles numériques de contrôle de fumée utilisées dans le travail de thèse, telles que les systèmes d'évacuation de chaleur les modèles corrélatifs, les modèles de zone et les modèles de champs.

La chapitre trois étudie l'analyse bibliographique qui portera sur les travaux (expérimentation, modélisation) relatifs à la dynamique des fumées, à la thermique du feu, et à l'aspect législatif dans l'utilisation des systèmes d'évacuation de la chaleur et des fumées.

# *Chapitre 1*

## *Caractéristiques observables des feux d'incendie*

## 1.1 Introduction :

De manière générale, le terme « feu » désigne souvent un phénomène produisant de la lumière et de la chaleur, qu'il provienne d'une combustion ou non. Le feu, dans un sens plus large, comprend la combustion des solides sans flamme comme lors de la combustion. Il englobe presque tous les effets trouvés dans les écoulements subsoniques réagissant chimiquement. La dynamique des fluides, la combustion, la cinétique, le rayonnement et, dans de nombreux cas, les effets d'écoulement multi phase sont liés pour fournir un phénomène physique et chimique extrêmement complexe.

La modélisation mathématique du feu, cependant, est encore jeune et un domaine en développement rapide de la dynamique des fluides computationnelle.

## 1.2 Définitions

Le feu est une formidable source d'énergie utilisée par l'homme depuis des centaines de milliers d'années (400 millions). Il est créé par une réaction d'oxydation exothermique qui se déclenche lorsque trois éléments nécessaires sont réunis : (1) le combustible, (2) le comburant et (3) une source d'énergie d'activation. Cela est schématisé sur la figure 1.1. [1]



**Figure 1.1 :** Triangle de feu

Le combustible est l'élément qui brûle, par exemple le bois, le coton, le papier ou le fuel.

Le comburant est ce qui alimente la combustion, principalement l'oxygène présent dans l'air.

La source d'énergie d'activation permet de déclencher la réaction, cela peut être une étincelle,

Une flamme ou simplement une source de chaleur. Il faut de plus que le combustible et le comburant interagissent de manière continue [1].

La combustion dégage de la chaleur, de la lumière et des produits chimiques. Lorsque la stœchiométrie du carburant et du comburant est contrôlée, la combustion est complète, le feu est maîtrisé et son utilisation est bénéfique. Au contraire, lorsque la combustion est incomplète et non maîtrisée, beaucoup de fumée et de produits chimiques se dégagent. Le tableau 1 compare les combustions, complète et incomplète [1].

**Tableau 1.1** : Comparaison entre réaction de combustion complète et incomplète [1]

<i>Réaction complète</i>	<i>Réaction incomplète</i>
Condition équilibrée	Défaut de combustible ou de comburant
Flamme bleue	Flamme jaune rouge et orange ou blanche
Pas de fumées	Fumées
Pas d'imbrûlés	Imbrûlés (suies, CO, ...)

L'incendie est rapide, il suffit de quelques minutes pour qu'il envahisse un habitat et devienne incontrôlable. Il est chaud, sa température peut atteindre 600°C en moins de 5 minutes provoquant des brûlures graves aux poumons pour les personnes présentes.

Il dégage des fumées toxiques qui perturbent le fonctionnement mental, moteur et sensoriel des victimes. La fumée contient des suies noires qui font qu'en quelques minutes tout devient sombre même en plein jour, rendant difficile l'évacuation [1].

### **1.3 Combustion**

Pour le feu, il existe deux types de combustion : les incandescents vifs avec des flammes et les feux couvant, comme le charbon de bois par exemple.

Dans le premier cas, à la fois le combustible et le comburant sont sous forme gazeuse, tandis que dans le second cas, le combustible est solide. La différence entre ces deux modes de combustion réside dans la nature et l'état du combustible, ainsi que dans la quantité d'oxygène accessible.[2]

Un feu couvant se caractérise par l'absence de flamme et est souvent produit par des combustibles solides. Lorsque la température de surface dépasse 500°C, la combustion se produit avec des couleurs dépendantes de leurs températures. Dans l'exemple du charbon,

il n'y a pas de flamme car les composants volatils qui contribuent au feu ouvert ont déjà été dégagés lors de la carbonisation.

Le charbon restant continue à brûler sous forme de feu couvant. Des études sur plusieurs incendies montrent que la phase de feu couvant représente soit la phase de naissance du feu, soit sa phase finale. Souvent, les incendies destructifs avec flammes commencent par un petit feu couvant. Ce feu peut couvrir pendant très longtemps et causer de nombreux dégâts même s'il n'aboutit pas à la génération de flammes.[3]

## **1.4 Combustible**

Les combustibles présentent une grande diversité dans leur composition chimique, ainsi que dans leur mode d'oxydation, la quantité de chaleur qu'ils dégagent, leur température et la quantité d'oxygène nécessaire pour amorcer leur combustion.

Ils peuvent être sous forme gazeuse, liquide ou solide à température ambiante, mais ne s'enflamment que s'ils sont sous forme gazeuse. Pour que les combustibles liquides ou solides s'enflamment, ils doivent d'abord être vaporisés ou distillés. Alors que la vaporisation suffit pour créer des molécules directement combinables avec l'oxygène pour les hydrocarbures simples, de nombreux autres combustibles nécessitent que leurs molécules soient fragmentées en petits morceaux pour se combiner avec l'oxygène. Ainsi, le premier effet de la chaleur sur un combustible tel que le bois est sa décomposition, connue sous le nom de pyrolyse.

La figure 1.2 illustre la dynamique des flammes d'un combustible solide. Dans le cas du bois, la pyrolyse produit des gaz inflammables comme le méthane, des liquides volatiles comme le méthanol, des huiles et des résines combustibles, ainsi qu'une grande quantité de vapeur d'eau. Ces gaz et vapeurs de liquides se diffusent dans l'air et brûlent via les flammes de la combustion. Les molécules de carbone restantes se combinent directement avec l'oxygène de l'air en contact, assurant ainsi un feu couvant.[1]



les processus de transport les plus complexes et nécessite des formulations mathématiques stratégiques pour trouver des solutions. Il a fallu une connaissance approfondie des processus sous-jacents pour isoler ses éléments dominants afin de décrire et d'interpréter efficacement les expériences, ainsi que pour créer des solutions mathématiques générales.[4]

### **1.7 Développement du feu en termes de températures d'enveloppe**

Les feux d'enceinte sont souvent discutés en termes de développement de la température dans le compartiment et divisés en différentes étapes en conséquence : allumage, croissance, embrasement, feu entièrement développé, extinction.

#### **✓ Allumage**

L'allumage peut être envisagé comme un processus engendrant une réaction exothermique marquée par une augmentation significative de la température, bien au-delà de la température ambiante. Il peut se produire de deux manières : soit par un allumage piloté, tel qu'une allumette enflammée, une étincelle ou toute autre source initiatrice, soit par un allumage spontané causé par l'accumulation de chaleur dans le combustible. La combustion qui en résulte peut se manifester soit sous forme de combustion flamboyante, soit sous forme de combustion couvant.

#### **✓ Croissance**

Après l'allumage, le feu peut se propager à différents rythmes, selon le type de combustion, le combustible utilisé, son interaction avec l'environnement et l'accès à l'oxygène. On peut décrire le feu en termes de taux d'énergie libérée et de production de gaz de combustion. Par exemple, un feu couvant peut générer des quantités dangereuses de gaz toxiques avec un taux de libération d'énergie relativement faible. La phase de croissance d'un tel feu peut être prolongée, et il peut s'éteindre avant d'atteindre les stades suivants. En revanche, la phase de croissance peut être très rapide, surtout dans le cas d'une combustion avec flammes. Dans ce cas, le combustible est assez inflammable pour permettre une propagation rapide de la flamme sur sa surface, avec un flux de chaleur suffisant pour enflammer les matériaux combustibles adjacents. De plus, il y a suffisamment d'oxygène et de combustible disponibles pour une croissance rapide du feu. On dit que les feux avec un apport d'oxygène suffisant sont contrôlés par le combustible.

✓ **Flashover**

Le flashover marque la transition de la période de croissance vers le stade pleinement développé du feu. Selon la définition formelle de l'Organisation internationale de normalisation, il s'agit de "la transition rapide vers un état d'implication totale de la surface dans un incendie de matériau combustible à l'intérieur d'une enceinte". En génie de la sécurité incendie, ce terme marque la frontière entre deux étapes d'un incendie de compartiment : pré-flash over et post-flash over. Cependant, le flash over n'est pas un terme précis : diverses définitions peuvent être trouvées dans la littérature. Généralement, les critères exigent que la température dans le compartiment atteigne 500–600°C, ou que le rayonnement vers le sol du compartiment soit de 15 à 20 kW/m<sup>2</sup>, ou encore que des flammes apparaissent par les ouvertures de l'enceinte. Ces phénomènes peuvent résulter de divers mécanismes liés aux propriétés du combustible, à son orientation, sa position, à la géométrie de l'enceinte et aux conditions dans la couche supérieure. Le flash over ne peut pas être considéré comme un mécanisme en soi, mais plutôt comme un phénomène associé à une instabilité thermique.

✓ **Feu pleinement développé**

À ce stade, l'énergie dégagée dans l'enceinte atteint son maximum et est souvent limitée par la disponibilité en oxygène. On parle alors de combustion contrôlée par la ventilation (par opposition à la combustion contrôlée par le combustible), car l'oxygène nécessaire à la combustion est supposé entrer par les ouvertures. Dans les incendies à ventilation contrôlée, les gaz non brûlés peuvent s'accumuler au niveau du plafond et, lorsqu'ils sortent par les ouvertures, ils brûlent, ce qui entraîne la sortie des flammes par ces ouvertures. La température moyenne des gaz dans l'enceinte à ce stade est souvent très élevée, généralement de l'ordre de 700 à 1200°C.

✓ **Extinction**

Au fur et à mesure que le combustible est consommé, le taux de libération d'énergie diminue, ce qui entraîne une baisse de la température moyenne des gaz dans le compartiment. Pendant cette période, le feu peut passer d'un contrôle par la ventilation à un contrôle par le combustible.[5]

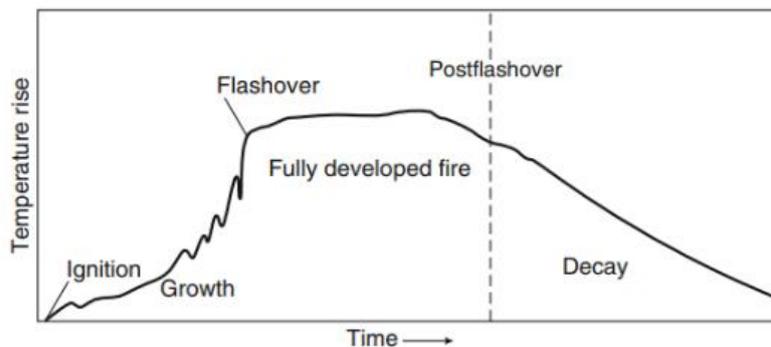


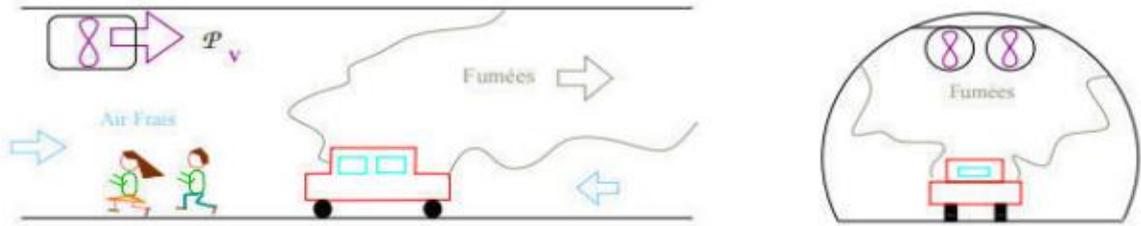
Figure 1.3: Stades de développement d'un feu

### ✓ La ventilation

La ventilation a deux objectifs principaux. En situation normale d'exploitation, elle vise à maintenir une bonne qualité de l'air en limitant les taux de polluants provenant des gaz de combustion et en assurant une visibilité adéquate en contrôlant l'opacité : c'est ce qu'on appelle la ventilation sanitaire. En situation de crise, elle vise à retarder l'invasion des locaux par les fumées aussi longtemps que possible : c'est ce qu'on appelle le désenfumage. Pour atteindre ces objectifs, deux grandes stratégies peuvent être mises en place, dont le choix dépend du type de structure (unidirectionnelle ou bidirectionnelle), de sa géométrie (longueur, section, pente), du nombre de véhicules par jour et du risque de congestion du trafic, ainsi que de la présence de poids lourds transportant ou non des matières dangereuses (TMD), dans le cas des tunnels.[6]

#### a. Stratégie de ventilation longitudinale

Cette première stratégie est la plus évidente pour le grand public, car il peut observer les grands ventilateurs, communément appelés accélérateurs, placés généralement au plafond (ou éventuellement sur les murs). Ces dispositifs sont utilisés pour repousser toutes les fumées en aval de l'incendie. Ainsi, les personnes piégées en amont se retrouvent dans une zone exempte de fumées et peuvent évacuer à pied vers une issue de secours ou vers la sortie du local.[6]

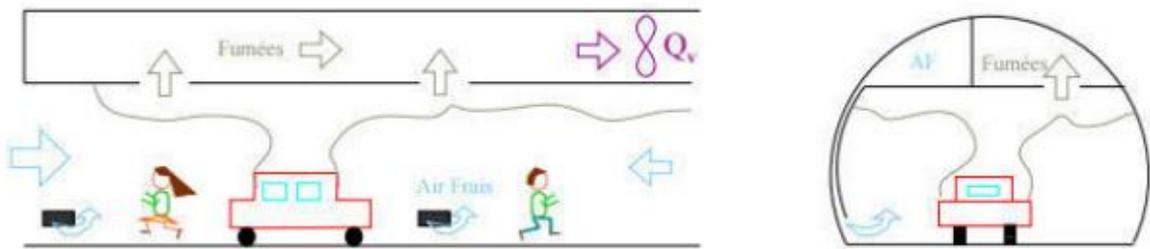


**Figure 1.4:** Schéma descriptif du système de ventilation longitudinale [6]

Cette approche implique l'application d'une force de poussée  $P_v$  à l'air présent dans le local afin de générer un courant d'air dirigé vers la sortie. Elle présente l'avantage d'être relativement simple à concevoir : il suffit de garantir que les fumées ne se propagent pas en amont du foyer d'incendie, ce qui signifie que le courant d'air créé par les accélérateurs est suffisamment puissant pour repousser toutes les fumées vers l'aval. Pour ce faire, des valeurs de vitesses fiables sont disponibles. De plus, ce système est facile à mettre en œuvre. Cependant, il convient de noter que cette méthode ne peut être utilisée dans des situations de circulation congestionnée, où les occupants en aval seraient empêchés de sortir, ou dans le cas d'un tunnel à double sens de circulation, où les occupants seraient bloqués des deux côtés de l'incendie. Dans de telles situations, d'autres stratégies doivent être envisagées.[6]

#### **b. Stratégie de ventilation transversale**

Dans ce cas, une idée possible est de profiter du fait qu'en l'absence de courant d'air, outant qu'il demeure relativement faible, les fumées chaudes ont tendance à se coller au plafond par flottabilité, en préservant une couche d'air frais en partie basse. Ce phénomène naturel est appelé stratification. Le système de ventilation transversale vise à profiter de cet état et à chercher à le maintenir en aspirant les fumées en plafond et en soufflant de manière réduite de l'air frais à proximité du sol. Pour cela, on peut par exemple aménager deux gaines dans un faux-plafond : la première est percée de trappes et sert à aspirer les fumées, la seconde est reliée aux bouches de soufflage près du sol et injecte de l'air frais[6]



**Figure 1.5:**Schéma descriptif du système de ventilation transversale [6]

Pour que ce système soit efficace, il faut que l'extraction en plafond soit suffisante et bien répartie, mais aussi que le courant d'air frais soit limité. En effet, le phénomène destratification est relativement difficile à conserver ; il suffit qu'il y ait un courant d'air trop important dans le local pour que les fumées se déstratifient et envahissent tout l'espace.

