

Projet DIFISEK

Partie 1: Actions thermiques et mécaniques

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre

PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Grand Duché du Luxembourg

1. INTRODUCTION

Dans les années soixante, un certain nombre d'incendies importants, tels que l'incendie du supermarché « Innovation » à Bruxelles qui causa le mort de personnes et l'incendie de la discothèque « Le Cinq Sept » à Saint-Laurent-du-Pont en France, conduisirent à la mise en place de nouveaux règlements partout en Europe.

Ces règlements concernent de nombreux domaines comme suit :

- les moyens d'évacuation,
- la propagation du feu, y compris « la résistance au feu » et « la réaction au feu »,
- la résistance au feu des structures en termes de durée de résistance au feu, R30, 60, 90 ou 120
- le système d'évacuation des fumées et de la chaleur,
- les mesures actives de lutte contre l'incendie, telles que les extincteurs, les détecteurs de fumée, les sprinklers,
- les accès réservés aux pompiers.

Même si le contexte général et les notions de sécurité au feu sont les mêmes partout en Europe, les exigences ne sont pourtant pas homogènes. Ceci a été analysé et actualisé dans le cadre du projet NFSCI [11] grâce aux données recueillies lors du récent projet ECSC « Exigences au feu basées sur les risques » [18]. Par exemple, pour un bâtiment à rez-de-chaussée, la résistance au feu requise peut aller jusqu'à R120 en Espagne mais aucune résistance au feu n'est requise en Suisse [18]. Pour un bâtiment de bureaux de hauteur moyenne, une résistance au feu R60 est exigée aux Pays-Bas, comparée à une résistance au feu R120 en France [11]. Les principaux paramètres définissant les exigences sont la hauteur du bâtiment et son utilisation, liée au nombre d'occupants et au type d'activité. Les exigences de résistance au feu devraient être basées sur des paramètres ayant une influence sur la croissance et le développement du feu. Ces paramètres comprennent :

- Le feu (probabilité d'occurrence du feu, propagation du feu, durée du feu, charge calorifique, sévérité du feu, ...)
- Conditions de ventilation
- Compartimentage (type, taille, géométrie)
- Type de l'élément structurel
- Conditions d'évacuation
- Sécurité des équipes de secours

- Risques pour les bâtiments voisins
- Mesures actives de lutte contre l'incendie.

La réglementation actuelle ne tient pas compte de l'influence des sprinklers dans la suppression ou l'extinction du feu. Les données recueillies [11, 18] montrent que, exception faite de quelques cas, les exigences actuelles sont identiques, que les sprinklers soient présents ou pas. Afin de prendre en considération de façon systématique tous ces facteurs physiques, une approche plus réaliste et plus crédible pour analyser la sécurité au feu des structures a été développée à travers différents projets de recherche européens (ECSC) et se base sur le « concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel » [11, 12, 13, 18]. Le concept de « feu naturel » désigne un feu tel qu'