## 1.8 Intervention et évacuation lors des incendies

Un élément crucial en complément des mesures de sécurité active et passive est la compréhension, suivie de la modélisation, des déplacements des individus en cas d'incendie. En effet, anticiper la direction d'évacuation la plus probable pour des groupes de personnes et estimer la vitesse moyenne de déplacement des foules constituent des informations essentielles dont tout intervenant dans le domaine de la sécurité incendie (concepteur, secouriste) devrait disposer.[2]

## 1.9 Modélisations des incendies

Il existe classiquement trois niveaux de modélisation, qui peuvent être basés sur :

*a. Les formules et les abaques*

Souvent mentionnées dans la littérature académique, elles peuvent être plus ou moins sophistiquées et complexes, mais sont généralement directement utilisables ou facilement programmables. Elles sont largement employées dans le dimensionnement des structures et des dispositifs de protection (MQH, FPA, FDTs, FIVE\_Rev1, ISO 834, Eurocodes, etc.).[7]

*b. Les codes intégraux "à zones"*

Ils sont basés sur une division en un, deux ou quelques volumes par espace. Ces codes combinent des équations différentielles intégrales (bilan de masse et d'énergie, parfois de mouvement) et des corrélations empiriques (panaches ceiling-jet, ouvertures, etc.), et traitent des aspects "technologiques" tels que la détection, l'évacuation, la ventilation, etc. Leur

utilisation se répand de plus en plus dans les études de risque, parfois même dans le dimensionnement. Les codes bi-zones sont les plus courants, ils rendent compte de l'effet "piston" de l'envahissement des fumées en partie haute. Parmi eux, on trouve (CFAST, HARVARD, FIRST, COMPBRN (US), MAGIC (EDF), SYLVIA (IRSN), COCOSYS (GRS), etc.).[7]

*c. Les codes de champ*

Ils reposent sur les équations de Navier-Stokes et une subdivision fine des volumes. Ils intègrent plus ou moins finement la combustion et les aspects thermiques. Peu utilisés dans le dimensionnement, ils sont plutôt employés dans des études post-accident (juridiques), scientifiques ou prospectives. Leur champ d'application est en constante expansion. Parmi eux, on peut citer (JASMINE, SMARTFIRE, SOFIE (UK), FDS (US) et les codes généralistes CFX, Fluent, Code Saturne (EDF), etc.).[7]

## **1.10 Normes et aspects législatifs**

Les normes et les aspects législatifs dans le contexte de la sécurité incendie sont des éléments essentiels qui visent à garantir la prévention des incendies, la sécurité des personnes et la protection des biens. Voici des définitions claires de ces deux concepts :

*Normes :*

Les normes sont des documents établis par des organismes de normalisation pour fournir des lignes directrices, des spécifications techniques ou des critères de qualité en vue d'assurer l'uniformité, la compatibilité et la sécurité des produits, services et procédés. Dans le domaine de la sécurité incendie, les normes définissent les exigences minimales à respecter pour la conception, l'installation et l'utilisation des équipements, dispositifs et systèmes destinés à la prévention, à la détection et à l'extinction des incendies.

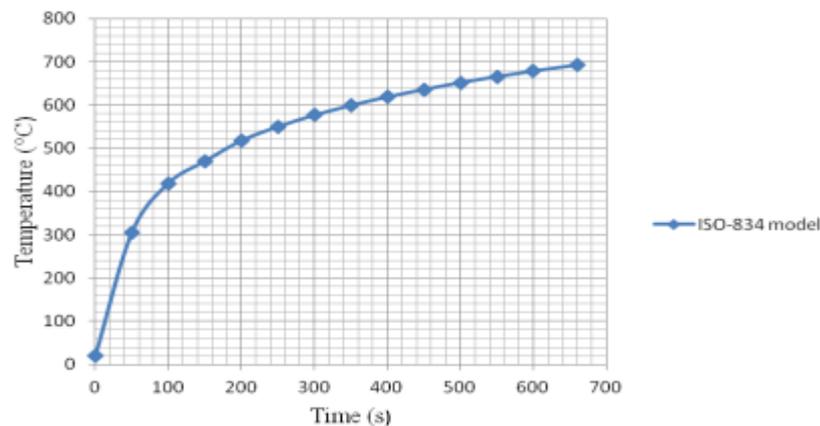
*Aspects législatifs :*

Les aspects législatifs concernent les lois, règlements et directives établis par les autorités gouvernementales pour régir la sécurité incendie. Ces aspects législatifs définissent les obligations légales et les responsabilités des propriétaires, des exploitants, des concepteurs et des professionnels de la sécurité incendie en matière de conformité aux normes et aux exigences de sécurité incendie. Ils déterminent également les procédures à suivre en cas d'incendie, les exigences en matière de formation et de certification, ainsi que les sanctions en cas de non-conformité.

Ensemble, les normes et les aspects législatifs contribuent à établir un cadre complet et réglementé pour assurer une protection efficace contre les incendies, promouvoir des pratiques sûres et garantir la sécurité publique dans les bâtiments et les espaces où des risques d'incendie peuvent survenir

**Courbe normalisée (CN ou ISO)**

Les essais standard d'incendie auxquels sont soumis les éléments de construction reposent sur l'utilisation de la courbe de température (représentative d'un feu cellulosique théorique) en fonction du temps, telle que définie par différentes normes nationales (ISO 834, DIN 4102, AS 1530, etc.). Bien qu'il existe d'autres types de courbes de test d'incendie, comme la BS 7436, la courbe décrite ci-dessus est la plus couramment utilisée dans la pratique. Cette courbe est basée sur le taux de combustion des matériaux et des éléments de construction en général, mais elle repose en réalité sur des recherches datant de la fin des années 40. Il est également reconnu que, avec l'utilisation de plastiques et d'autres matériaux modernes, la courbe ISO peut être considérée comme éloignée de la réalité. Cela est particulièrement vrai dans les constructions modernes, notamment dans les tunnels et les bâtiments. Par conséquent, bien qu'elle soit généralement acceptée pour les constructions traditionnelles, cette courbe ne représente pas la plupart des incendies dans les tunnels et les bâtiments modernes.[8]

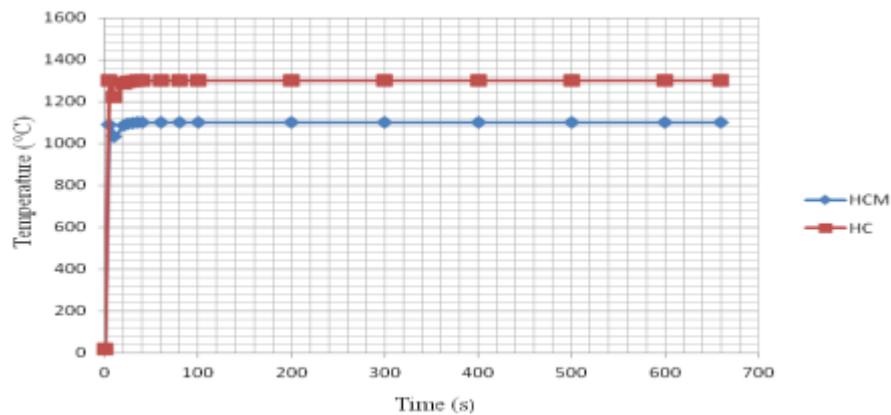


**Figure 1.6:** Variation de la température (°C) selon la norme ISO 834 [8]

Il est clair que la courbe ISO ne prend pas en compte de distribution spatiale de la température. L'équation (2.28) utilise uniquement une variable temporelle et indique ainsi que la température des gaz est uniforme spatialement à l'intérieur du compartiment.

### *Courbe hydrocarbure*

Elle s'applique aux petits incendies impliquant des produits pétroliers tels que les réservoirs de voitures, les camions citernes transportant du fuel, de l'essence ou certains produits chimiques. Bien que la courbe hydrocarbure soit basée sur un incendie standard, il existe de nombreux types d'incendies associés aux produits pétrochimiques. La réglementation française a introduit une version améliorée de la courbe HC, appelée courbe Hydrocarbure majorée (HCM). La température maximale de la courbe HCM est de 1300°C au lieu des 1080°C de la courbe hydrocarbure standard. Cependant, le gradient de température observé dans les premières minutes d'un incendie sous la courbe HCM est tout aussi important que dans les incendies sous la courbe hydrocarbure (CH), ce qui peut entraîner un choc thermique au niveau de la structure environnante et causer des problèmes d'écaillage du béton. Les deux courbes sont illustrées dans la figure ci-dessous.



**Figure 1.7:** Les courbes hydrocarbures [9]

### *Courbe RWS ( Rijkswaterstaat )*

La courbe RWS a été développée par le ministère des Travaux Publics aux Pays-Bas. Elle repose sur l'idée qu'en cas de scénario extrême, un incendie de camion-citerne transportant du fuel ou de l'essence peut générer une charge calorifique de 300MW pendant une période pouvant aller jusqu'à 120 minutes.

Cette courbe se base sur les résultats des tests menés par la société TNO aux Pays-Bas en 1979. La principale distinction entre la courbe RWS et la courbe hydrocarbure, si l'on considère qu'elles traitent des mêmes matériaux en termes de charges calorifiques, réside dans le fait que cette dernière est fondée sur les températures prévues lors d'un incendie dans un espace relativement ouvert, permettant une certaine dissipation de la chaleur. En revanche, la

courbe RWS se base sur des températures obtenues en milieu fermé, comme dans un tunnel, où la chaleur a peu de chance de se dissiper dans l'atmosphère environnante.

La courbe RWS simule l'augmentation initiale rapide de température caractéristique d'un incendie de camion-citerne, ainsi que la baisse progressive des températures attendues une fois que le chargement pétrolier est consommé [9].

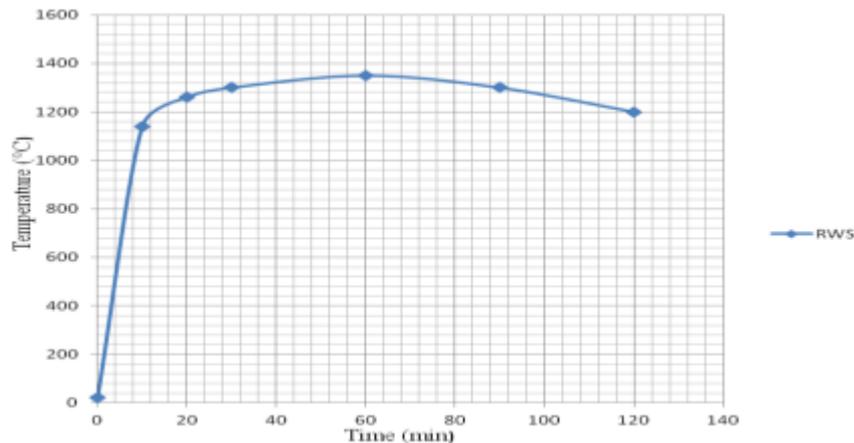


Figure 1.8: La courbe température-temps «RWS» [10]

Aux Pays-Bas, la courbe RWS est utilisée pour des durées allant jusqu'à 120 minutes. Passé ce délai, on estime que la charge calorifique a suffisamment diminué pour que le personnel de lutte anti-incendie puisse avoir accès au foyer de l'incendie et commence à éteindre le feu. Cependant, en Suisse et en Autriche, où les tunnels de montagne sont bien plus longs et présentent des accès plus éloignés, on applique la courbe RWS en allongeant la durée à 180 minutes. Le critère de défaillance pour un spécimen exposé à la courbe RWS est que la température à l'interface béton/revêtement de protection ne doit pas dépasser 380°C et que la température de l'armature ne doit pas dépasser 250°C pour des types béton ordinaire (de type B30) [10].

### ***Courbe RABT-ZTV***

La Courbe RABT-ZTV a été développée en Allemagne à la suite d'une série de programmes de tests, dont le projet Euréka. Cette courbe se caractérise par une montée très rapide de la température, atteignant 1200°C en seulement 5 minutes, ce qui est plus rapide que la courbe hydrocarbure qui ne dépasse que 1150°C en 60 minutes. La période d'exposition à 1200°C est également plus brève que dans d'autres courbes, la baisse de température débutant après 30 minutes [10].

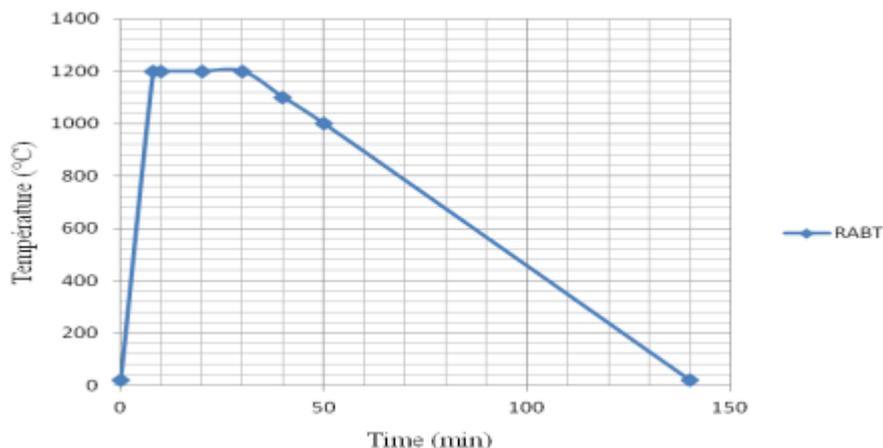


Figure 1.9: La courbe température-temps «RABT» [11]

## 1.11 Incendie et le génie logiciels

### 1.11.1 Informatique au service des incendies

L'informatique est devenue un outil essentiel au service des services d'incendie et de secours, offrant des solutions avancées pour la prévention, la gestion des incidents et l'optimisation des interventions. Voici quelques-unes des façons dont l'informatique est utilisée dans ce domaine

❖ **Prévention des incendies** : Les logiciels spécialisés peuvent être utilisés pour analyser les risques d'incendie dans les bâtiments, en identifiant les zones à risque et en recommandant des mesures préventives.

❖ **Systèmes d'alerte et de notification** : Des applications et des systèmes informatiques permettent de diffuser rapidement des alertes aux populations en cas d'incendie ou d'autres situations d'urgence, améliorant ainsi la réactivité et la sécurité.

❖ **Gestion des interventions** : Les logiciels de gestion des interventions permettent de planifier, suivre et coordonner les activités des équipes d'intervention sur le terrain, en assurant une répartition efficace des ressources.

❖ **Simulation et modélisation** : Les outils informatiques permettent de simuler des scénarios d'incendie pour évaluer les comportements du feu, les flux de fumée et les impacts sur les bâtiments, aidant ainsi à concevoir des stratégies d'intervention plus efficaces.

❖ **Gestion des ressources** : Des systèmes informatiques sont utilisés pour gérer les stocks de matériel d'incendie, les véhicules et les équipements, assurant ainsi leur disponibilité et leur entretien.

❖ **Formation et sensibilisation** : Les applications informatiques sont utilisées pour former les équipes d'intervention aux procédures d'urgence, simulant des situations réalistes pour améliorer les compétences et la réactivité.

❖ **Analyse des données** : Les données collectées lors des interventions peuvent être analysées à l'aide de logiciels spécialisés pour identifier les tendances, améliorer les stratégies opérationnelles et optimiser les performances.[11]

### *1.11.2 Logiciel orientés vers les sciences du feu*

Les logiciels orientés vers les sciences du feu sont des outils informatiques spécialisés conçus pour modéliser et simuler différents aspects des incendies et de la combustion. Voici quelques exemples de logiciels utilisés dans ce domaine :

❖ **Fire Dynamics Simulator (FDS)** : Un logiciel de modélisation développé par le National Institute of Standards and Technologie (NIST) pour simuler la dynamique des incendies, y compris les comportements du feu, les flux de fumée et la propagation thermique dans les structures.

❖ **SMARTFIRE** : Un logiciel de modélisation incendie développé par l'Université de Greenwich, qui permet d'analyser les risques d'incendie, de simuler les scénarios d'incendie et d'évaluer l'efficacité des systèmes de protection contre l'incendie.

❖ **FireFOAM** : Basé sur le logiciel open-source Open FOAM, Fire FOAM est utilisé pour simuler la propagation du feu et la ventilation des fumées dans des espaces confinés.

❖ **Thunderhead Engineering PyroSim** : Un logiciel de modélisation incendie qui combine une interface graphique conviviale avec le moteur de simulation FDS pour créer des modèles complexes d'incendie.

❖ **CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport)** : Un logiciel de modélisation incendie qui simule la propagation des fumées et de la chaleur dans les bâtiments, en évaluant les effets de la ventilation et des systèmes de protection incendie.

❖ **FLACS (Flamme Accélérations Simulator)** : Un logiciel de simulation utilisé pour étudier la propagation des flammes et les phénomènes explosifs, notamment dans les industries chimiques et pétrolières.[12]

## **1.12 Conclusion**

Dans le premier chapitre, il a été abordé de manière générale les phénomènes inhérents aux incendies et liés à la dynamique des fumées, ainsi que la définition de quelques caractéristiques des panaches et des techniques de ventilation. Les modèles physico-chimiques les plus couramment utilisés dans l'ingénierie de la sécurité incendie, tels que les modèles à zones et les modèles de champs, seront décrits en termes de formulations mathématiques afin d'aboutir aux outils numériques.

## *Chapitre 2*

# *La modélisation thermo physique dans les écoulements de fumée*

## 2.1 Introduction

Les premières manifestations des incendies se traduisent par les flammes, qui génèrent de la chaleur et des fumées. Ces fumées se concentrent autour des foyers mais libèrent également des composés chimiques (produits de combustion) plus ou moins toxiques, ainsi que des flux thermiques. Ces flux sont transportés par convection par flottabilité mais se diffusent aussi sous forme de panaches et de jets adjacents aux plafonds (Ceiling jets). Étant donné que ces configurations mettent en évidence des écoulements ascendants et stratifiés de fumées, il est crucial de quantifier la distribution spatio-temporelle de la température et de la vitesse. Comme pour la plupart des écoulements de fluides, les variables principales (inconnues) sont la pression statique ( $P$ ), la température ( $T$ ), les composantes de la vitesse vectorielle  $\vec{v}$  ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), et la masse volumique ( $\rho$ ). Des quantités liées au tenseur des contraintes turbulentes peuvent également être considérées comme inconnues.

En termes de formulation, les équations gouvernantes sont celles de la continuité ( $P$ ) des quantités de mouvement ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), de l'énergie ( $T$ ), du transport d'espèces ( $Y$  espèce chimique), complétées par l'équation d'état du mélange fumées-air ( $\rho$ ). La résolution analytique, voire approchée, d'un tel système d'équations non linéaires et couplées n'est pas envisageable pour des cas réels. Résoudre numériquement les équations précédentes nécessite d'abord une discrétisation spatio-temporelle, associée à un ensemble de conditions initiales/aux limites, puis une formulation intégrale (volumes finis ; éléments finis) ou différentielle (différences finies). Dans ce contexte, le volume contenant la flamme, le panache ou l'écoulement stratifié peut être modélisé comme un ensemble de volumes de contrôle (3D), un ensemble d'éléments à épaisseur nulle (2D), ou simplement comme un ensemble de lignes (1D) caractérisant un comportement selon une seule direction. Pour des applications d'ingénierie, il est souvent nécessaire de disposer d'outils de calcul capables de répondre rapidement aux exigences du cahier des charges lors des phases préliminaires de conception ou de remédiation. À cette fin, les spécialistes de la sécurité incendie mènent des essais à différentes échelles, reproduisant des centaines de scénarios [18]. Ces essais permettent de développer des corrélations empiriques basées sur des relations entre les paramètres physiques, souvent valides dans des intervalles de valeurs définis.

Ces corrélations, que nous allons présenter, sont également utiles pour estimer les élévations de température (de l'air aux fumées), les distributions de vitesse et les débits d'air entraîné au sein des panaches de fumée et des jets stratifiés (Ceiling jets). Ces mêmes

corrélations sont validées dans des compartiments semi-confiés, où elles sont incorporées sous forme de normes régionales (Royaume-Uni, Europe, États-Unis, etc.) en matière de sécurité incendie.

## 2.2 Les modèles corrélatifs

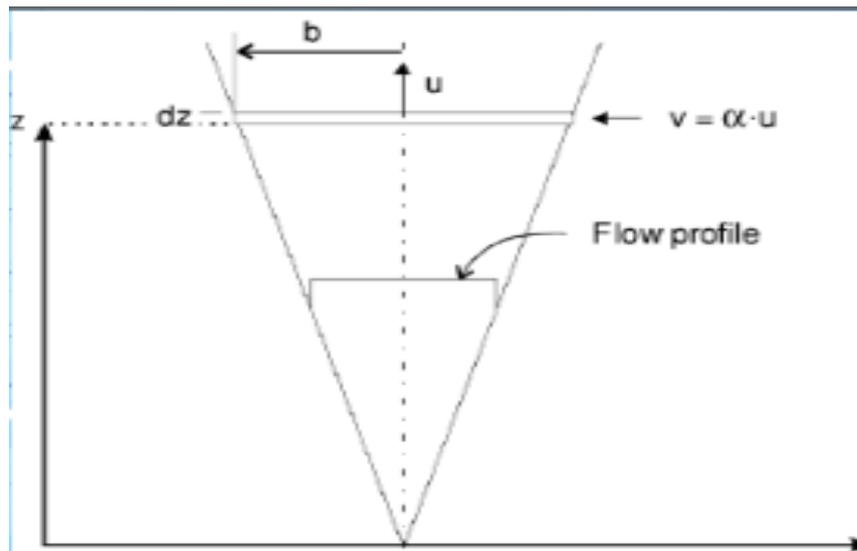
Les corrélations élaborées à partir d'essais en laboratoire sur des maquettes ou à partir d'essais numériques sont spécifiques à des situations stationnaires, le plus souvent unidimensionnelles. Elles décrivent la dynamique et la thermique du panache (y compris la flamme) ou de l'écoulement stratifié du plafond (ceiling-jet).

### 2.2.1 Modèles corrélatifs pour les panaches

Toutes les corrélations ont été établies à partir d'expériences menées en l'absence de confinement. Elles perdent leur validité lorsque l'incendie se produit près d'une paroi. Étant donné que le panache est considéré comme axisymétrique, ces corrélations ne conviennent donc pas aux situations où le panache est fortement influencé par la ventilation. De plus, ces corrélations ne dépendent pas du type de combustible mais seulement du débit calorifique émis par le foyer. Parfois, seule la part convective de ce débit calorifique est prise en compte. Il convient de noter que cette limitation des corrélations réside dans le fait que les pertes par rayonnement varient avec le combustible, ce qui affecte également les températures de flamme. De nombreux travaux ont permis de décrire les caractéristiques des panaches en fonction du débit calorifique grâce à des données expérimentales.

#### *a. Panache idéal :*

Le panache idéal est une représentation simplifiée d'un panache de feu, basée sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses incluent une forme conique pour le panache ainsi qu'une puissance calorifique à la source sans pertes radiatives.



**Figure 2.1:** Schéma simplifié du panache idéal [12]

Le rayon du panache est de la forme [13] :

$$b = \frac{6}{5} a \cdot Z \quad (2.1)$$

Le débit massique du panache [13]

$$\dot{m}_p = 0.20 \left( \frac{\rho^2_{\infty} g}{c_p T_{\infty}} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} (Z)^{5/3} \quad (2.2)$$

L'élévation de température, est donnée par [13] :

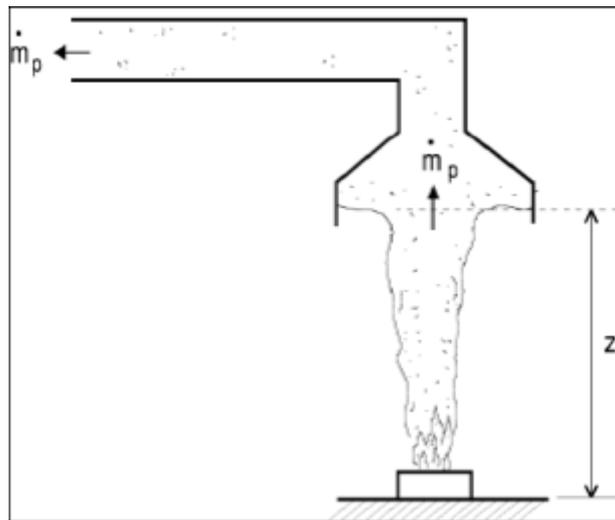
$$\Delta T = T_S - T_{\infty} = 5.0 \left( \frac{T_{\infty}}{g C^2_{\infty} \rho^2_{\infty}} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} (Z)^{-5/3} \quad (2.3)$$

#### *b. Corrélations de Zukoski*

Les relations établies par Zukoski reposent sur des équations analytiques dont les paramètres ont été définis à partir de données expérimentales. Pour parvenir à ces équations analytiques, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été nécessaires pour travailler avec un modèle de panache idéal. Ces hypothèses comprennent :

- Le panache est supposé avoir une forme conique, avec un point virtuel servant d'origine.
- Toute l'énergie du foyer est injectée au point d'origine du panache sans perte, donc aucune chaleur radiative n'est émise.

- Les variations de la masse volumique en fonction de la hauteur sont considérées négligeables, seule la différence entre la masse volumique de l'air ambiant ( $\rho_\infty$ ) et celle du panache ( $\rho_s$ ) est prise en compte.
- La vitesse ascendante de l'air dans le panache est supposée constante sur toute section horizontale du panache, et la vitesse de l'air à l'extérieur du panache est supposée nulle. De même, la température est supposée constante sur une section horizontale.
- L'entraînement de l'air sur les côtés du cône est supposé proportionnel à la vitesse ascendante du panache.



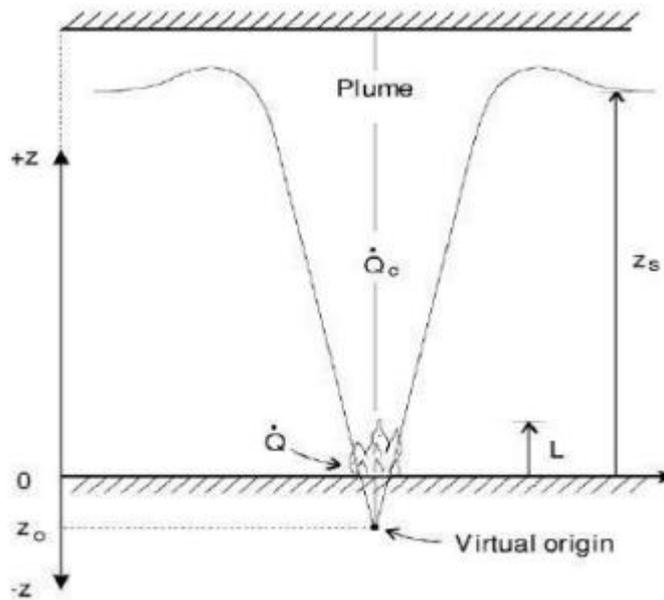
**Figure 2.2:**Schématisation du panache de Zukoski[13]

*c. Corrélation de Heskestad*

Comparativement au travail de Zukoski, Heskestad a utilisé des hypothèses plus réalistes, rendant ainsi l'utilisation de ses résultats moins contraignante. Le panache est toujours supposé avoir une forme conique, mais son origine ponctuelle est maintenant une origine virtuelle située à une distance en dessous de la source réelle de l'incendie. Le débit calorifique de l'incendie est remplacé, qui ne contribue pas à l'augmentation des températures et des vitesses dans le panache. Les profils de température et de vitesse ne sont plus supposés constants sur une section horizontale, mais suivent une forme gaussienne. Enfin, les variations de la masse volumique en fonction de la hauteur sont prises en compte.

Les relations établies par Heskestad permettent d'évaluer la hauteur moyenne de la flamme, le rayon du panache, la température et la vitesse le long de l'axe du panache, ainsi que le débit de masse d'air entraîné dans le panache. La hauteur de la flamme moyenne est souvent définie en fonction de l'intermittence  $L(z)$  à une distance  $z$  au-dessus d'une source.

$L(z)$  représente la fraction de temps pendant laquelle une partie de la flamme est située au-dessus de la hauteur  $z$ . L'intermittence vaut 1 dans la région où la luminosité des flammes est toujours visible et diminue dans la région de flamme intermittente jusqu'à devenir nulle dans le panache inerte. La hauteur moyenne de la flamme est alors définie comme la distance au-dessus de la source où l'intermittence a décliné jusqu'à 50%. En pratique, cette hauteur de flamme moyenne  $L$  correspond à la distance au-dessus du foyer à laquelle la combustion est achevée et où le panache inerte commence (voir figure 2.3).



**Figure 2.3:** Propriétés du panache de Heskestad [14]

L'origine virtuelle, notée  $z_0$ , dépend du diamètre hydraulique de la source d'incendie et de l'énergie totale libérée. L'origine virtuelle est donnée par :

$$Z_0 = 0.083\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2.4)$$

La hauteur de flamme de Heskestad s'exprime comme : [14]

$$L = -1.02D + 0.235\dot{Q}^{2/5} \quad (2.5)$$

Où  $D$  le diamètre hydraulique du foyer. Ces corrélations sont valables pour les conditions atmosphériques normales (293 °K, 1 bar). Si une de ces conditions n'est pas respectée, il faut alors revenir, pour déterminer la hauteur moyenne de flamme, de la relation (2.5) dont l'expression plus complexe utilise les caractéristiques de l'air et du combustible : [15]

$$L = -1.02D + A\dot{Q}^{2/5} \quad (2.6)$$

$$A = 15.6 \left[ \frac{C_p T_\infty}{g \rho_\infty^2 (\Delta h_c / r_m)} \right]^{1/5} \quad (2.7)$$

La capacité thermique massique de l'air est notée  $C_p$ ,  $T_\infty$  représente la température ambiante,  $\rho_\infty$  la masse volumique ambiante,  $g$  la gravité,  $\Delta h_c$  la chaleur de combustion, et  $r_m$  le rapport massique de l'air ou du combustible à la stœchiométrie. Heskestad [24] fournit différentes relations permettant de déterminer les principales caractéristiques physiques régissant un panache thermique. Pour cela, il pose les hypothèses suivantes :

- ✚ Le foyer est considéré comme ponctuel.
- ✚ Les variations de masse volumique dans la zone en mouvement sont petites par rapport à la masse volumique ambiante  $\rho_\infty$ .
- ✚ La vitesse d'entraînement de l'air sur la surface extérieure du panache est proportionnelle à la vitesse verticale locale du panache.
- ✚ Les profils de vitesse verticale et de la force d'Archimède sur toute section horizontale sont de forme similaire à toutes les hauteurs.

Pour prendre en compte la surface de la source dans les relations, une origine virtuelle  $z_0$  est introduite. Il s'agit de la hauteur d'une source ponctuelle équivalente à un foyer de surface finie. Les relations (2.8) à (2.9) ont été établies pour calculer le rayon du panache, la température et la vitesse au centre du panache [15].

$$b_{\Delta T} = 0.12 \left( \frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} (Z - Z_0) \quad (2.8)$$

$$\Delta T_0 = 9.1 \left( \frac{T_\infty}{g C_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (Z - Z_0)^{-5/3} \quad (2.9)$$

$$u_0 = 3.4 \left( \frac{g}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{-1/3} \quad (2.10)$$

Heskestad [15] a donné les équations suivantes pour les débits massiques de panache au-dessus et en dessous de la hauteur moyenne de flamme :

Pour  $z > L$ , c'est-à-dire le débit massique de panache au-dessus de la hauteur de flamme [14] :

$$\dot{m}_p = 0.07 \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{5/3} + 1.85 \cdot 10^{-3} \dot{Q}_c \quad (2.11)$$

Pour  $z < L$ , le débit massique du panache à la hauteur de la flamme ou au-dessous [14] :

$$\dot{m}_p = 0.0056 \dot{Q}_c \frac{z}{L} \quad (2.12)$$

Où  $b_{\Delta T}$  représente le rayon du panache au point où la variation de température a diminué jusqu'à  $0.5\Delta T_0$ ,  $T_0$  est la température sur l'axe,  $\dot{Q}_c$  est la partie du débit calorifique total transportée par convection,  $z$  est la hauteur au-dessus du foyer, et  $z_0$  est la hauteur de l'origine virtuelle du foyer.

Pour des conditions atmosphériques normales ( $T_\infty = 293 \text{ K}$ ,  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $c_p = 1,00 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\rho_\infty = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ ), les relations (2.8) à (2.10) se transforment en (2.13) à (2.15). Ces relations ne sont plus valables en dessous de la hauteur moyenne.

$$b_{\Delta T} = 0.12 \left( \frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} (Z - Z_0) \quad (2.13)$$

$$\Delta T_0 = 25 \dot{Q}_c^{2/3} (Z - Z_0)^{-5/3} \quad (2.14)$$

$$u_0 = 1.03 \dot{Q}_c^{1/3} (Z - Z_0)^{-1/3} \quad (2.15)$$

La vitesse maximale juste en dessous de la hauteur moyenne de flamme peut être approchée dans des conditions atmosphériques normales par la relation (2.16) [14] :

$$u_{om} = 1.97 \dot{Q}_c^{1/5} \quad (2.16)$$

L'origine virtuelle du foyer est un paramètre difficile à connaître. La relation la plus simple proposée par Heskestad pour la calculer est donnée par :

$$\frac{z_0}{D} = -1.02 + 0.083 \frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{D} \quad (2.17)$$

$\dot{Q}_c$  est exprimé en kilowatts et  $D$  en mètre.

#### d. Corrélation de Mc Caffrey

En se fondant sur des données expérimentales et une analyse dimensionnelle, McCaffrey [15] a également formulé des relations pour calculer les températures et les vitesses dans le panache thermique. Les équations (2.18) et (2.19) sont divisées en trois parties selon les zones du panache considérées : la région de flamme persistante, la région intermittente et le panache inerte.

$$\Delta T_0 = 9.1 \left( \frac{k}{0.1\sqrt{2g}} \right)^2 \left( \frac{z}{\dot{Q}_c^{2/5}} \right)^{2\eta-1} T_\infty \quad (2.18)$$

$$u_0 = K \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta} \dot{Q}^{1/5} \quad (2.19)$$

Où  $\dot{Q}$  est le débit calorifique total,  $g$  représente l'accélération due à la pesanteur et  $T_\infty$  la température ambiante. Les constantes  $K$  et  $\eta$  varient selon la région ; les valeurs correspondantes sont indiquées dans le tableau 2.1.

Tableau2.1: Valeur des constantes des équations du panache de McCaffrey [15]

Région	$\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} [m/kw^{2/5}]$	$\eta$	K
Continue	Inférieur à 0.08	$1/2$	$6.8 [m^{1/2}/s]$
Intermittente	0.08 – 0.2	0	$1.9 [m/kw^{1/5} s]$
Panache	Supérieur à 0.2	$-1/3$	$1.1 [m^{4/4}/kw^{1/3} s]$

*e. Corrélation de Thomas*

Les équations du panache mentionnées ci-dessus sont basées sur des données expérimentales qui n'incluaient pas les cas où la hauteur moyenne de la flamme,  $L$ , était nettement inférieure au diamètre de la source de combustible. Thomas et al [16] ont observé que dans la région de la flamme continue ou dans le champ proche, le débit massique du panache dépendait moins du taux de dégagement d'énergie et davantage du périmètre du feu  $P_f$  et de la hauteur au-dessus de la source d'incendie,  $z$ . Cette observation s'applique particulièrement aux feux où la hauteur moyenne des flammes est considérablement plus petite que le diamètre. L'équation du débit massique du panache selon Thomas est formulée comme suit [16] :

$$\dot{m}_p = 0.188. P_f. z^{3/2} \quad (2.20)$$

Où  $P_f$  est le périmètre du feu ( $= \pi D_f$ ) en [m] et  $z$  est la hauteur, en [m], à laquelle le débit massique du panache, en [kg / s]. Pour les sources circulaires, le périmètre du feu peut être écrit en termes de diamètre tel que  $P_f = \pi D_f$ , peut alors être écrit :

$$\dot{m}_p = 0.69. D_f. z^{3/2} ! \quad (2.21)$$

### 2.2.2 Modèles corrélatifs pour les écoulements stratifiés (Ceiling jets)

Lors qu'elles s'élèvent, les fumées ont tendance à frapper le plafond avant de se réorienter vers la direction radiale par rapport à l'axe du panache. Cet écoulement est influencé par la quantité initiale de mouvement au niveau du foyer (ou bac à feu) et se stratifie au plafond sous l'effet de la flottabilité ( $\rho_s < \rho_\infty$ ). Cependant, cette stratification cesse si les fumées se refroidissent (entraînant une augmentation de  $\rho_s$ ) ou en présence d'une perturbation aérodynamique (comme un obstacle, un piège à fumée, ou une ventilation).

Il existe de nombreuses corrélations pour les écoulements stratifiés, adaptées à diverses situations ou scénarios d'incendie.[17] Nous ne détaillerons ici que celles qui sont relativement applicables à des situations générales d'incendie impliquant un feu localisé.

#### *f. Les modèles corrélatifs d'Alpert (1972)*

Alpert [18] a développé des corrélations utilisées pour estimer la vitesse et la température maximales des gaz dans la couche d'un jet sous plafond, ainsi que l'épaisseur de cette couche, pour un foyer stationnaire. Ces résultats sont pertinents jusqu'à une distance radiale d'une ou deux fois la hauteur du plafond. Les travaux d'Alpert sont basés sur une variété de feux utilisant différents types de combustibles, avec des puissances thermiques allant de 668 kW à 98 MW sous un plafond de 4,6 à 15,5 mètres. Les corrélations sont exprimées par les relations suivantes [18]:

Pour  $r/H \leq 0,18$  :

$$T_{max} - T_\infty = 16.9 \dot{Q}^{2/3} (H)^{-5/3} \quad (2.22)$$

Pour  $r/H > 0,18$  :

$$T_{max} - T_\infty = 5.38 \dot{Q}^{2/3} (H)^{-1} \quad (2.23)$$

Pour  $r/H \leq 0,15$  :

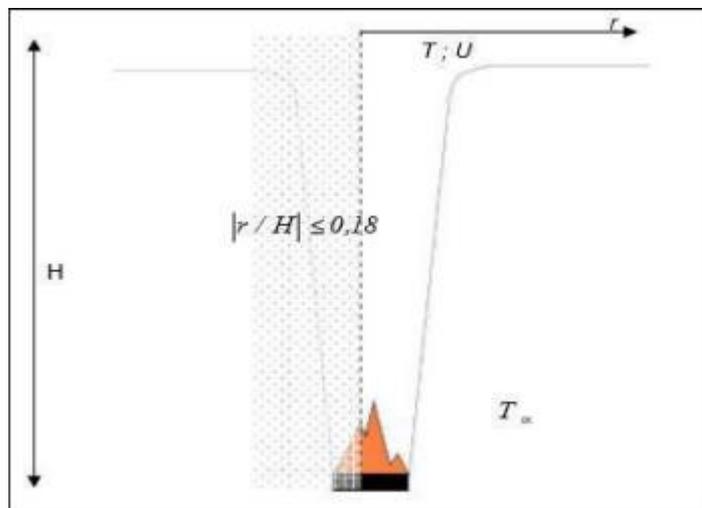
$$U_{max} = 0.96 \left( \frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3} \quad (2.24)$$

Pour  $r/H > 0,15$  :

$$U_{max} = 0.96 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2} r^{-5/6} \quad (2.25)$$

Dans ces relations, la température  $T$ , la vitesse  $U_r$ , la hauteur sous plafond  $H$  et la position radiale  $r$  sont exprimées en unités du Système international (SI). La puissance thermique

totale  $Q$  est quant à elle donnée en kilowatts (kW). Les deux relations (2.22) et (2.24) sont indépendantes de  $r$  ; elles décrivent la zone où les gaz impactent le plafond, c'est-à-dire où un écoulement principalement vertical devient principalement horizontal.



**Figure 2.4:** Représentation schématique du foyer débitant sous un plafond [18]

Ces corrélations utilisent le débit calorifique total du foyer. Cependant, c'est la part de ce débit attribuable à la convection qui influe sur les forces d'Archimède intervenant dans le phénomène du jet sous plafond. On suppose que cette part de convection du débit thermique est proportionnelle au débit calorifique total. Ces corrélations ne sont valables que dans les premiers instants après l'allumage du feu, lorsque l'écoulement sous le plafond peut être considéré comme non confiné ; à ce stade, aucune couche chaude n'est encore établie en partie haute.

Les parois situées à proximité du feu affectent les températures et les vitesses du jet sous plafond. Ces corrélations ne s'appliquent que si la paroi la plus proche de la source est à une distance d'au moins 1,8 fois la hauteur du plafond. Si le foyer est placé près d'une paroi, un facteur correctif est appliqué pour tenir compte du blocage de l'air entraîné dans le panache par le mur.[19]

*g. Le modèle corrélatif d'Alpert (2011)*

En 2011, le même auteur réexamine son modèle corrélatif introduit la fraction convective de la puissance de feu ( $\dot{Q}_{conv}$ ), et tente par des simulations incluant plusieurs types de combustibles, de proposer une généralisation des formules pour  $T_{max}$  [20] :

$$T_{max} - T_{\infty} = 16.9 \dot{Q}_c^{0.66} (H - Z_0)^{-1.666} \quad \text{pour} \quad \frac{r}{H - Z_0} \leq 0.134 \quad (2.26)$$

$$T_{max} - T_{\infty} = 6.721 \dot{Q}_c^{0.66} (H - Z_0)^{-1.666} \left( \frac{r}{H - Z_0} \right)^{-0.6545}$$

$$\text{Pour } \frac{r}{H - Z_0} > 0.134 \quad (2.27)$$

### 2.3. La courbes température-temps ISO-834

#### 2.3.1. les courbes nominales

La courbe temps-température à zéro paramètre a été initialement développée pour reproduire les conditions de chauffage lors des essais. Elle a été généralisée selon les normes britanniques, où l'excès de température  $\Delta T_g(t)$  était exprimé comme [21] :

$$\Delta T_g(t) = T_g(t) - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.28)$$

Dans la relation ci-dessus, où t représente le temps après l'allumage (en minutes) et T0 est la température ambiante (en °C), aucun paramètre physique ni géométrique n'a été introduit.

#### La courbes hydrocarbure

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

$$\Delta T = 1080 (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (2.29)$$

#### 2.3.2 Les courbes paramétriques

Les courbes de feu paramétriques de l'Eurocode (EPFC) sont les courbes les plus largement utilisées pour reproduire les expositions au feu naturel sur les structures. Elles fournissent une expression analytique qui intègre un paramètre d'échelle  $\Gamma$ , prenant en compte la ventilation naturelle et les propriétés thermiques des parois. L'excès de température est exprimé comme :

$$\Delta T_g = T_{max} (1 - 0.32e^{-0.2t^*} - 0.20e^{-1.7t^*} - 0.47e^{-19t^*}) \quad (2.30)$$

$T_{max} = 1325^\circ\text{C}$  et  $t^*$ .  $\Gamma$  Représente le temps d'échelle (en heures), qui est implicitement lié au facteur d'ouverture du compartiment (O) et à l'inertie thermique b des matériaux de la paroi, comme suit[22] :

$$\Gamma = \left( \frac{O}{b} \right)^2 / \left( \frac{O_{ref}}{b_{ref}} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot k \cdot c} ; \quad (2.31)$$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad (2.32)$$

$\rho, k, c$  Désignent respectivement la densité, la conductivité thermique et la capacité thermique massique du matériau de la paroi, tandis que  $A_v, H_v, A_t$  représentent respectivement l'aire et la hauteur de l'ouverture, ainsi que l'aire totale de l'enceinte.

### Densités de charge calorifique

$$q_{f,k} = \frac{\sum_i g_i \times H_i}{A_f} \quad (2.33)$$

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times \dot{m} \times \gamma q_1 \times \gamma q_2 \times \gamma n \quad (2.34)$$

$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} \cdot A_f}{A_t} \quad (2.35)$$

$q_{t,d}$ : est la valeur de conception de la densité de charge calorifique liée à la surface totale de l'enceinte.

$q_{f,d}$ : est la densité de charge calorifique de calcul liée à la surface de plancher

### Température maximale

La température maximale se produira au moment  $t_{max}$

$$t_{max} = \max \left[ \left( 0.2 \times 10^{-3} \times \frac{q_{t,d}}{0} \right) ; t_{lim} \right]$$

$t_{lim}$  est le temps limite.

## 2.5 Conclusion :

L'évolution temporelle des gaz et de la température limite au sein d'un compartiment ventilé est un aspect crucial de tout projet de sécurité incendie. Les calculs prédictifs existants ont été appliqués à des fins spécifiques basées sur les normes. Dans cette étude, les formulations analytiques température-temps les plus couramment utilisées ont été fournies, et les paramètres directeurs ont été explicitement décrits. L'enquête s'est concentrée sur une étude de cas de la littérature impliquant un grand compartiment ventilé naturellement, avec un accent particulier sur la phase de chauffage.

## *Chapitre 3*

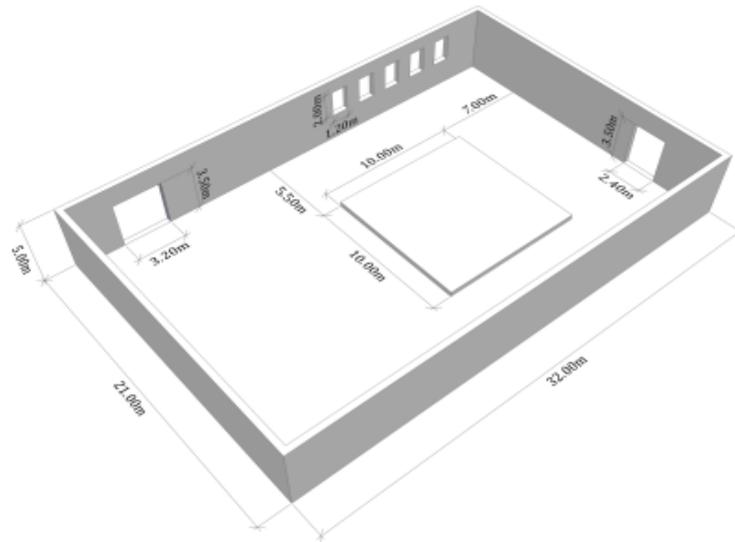
*Présentation et fonctionnalité  
du progiciel pour la  
caractérisation d'un incendie  
dans un compartiment ventilé  
naturellement*

### **3.1 Introduction :**

Les incendies de compartiments présentent des défis majeurs pour les ingénieurs en sécurité incendie, nécessitant une analyse précise des courbes de température-temps pour évaluer les risques potentiels et optimiser les mesures de sécurité. En utilisant diverses méthodes de calcul pour les systèmes d'évacuation de la fumée et de la chaleur (SHEVS), une analyse comparative des différentes formulations de courbes T-temps est effectuée en ce qui concerne les incendies de compartiments. L'accent est mis sur les modèles corrélatifs prédisant l'évolution axiale de la température moyenne dans le panache thermique ainsi que l'évolution temporelle de la température des gaz, pour lesquels un ensemble de routines graphiques Matlab a été développé. Les résultats obtenus avec plusieurs approches de modélisation sont discutés dans cette étude. Cette étude contribue au domaine de la sécurité incendie en offrant un outil complet pour analyser les incendies de compartiments, permettant aux chercheurs et aux praticiens d'améliorer la conception des bâtiments, les procédures d'évacuation et les stratégies de réponse d'urgence. Ce progiciel représente une avancée significative dans l'ingénierie incendie, facilitant des évaluations plus fiables de la dynamique des incendies et, en fin de compte, favorisant des environnements bâtis plus sûrs.

### **3.2 Descriptions du cas d'étude :**

Il s'agit d'un cas de référence concernant un compartiment utilisée pour la menuiserie discutée dans les travaux de (Santarpia, et al 2019) [23], de dimensions 32m×21m×5m. Il comporte 5 fenêtres mesurant 2x1.2m ainsi que 2 portes de 3.2x3.5m et 2.4x3.5m respectivement, qui permettent l'entrée d'air (voir Figure 3.1).



**Figure 3.1** Schéma de la géométrie du compartiment

Les murs de l'espace sont constitués de béton standard et ont des propriétés thermo physiques cohérentes, comme décrit dans le tableau .25 000 Kg de bois ont été déposés sur une surface de 100 m<sup>2</sup> avec un pouvoir calorifique de H = 17,5 MJ Kg<sup>-1</sup> et fournissent une puissance thermique stationnaire  $\dot{Q} = 50KW$ .

**Tableau 3.1** : Propriétés thermo physiques des murs

Propriétés des matériaux	Béton
Densité (Kg.m <sup>-3</sup> )	2300
Chaleur spécifique (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	913
Conductivité (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1.45

Le facteur d'ouverture est le ratio entre la surface des ouvertures (comme les portes et les fenêtres) et la somme des surfaces des murs latéraux du local. Il est défini par :

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \tag{1}$$

$$h_{eq} = \frac{\sum A_{vi} \times h_i}{A_v} \tag{2}$$

Où  $A_v$  représente la surface totale des ouvertures verticales sur les murs,  $h_{eq}$  est la moyenne pondérée des hauteurs des ouvertures, et  $A_t$  est la surface totale du compartiment.

Dans notre étude, le rapport d'ouverture varie en fonction de l'état (ouverture ou fermeture) de la porte et de la fenêtre. Ce rapport est présenté avec trois scénarios dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.2 :** Valeurs du facteur d'ouverture

	<b>Scenario 1</b>	<b>Scenario 2</b>	<b>Scenario 3</b>
La porte 1	Ouverte	Fermée	Fermée
La porte 2	Fermée	Ouverte	Fermée
Les fenêtres	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes
Facteur d'ouverture	0.02043	0.01761	0.00905

### **3.3. Corrélations et les calculs analytiques :**

**Tableau 3.3 :** Dimensions et surface du portes

	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Porte 1	3.2	3.5	11.2
Porte 2	2.4	3.5	8.4

Le compartiment est équipé de cinq fenêtres identiques, chacune ayant les dimensions suivantes :

**Tableau 3.4 :** Dimensions et surface de fenêtre

	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface (m <sup>2</sup> )
Fenêtres	1.2	2	2.4

**Tableau 3.5 :** La surface totale du mur, plafond et sol

	Surface(m <sup>2</sup> )
Mur	530

Plafond	672
Sol	672
La surface globale	1874

### **3.4. Courbe de Température- temps :**

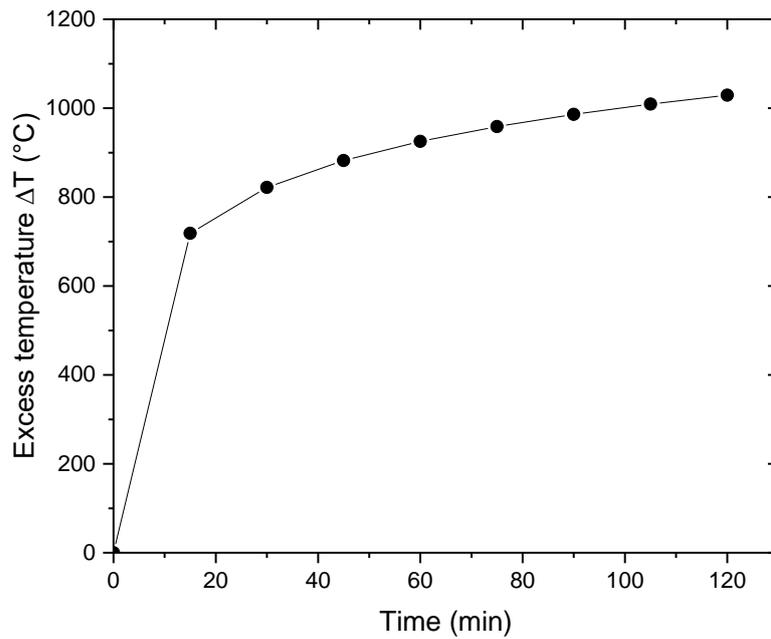
Les courbes de température pour les compartiments ventilés naturellement sont rarement tabulées pour des configurations à grande échelle. En revanche, les expérimentations numériques (modèles à deux zones ou modèles de champ) n'ont pas réussi à fournir des expressions générales pour l'évolution de la température en raison de fortes dépendances à la géométrie et aux paramètres numériques [8]. Les expressions analytiques des courbes T-temps sont considérées comme des outils fiables, offrant des réponses instantanées aux ingénieurs et aux professionnels du feu. Les formulations couramment utilisées sont décrites ci-après.

#### **3.4.1 Courbes nominales température-temps :**

La courbe de feu standard ou courbe ISO 834 est la plus couramment utilisée dans les calculs ainsi que dans les tests standards au feu pour des éléments structurels et séparateurs. Elle est exprimée comme suit :

$$\Delta T = 345 \log(8t + 1) \quad (3)$$

Où  $\Delta T = T - T_0$  représente la température excédentaire, et  $t$  est le temps mesuré en minutes.



**Figure 3.2 :** Variation de la température selon ISO 834

La courbe de feu hydrocarbure : Elle est applicable dans le cas de petits incendies liés aux produits pétroliers tels que les incendies de réservoirs de voitures, camions citernes transportant du fuel, de l'essence ou certains produits chimiques. En fait, quoique la courbe hydrocarbure soit basé sur un incendie standard, il existe de nombreux types d'incendies associés aux produits pétrochimiques.

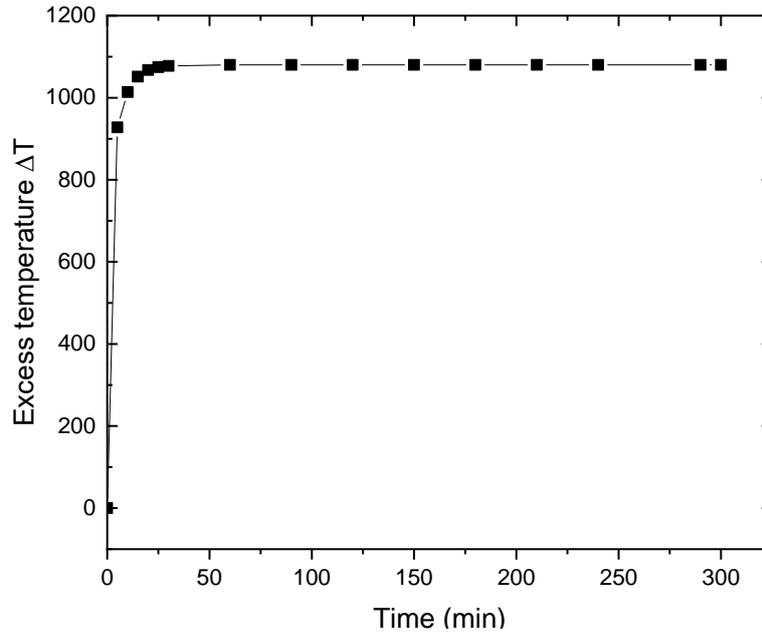


Figure 3.3 :La courbe hydrocarbure

### 3.4.2. Courbe du feu paramétré

L'annexe A de l'Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002) fournit des détails sur les courbes paramétriques température-temps. Les courbes de feu paramétriques de l'Eurocode (EPFC) sont les plus couramment utilisées pour reproduire les expositions aux incendies naturels sur les structures. Elles fournissent une expression analytique avec un paramètre de mise à l'échelle, prenant en compte la ventilation naturelle et les propriétés thermiques des murs

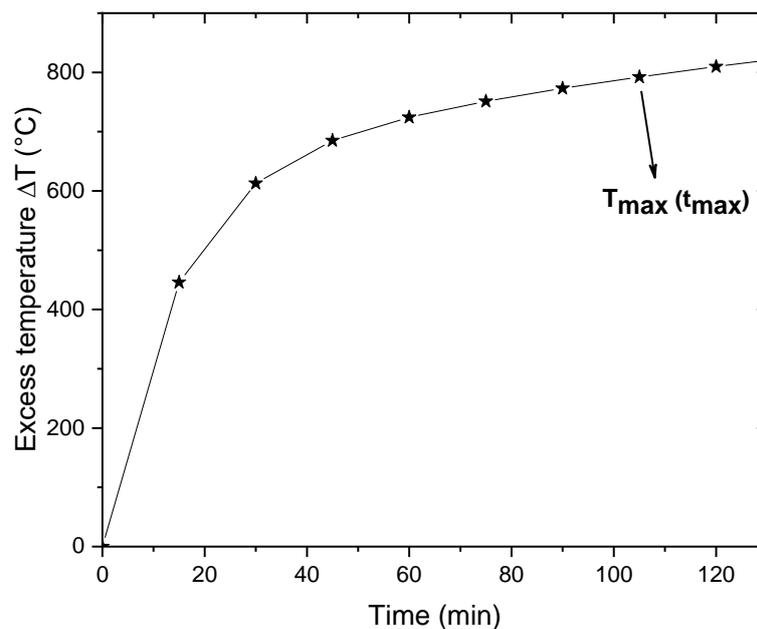


Figure 3.4 : Variation de la température selon EPFC

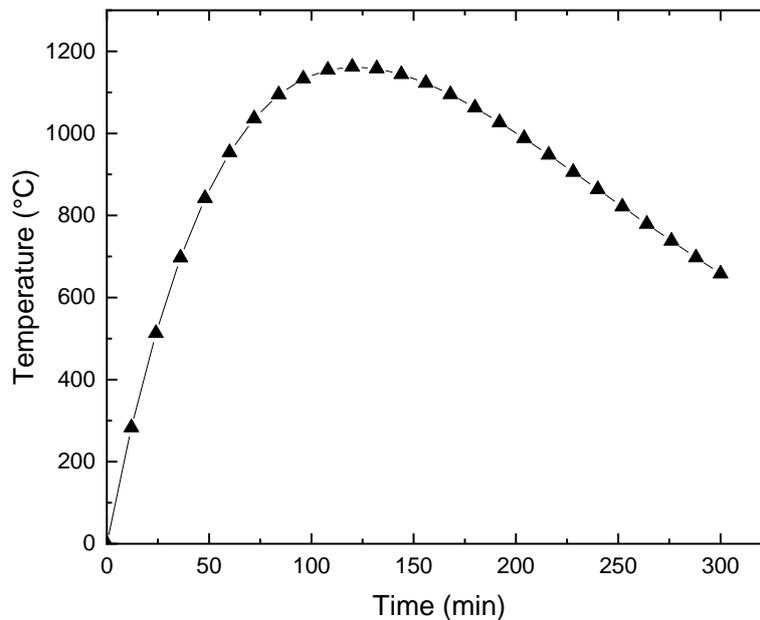
Pour mieux représenter les incendies réels, les courbes de feu naturelles sont prises en considération. Elles fournissent une relation temps-température à développer pour un ensemble de paramètres physiques, à savoir la charge de combustible, la ventilation et les propriétés thermiques des parois du compartiment.

La Courbe A : Elle décrit la température maximale atteinte et le temps écoulé pour y parvenir. L'expression est liée au type de matériau de construction du compartiment, comme [23]

$$T = T_{max} \times \left(\frac{t}{t_{max}}\right) \times e^{\left(1-\frac{t}{t_{max}}\right)} \quad (7)$$

$$\text{Où } t_{max} = \frac{q}{(a \times O)}, T_{max} = b + c \times (1 - e^{-d \times O}) \times q^{(m-n \times O)} \quad (8)$$

Les coefficients "a, b, c, d, m, n" sont associés aux propriétés des matériaux des parois [23].

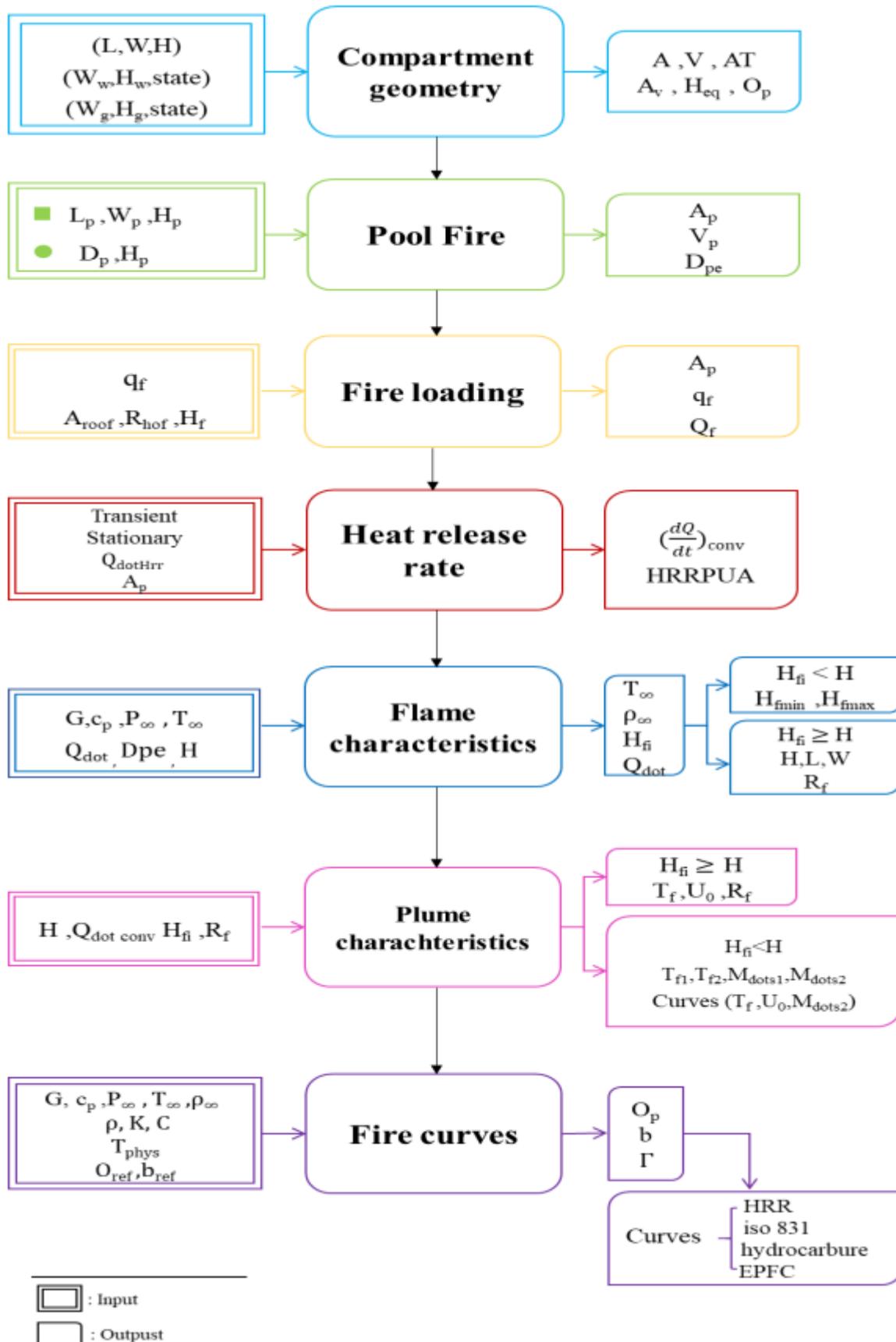


**Figure 3.5** : Variation de la température selon courbe A

### **3.5. Interprétation**

Les courbes de température-temps ISO 834, hydrocarbures, Eurocode (paramétrique), et SLATA A offrent des modèles distincts pour analyser le comportement des incendies dans divers contextes. La courbe ISO 834, utilisée principalement pour les tests standardisés de résistance au feu, présente une augmentation logarithmique de la température au fil du temps, fournissant une évaluation uniforme des matériaux sous des conditions d'incendie. La courbe de feu hydrocarbures, caractérisée par une rapide augmentation initiale suivie d'un plateau élevé, est adaptée aux environnements riches en hydrocarbures comme les installations pétrochimiques, reflétant la nature intense des incendies de carburants. La courbe paramétrique Eurocode, plus réaliste pour les incendies de bâtiment, prend en compte le facteur d'ouverture et l'inertie thermique des murs, représentant les phases de croissance, plateau et décroissance du feu. Enfin, la courbe SLATA A, spécifique à certaines analyses thermiques, offre une flexibilité pour des scénarios d'incendie particuliers, bien qu'elle soit moins courante et plus contextuelle. Ensemble, ces courbes fournissent une gamme complète d'outils pour évaluer la performance des structures en cas d'incendie

### 3.6. Organigramme



### **3.7. Présentation de l'outil**

Nous avons utilisé MATLAB App Designer version 2021 pour le développement de notre outil. MATLAB App Designer est un environnement de développement intégré qui permet de créer des applications interactives avec une interface utilisateur graphique (GUI). Cet outil facilite la conception et la personnalisation des interfaces utilisateur. De plus, la version 2021 de MATLAB App Designer inclut des améliorations significatives en termes de performances et de fonctionnalités, permettant une expérience de développement plus fluide et efficace. Grâce à cet outil, nous avons pu intégrer et visualiser facilement les résultats de nos simulations, améliorer l'interactivité de notre application et rendre notre projet plus accessible et utilisable pour les utilisateurs finaux.

### **3.8. Présentation du progiciel**

Dans une perspective d'ingénierie visant à automatiser les procédures de caractérisation thermique et dynamique des incendies dans des compartiments ventilés naturellement, un progiciel spécialisé a été développé. Ce logiciel représente une tentative ambitieuse d'étendre l'utilisation des procédures de calcul à un public plus large, notamment aux professionnels de l'ingénierie incendie, en dehors du milieu académique.

Ce progiciel est principalement conçu pour effectuer des calculs relatifs aux grands compartiments à un seul étage soumis à une ventilation naturelle. Il intègre les relations de calcul sous forme de programmes informatiques, automatisant ainsi les processus complexes. Le logiciel est équipé d'un ensemble de sous-programmes qui fonctionnent en mode d'entrée de données, où les utilisateurs peuvent spécifier les variables d'entrée, et en mode de sortie de résultats, où les variables de sortie sont générées.

Il est conçu pour être utilisé tant dans le cadre académique, par les universités et les centres de recherche, que dans le cadre professionnel, par les ingénieurs pompiers, les cadres en santé, sécurité et environnement (HSE), les architectes, et les ingénieurs en génie civil. Par conséquent, ce progiciel répond aux besoins variés de ses utilisateurs, qu'ils soient en quête de connaissances académiques ou d'applications pratiques dans le domaine de l'ingénierie incendie.

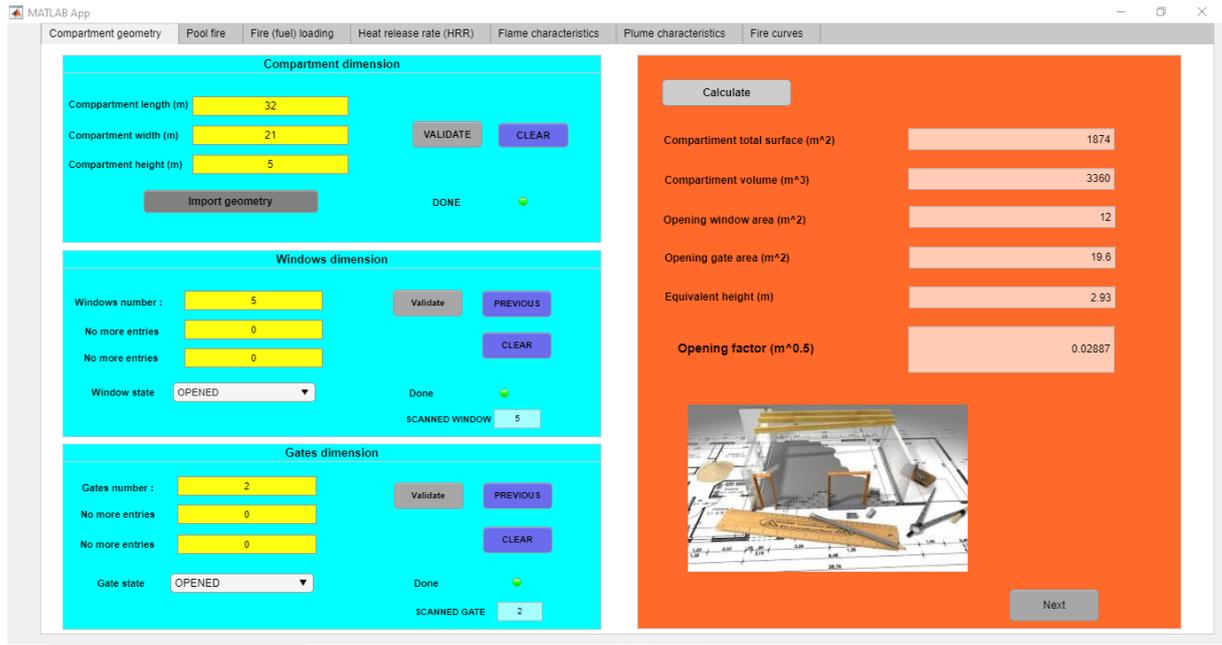
**Interface 1 : la géométrie du compartiment**

L'interface graphique principale du progiciel a été soigneusement conçue pour permettre aux utilisateurs d'introduire aisément les dimensions du compartiment ainsi que les caractéristiques des ouvrants. Cette fonctionnalité est cruciale pour le calcul précis du facteur d'ouverture, qui est un paramètre essentiel dans l'évaluation des conditions de ventilation naturelle au sein d'un compartiment.

Prenons l'exemple d'un compartiment spécifique, dénommé "slata". Dans ce cas, l'utilisateur pourra entrer les dimensions détaillées du compartiment, telles que la longueur, la largeur et la hauteur, ainsi que les spécifications des ouvrants, notamment leur nombre, leur emplacement, leur taille et leur type. Ces données permettent au logiciel de calculer avec précision le facteur d'ouverture, qui est déterminant pour analyser les dynamiques thermiques et les comportements incendie dans un environnement ventilé naturellement.

L'interface graphique intuitive est conçue pour être accessible tant aux professionnels expérimentés qu'aux novices en ingénierie incendie. Elle offre une expérience utilisateur fluide, facilitant la saisie des données et minimisant les risques d'erreurs. De plus, elle inclut des fonctionnalités d'aide et de validation des données pour garantir que les informations saisies sont complètes et exactes avant de procéder aux calculs.

En résumé, cette interface graphique principale constitue un élément central du progiciel, permettant une modélisation précise et efficace des facteurs d'ouverture dans divers scénarios de ventilation naturelle, illustré ici par l'exemple concret du compartiment "Slata".)



**Figure 3.6** :compartiment géométrie

### **Interface 2** : la géométrie du bac de feu

Ce sous-programme est conçu pour offrir aux utilisateurs deux choix principaux concernant la forme du bac de feu : rectangulaire ou circulaire. Cette interface permet de calculer avec précision les dimensions du bac de feu, ainsi que de déterminer son positionnement exact dans le compartiment.

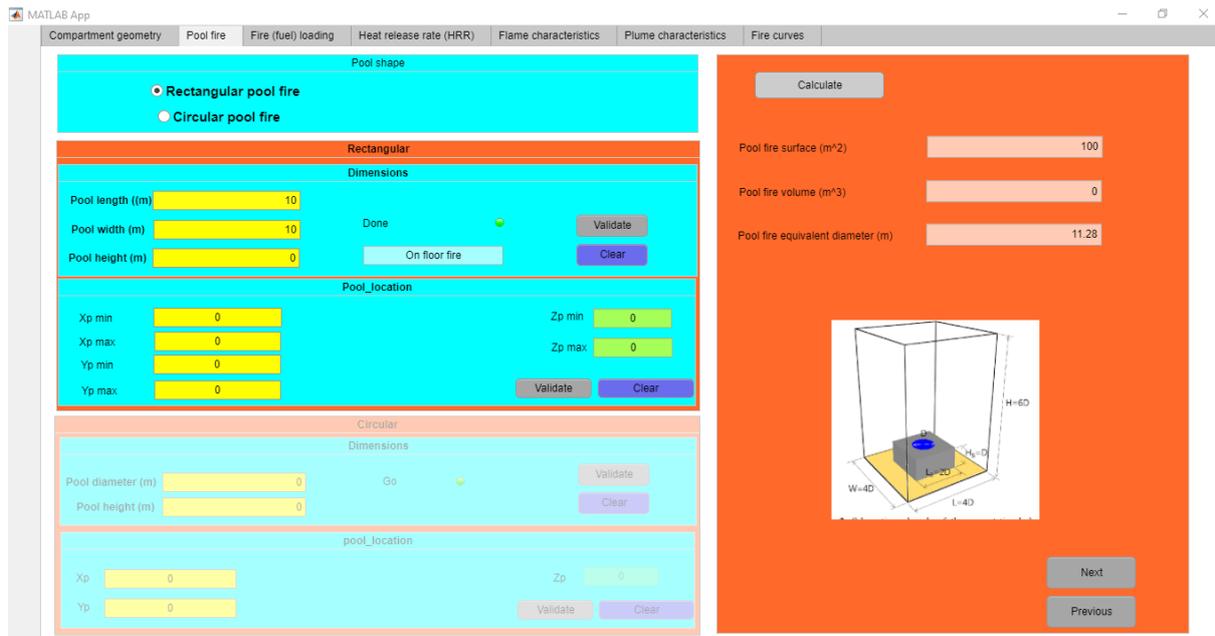
Pour un bac de feu de forme rectangulaire, l'utilisateur est invité à entrer des paramètres tels que la longueur, la largeur et la hauteur. Pour un bac de forme circulaire, les paramètres requis incluent le diamètre et la hauteur. Ces informations sont cruciales pour le calcul des volumes, des surfaces d'échange thermique, et pour l'évaluation des dynamiques du feu dans des configurations différentes.

En outre, l'interface permet de spécifier le positionnement du bac de feu au sein du compartiment. L'utilisateur peut indiquer les coordonnées exactes, permettant ainsi de modéliser avec précision les interactions entre le feu et l'environnement de ventilation naturelle du compartiment. Cela inclut l'évaluation de la distribution de chaleur et des flux d'air, qui sont essentiels pour une analyse détaillée des conditions d'incendie.

L'interface est conçue pour être conviviale, offrant des menus déroulants, des champs de saisie clairs et des guides interactifs pour aider les utilisateurs à entrer les données de manière

précise et efficace. Des fonctions de validation intégrées garantissent que les dimensions et les positions saisies sont réalistes et conformes aux exigences des calculs d'ingénierie incendie.

En résumé, cette interface est un outil indispensable dans le progiciel, permettant aux utilisateurs de modéliser avec précision les différentes configurations de bacs de feu, qu'ils soient rectangulaires ou circulaires, et de déterminer leur positionnement optimal pour une analyse approfondie des incendies dans des compartiments ventilés naturellement.

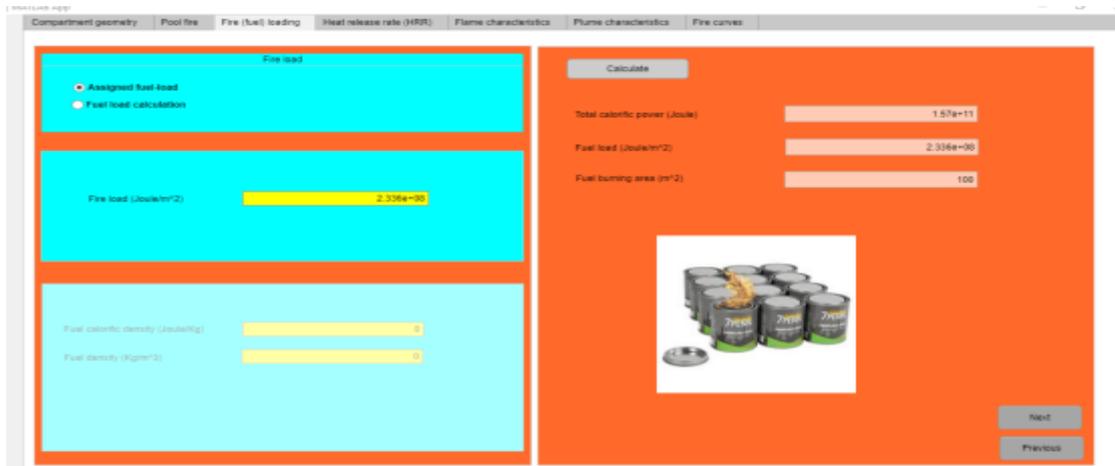


**Figure 3.7 :**Interface graphique pool fire

### **Interface 3 :** Calcul de la densité de puissance de feu

L'interface "Calcul de la Densité de Puissance de Feu" du progiciel permet aux utilisateurs de déterminer la densité de puissance du feu dans les compartiments, exprimée en ( $J/m^2$ ). Les utilisateurs peuvent soit entrer directement la valeur de la densité de puissance de feu s'ils la connaissent déjà, soit calculer cette densité en fournissant les caractéristiques des matériaux combustibles présents dans le compartiment. Pour cette seconde option, il faut sélectionner les types de combustibles, spécifier leur quantité en termes de masse ou de volume, et indiquer leur répartition spatiale. Le sous-programme calcule alors l'énergie totale

dégagée par la combustion et la rapporte à la surface du sol. L'interface est conviviale, avec des champs de saisie clairs et des menus déroulants, ainsi que des fonctionnalités de validation des données pour garantir l'exactitude avant de procéder aux calculs. En résumé, cette interface offre une flexibilité précieuse pour entrer ou calculer la densité de puissance de feu, répondant aux divers besoins des utilisateurs dans le domaine de l'ingénierie incendie.



**Figure 3.8 :** Interface graphique fire loading

**Interface 4 :** Calcul du taux de la densité de dégagement de chaleur

Dans le programme précédent, fireload.m, la densité de charge calorifique du combustible dans un compartiment ( $q_f$ , en Joules par mètre carré), représente l'énergie libérée par la combustion d'une masse donnée ( $M_f$ , en kilogrammes) de matériau combustible (liquide, solide ou gazeux). Cette mesure est essentielle pour évaluer les courbes température-temps (T-time curves), utilisées par les ingénieurs en génie civil pour les calculs de résistance au feu.

En pratique, le feu étant un phénomène temporellement variable, la puissance de feu ( $\dot{Q}$ ), exprimée en Watts, est cruciale.  $\dot{Q}$  représente le taux de dégagement de chaleur réellement libérée par la combustion, dépendant du mélange air/combustible, de la turbulence, de l'entraînement et d'autres facteurs. Dans l'ingénierie des incendies, ce paramètre est souvent introduit par l'utilisateur, avec des tables indicatives disponibles pour référence.

$\dot{Q}$  peut être stationnaire (Stationary HRR) si  $I_{trans} = 0$ , ou varier dans le temps (Transient HRR,  $I_{trans} = 1$ ), ce qui est plus réaliste, incluant des phases telles que l'initiation, le flashover, la décroissance et l'extinction.

Toutefois, même avec ces paramètres, des pertes de chaleur par rayonnement ( $\alpha_{rad}$ ) et par convection existent toujours. Ainsi, la puissance dégagée à la source ( $\dot{Q}$ ) est réduite par ces pertes pour devenir  $\dot{Q}_{rad}$  et  $\dot{Q}_{conv}$  respectivement.

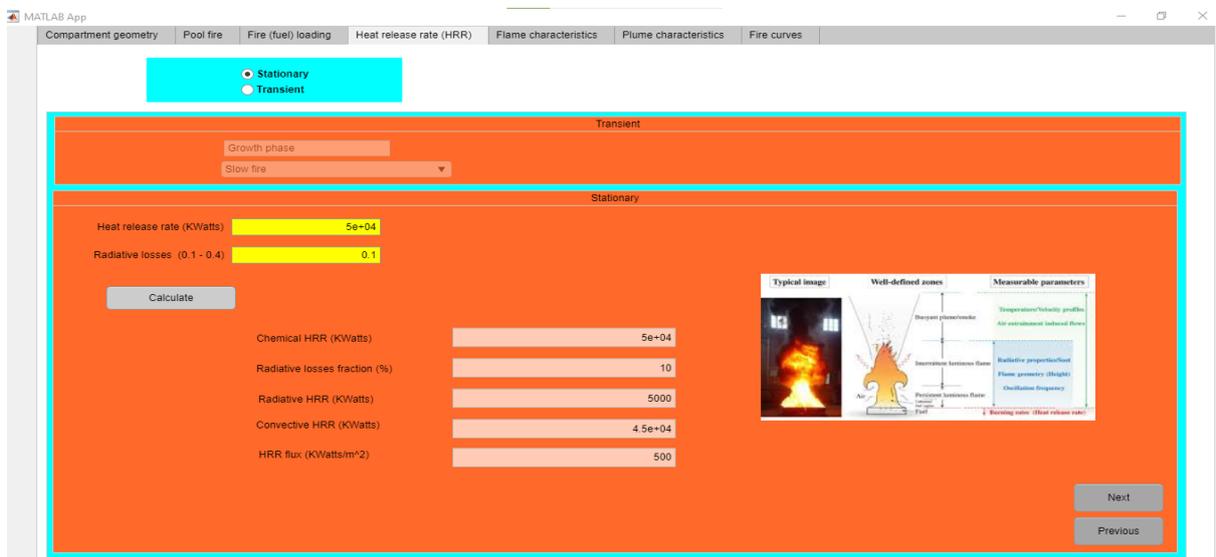
HRRPUA représente le HRR par unité de surface (HRR/A<sub>pool</sub>, en Kilowatts par mètre carré), une mesure cruciale pour calculer la structure de la flamme, incluant des paramètres comme la hauteur et la zone de panache.

En fonction du choix de Itrans, il existe deux approches :

Itrans = 0 : L'utilisateur sélectionne un HRR indépendant du temps, fixe (en Kilowatts).

Itrans = 1 : L'utilisateur choisit un HRR variant dans le temps (en Kilowatts).

Ces paramètres et calculs sont fondamentaux pour une modélisation précise des incendies et pour évaluer les réponses structurales dans des situations d'urgence et de sécurité incendie



**Figure 3.9 :**Interface pour heat release (HRR)

### **Interface 5 :** Programme pour la structure de la flamme

Dans les modules antérieurs du programme, nous avons abordé le calcul du taux de dégagement de chaleur  $\dot{Q}$ , qui peut être constant ou variable dans le temps (bien que cette variation ne soit pas encore prise en compte). Lorsqu'un incendie se déclare dans un espace clos tel qu'un compartiment, il produit une flamme dont le diamètre correspond à celui du contenant, couvrant ainsi toute sa surface. Cette flamme est caractérisée par des fluctuations de hauteur, oscillant entre des valeurs minimales et maximales, avec une hauteur moyenne déterminée.

Le mélange entre la vapeur de combustible et l'air ambiant, sous diverses conditions de flux laminaires ou turbulents, donne lieu à une compétition entre la convection naturelle et l'inertie, phénomène quantifié par un nombre adimensionnel spécifique. En situation d'incendie, ce nombre adimensionnel est typiquement inférieur à 10.

Deux cas principaux peuvent être distingués : lorsque la hauteur de la flamme ne parvient pas à atteindre le plafond, une zone de panache se forme. En revanche, si la flamme atteint le plafond, elle se propage de manière radiale jusqu'à une distance déterminée.

Ces concepts sont fondamentaux pour appréhender la dynamique des incendies dans les espaces confinés et pour évaluer les réponses nécessaires en matière de sécurité incendie.



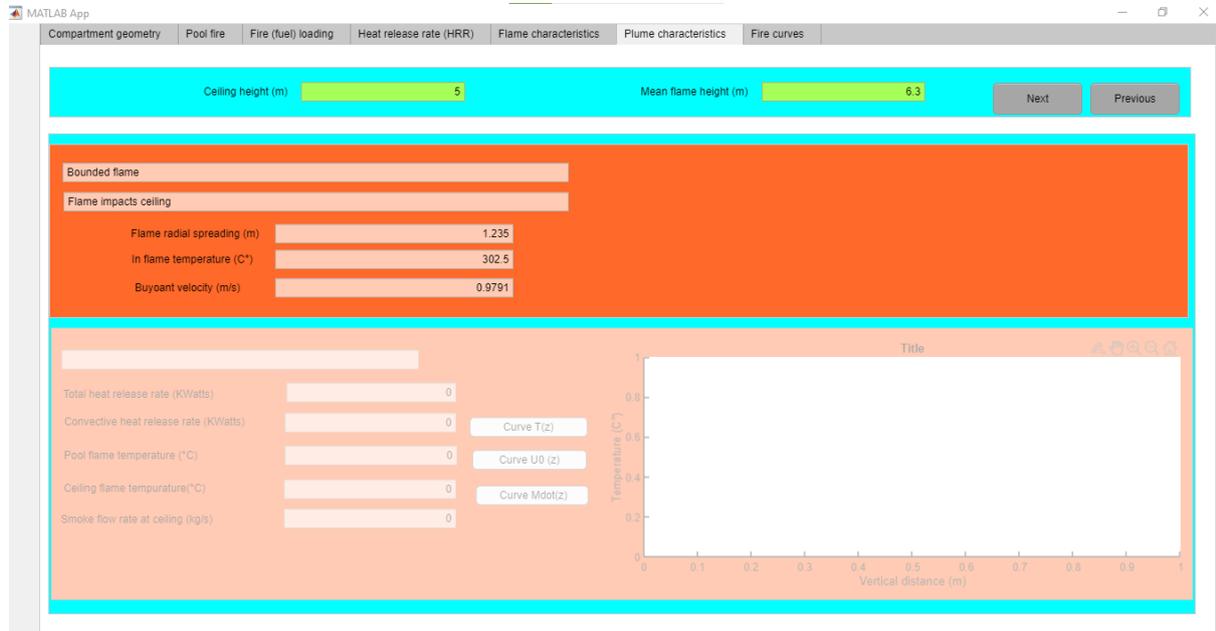
**Figure 3.10 : Interface graphique pour flame characteristics**

**Interface 6 : Programme pour la structure de plume**

Dans les précédents modules du programme, nous avons étudié le taux de dégagement de chaleur  $\dot{Q}$  ainsi que les différents scénarios où la flamme peut atteindre ou ne pas atteindre le plafond ( $H_f > H_{ceiling}$  ou  $H_f < H_{ceiling}$ ). L'objectif de l'interface actuelle est d'analyser les variations de la température, de la vitesse des fumées et du débit des fumées dans le panache, en se concentrant spécifiquement sur le cas où la flamme ne touche pas le plafond.

Nous utilisons la fraction convective du dégagement de chaleur  $\dot{Q}_{conv}$  dans les calculs du panache, et déterminons un point source "fictif" du panache,  $Z_0$ . Pour le cas où la flamme touche le plafond ( $H_f > H_{ceiling}$ ), nous étudions la température et la vitesse constante

sur toute la hauteur occupée par la flamme. Dans le cas où la flamme ne touche pas le plafond ( $H_f < H_{\text{ceiling}}$ ), nous examinons comment la température, la vitesse des fumées et le débit massique des fumées varient à différentes hauteurs dans le compartiment..



**Figure 3.11** : Interface graphique pour plume characteristics

**Interface 7** : Programme pour la distribution temporelle de la température selon plusieurs Norme

Dans l'interface "Programme pour la distribution temporelle de la température selon Plusieurs Normes", nous adoptons un modèle simplifié à une zone où la température évolue uniquement en fonction du temps, sans prendre en compte les coordonnées spatiales (x, y, z). Ce modèle respecte les normes internationales et régionales établies pour la modélisation des incendies.

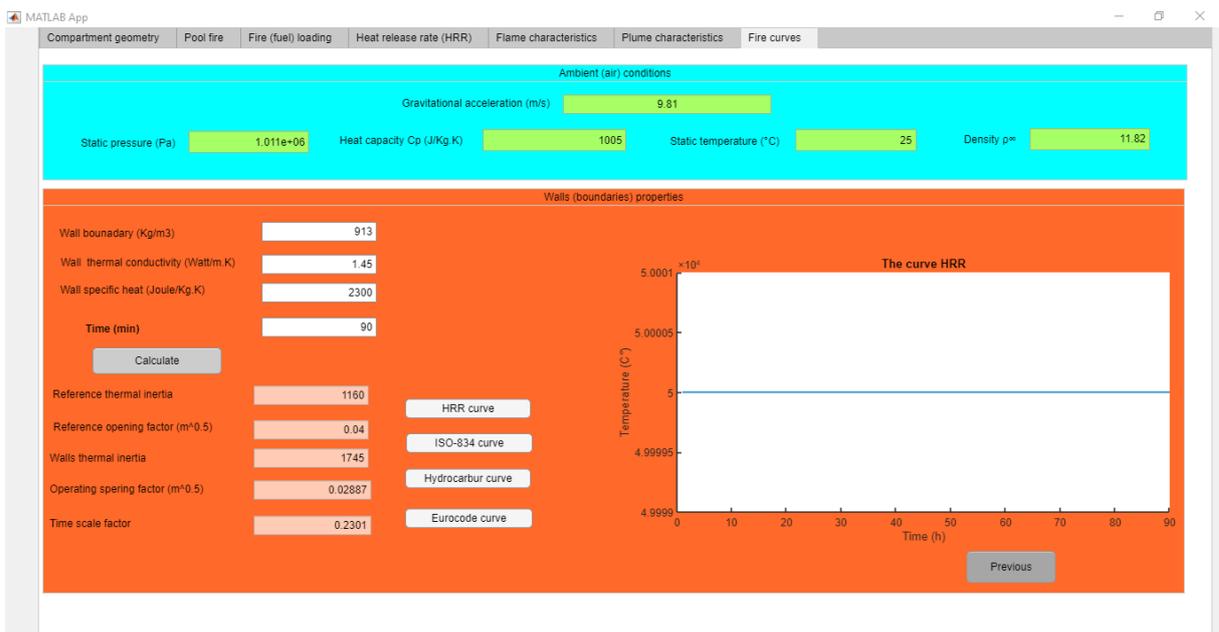
La courbe ISO-834 spécifie la température instantanée dans le compartiment en fonction du temps, tandis que la courbe EN 1991-1 présente une évolution plus rapide de la température, toutes deux sans considérer les effets de ventilation ou les caractéristiques thermiques des matériaux de construction. En revanche, la courbe EN 1991-2 (Eurocode parametric fire curve) ajuste la température en fonction d'un facteur d'échelle temporelle qui tient compte à la fois de l'ouverture naturelle et des propriétés thermiques des parois du compartiment.

Ajouté à ces courbes, la courbe de dégagement de chaleur à l'état stationnaire spécifie la chaleur libérée par unité de surface du compartiment, sans fluctuation temporelle

significative, fournissant ainsi une donnée essentielle pour évaluer l'intensité thermique constante à laquelle le compartiment est exposé.

Ces approches combinées permettent une simulation précise de l'évolution temporelle de la température selon des normes internationalement reconnues, facilitant ainsi l'évaluation des risques d'incendie et l'élaboration de stratégies de sécurité appropriées.

### HRR stationnaire



**Figure 3.12 :** Interface graphique pour fire curves

## ISO834

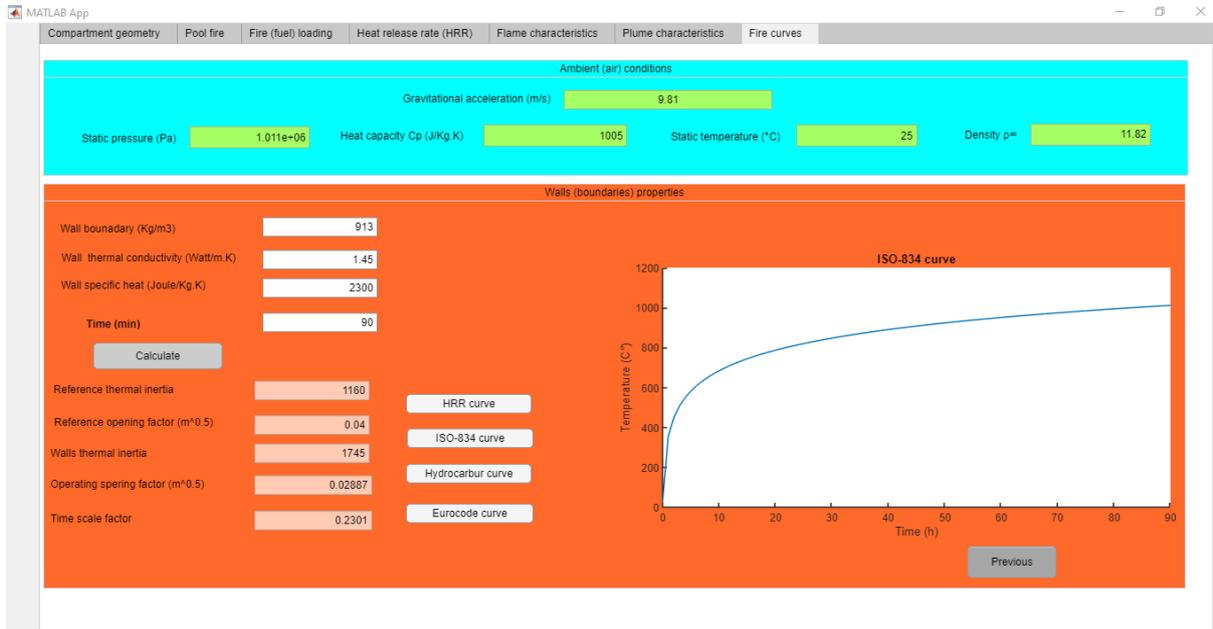


Figure 3.13 : Interface graphique pour la courbe ISO834

## Hydrocarbures

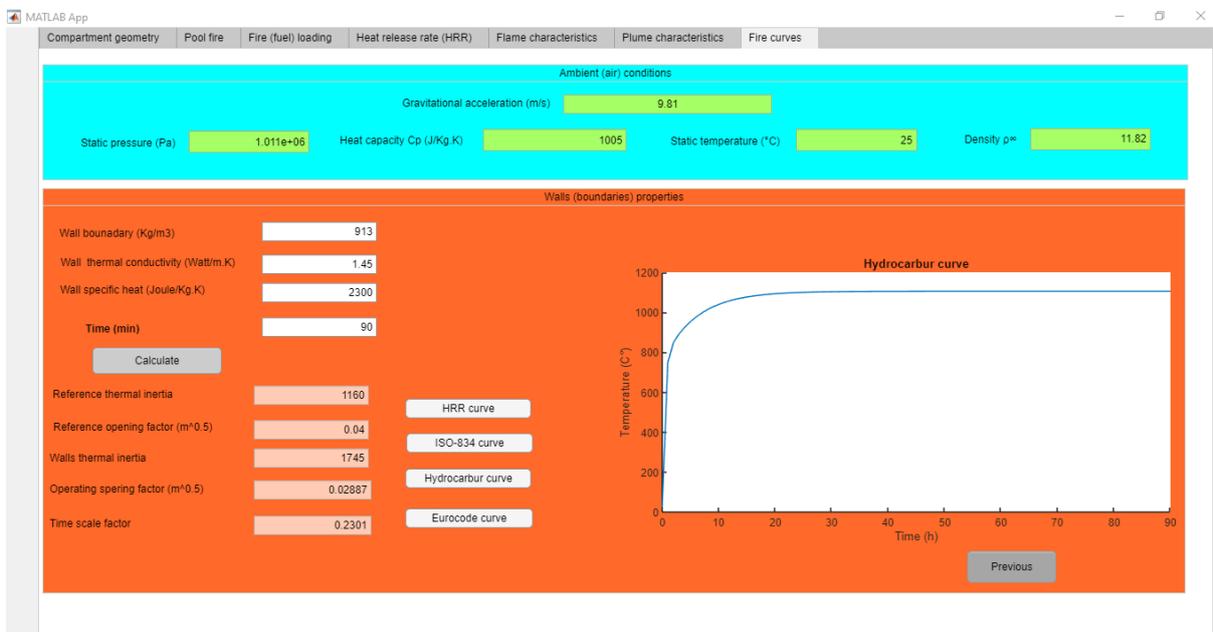
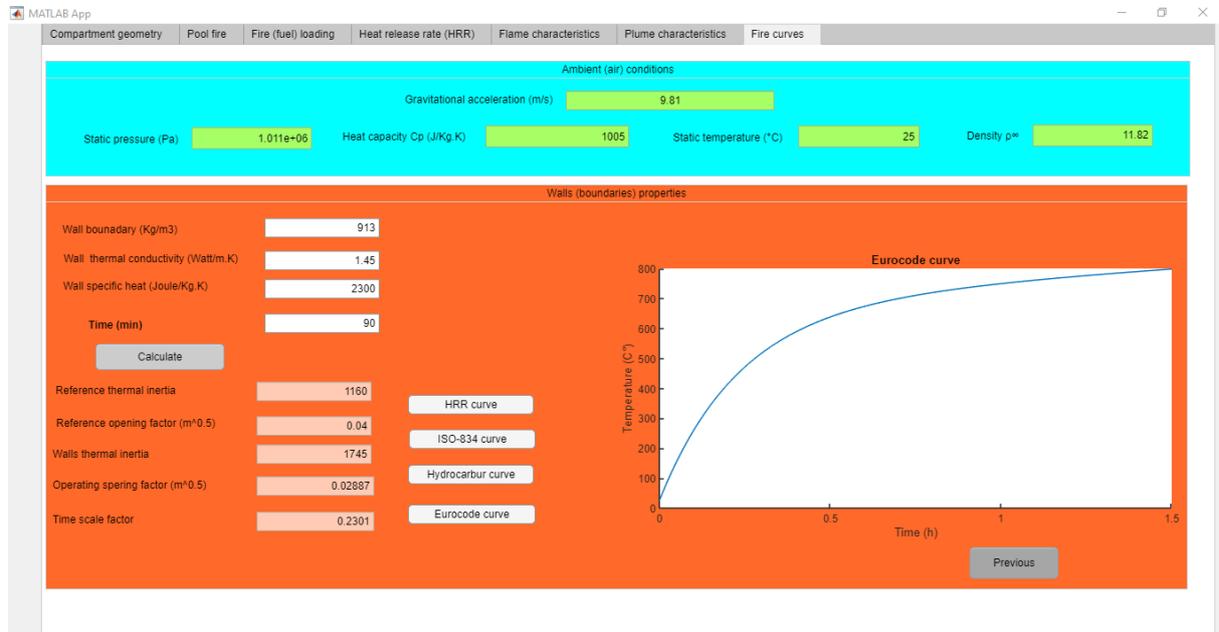


Figure 3.14 : Interface graphique pour la courbe Hydrocarbure

## EPFC



**Figure 3.15 :** Interface graphique pour la courbe EPFC

### 3.9. Conclusion :

Pour la caractérisation thermique de l'évolution de la température et du panache de fumée dans un incendie de compartiment, un progiciel a été développé basé sur des formulations corrélatives. Le modèle corrélatif de Heskestad semble bien adapté pour caractériser la stratification de la température et du panache de fumée. Les travaux futurs incluront également la comparaison de ces modèles avec ceux utilisant des simulations numériques avancées, dans le but global de créer des boucles de contrôle nécessaires pour le développement de plates-formes dédiées à la sécurité incendie.



# *Conclusion générale*

### **Conclusion générale**

Pour caractériser thermiquement l'évolution de la température et du panache de fumée dans un compartiment ventilé naturellement, un progiciel a été développé en utilisant des formulations corrélatives, notamment le modèle de Heskestad qui s'est avéré bien adapté pour analyser la stratification thermique et la propagation du panache de fumée. Ce travail représente une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie de la sécurité incendie, en offrant des outils précieux pour prédire et gérer efficacement les incendies dans des environnements réels.

L'étude approfondie a également porté sur l'évolution temporelle des gaz et de la température dans de grands compartiments ventilés naturellement, en se concentrant sur des calculs prédictifs basés sur des normes spécifiques reconnues à l'échelle internationale. Les résultats obtenus ont démontré un accord satisfaisant avec les données (santarpia all 2019), bien que des écarts significatifs aient été observés dans les prévisions de température maximale entre certains modèles. Cela met en évidence l'importance cruciale de la calibration des paramètres pour améliorer la précision des prédictions et optimiser les stratégies de prévention des incendies.

En outre, cette recherche a exploré en profondeur les phénomènes complexes associés aux incendies et à la dynamique des fumées, ainsi que les modèles physico-chimiques couramment utilisés dans l'ingénierie de la sécurité incendie. La formalisation de ces modèles sous forme de formulations mathématiques détaillées vise à développer des outils numériques robustes pour une analyse plus précise et une meilleure gestion des scénarios d'incendie.

En résumé, ce mémoire représente une contribution substantielle à la caractérisation thermique des incendies dans des compartiments ventilés naturellement. Il offre des perspectives importantes pour améliorer la sécurité incendie, guider les décisions de conception et de gestion des situations d'urgence, et ouvre la voie à de nouvelles avancées dans le domaine de la modélisation et de la simulation des incendies.

# *Liste Bibliographique*

## Liste Bibliographique

- [1] Mokhtari. Z., « Etude et réalisation de détecteurs ioniques de fumée sans source radioactive ». Thèse de Doctorat, Ecole doctorale de sciences mécaniques, acoustique et électronique de paris, May 2013.
- [2] Babrauskas. V., « Ignition Handbook », Fire Science Publishers, Issaquah, WA, 2003.
- [3] Dehaan J. D., « Kirk's Fire Investigation », Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [4] James G. Quintiere., « Fundamentals of Fire Phenomena », ISBN.9780470091135, University of Maryland, USA, 2006.
- [5] L. Gay – E. Wizenne ; Sciences De L'ingénieur En Incendie
- [6] Oucherfi M., « Contribution `a l'étude de la ventilation transversale lors d'un incendie en tunnel routier », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale MEGA, L'Universiteclaude Bernard – Lyon I, France, 2009.
- [7] Agred. S « CONTRÔLE DES ECOULEMENTS DE FUMÉES DANS LES INCENDIES EN ESPACES SEMI-CONFINES », These de Doctorat, Université de Chlef, 2019.
- [8] Bendjbera. N, Bettadji. K, « Comportement d'un tunnel sous l'effet d'un incendie », mémoire de Master, Université de Hassiba Benbouali, Chlef, 2014.
- [9] Zukoski E.E., Kubota T., Cetegan B., «Entrainement in fire plume», fire safety journal, vol.3, pp. 107 121, 1980.
- [10] Mathieu. S, « Conditions d'utilisation de modèles numériques pour l'évaluation de scénarios de départ de feu dans un cadre d'investigation post-incendie», thèse de doctorat, Laboratoire CORIA, 2009.
- [11] <https://www.cinquelec.com/securite/les-systemes-dalarmes-incendies>  
(consultée le 10/05/2024)
- [12] [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/048/27048132.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/048/27048132.pdf) (consultée le 13/05/2024)
- [13] Zukoski. E.E., Kubota. T., Cetegan. B., «Entrainment in fire plumes», Fire safety journal, Vol.3, pp. 107-121, 1980.
- [14] Heskestad G., «Fire plumes, flame height, and air entrainment», SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, NFPA-SFPE, pp 2.1-2.17, 2002.
- [15] McCaffrey B., « Purelybuoyant diffusion flames :Someexperimentalresults», NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, 1979.

- [16] Thomas, P.H. Hinkley, P.L. Theobald, C.R. and Simms, D.L., «Investigations into the flow of Hot Gases in Roof Venting», Fire Research Technical Paper no. 7, HMSO, London, 1995.
- [17] Alpert. R.L., «Ceiling Jet Flows», SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed., 2002
- [18] Alpert RL. «Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors». Fire Technology journal, pp. 181-195, 1972.
- [19] Mehaffey.J , «Ceiling Jets & Ceiling Flames» , Carleton University, 82.583 Fire Dynamics II, 2003.
- [20] Alpert RL. «The fire-induced ceiling-jet revisited». Fire Safety Engineering, pp. 1-20, 2011.
- [21] M. Dj. Blagojevic, D.J. Pesic, “A new temperature-time relationship in compartment fire”, Thermal Science, vol.15 No. 02, pp.339-352, 2011.
- [22] A. Lucherini, B. Jovanovic, R. Van Coile, B. Merci, “Background and limitations of the Eurocode parametric fire curves, including the fire decay phase”, in Proc the Seventh International Conference on Applications of Structural Fire Engineering, Ljubljana, Slovenia, 2021, pp. 330-335.
- [23] L. Santarpia, S. Bologna, V. Ciancio, I. Golasi, and F. Salata, “Fire temperature based on the time and resistance of buildings—Predicting the adoption of fire safety measures,” Fire (2), 2019, pp. 19.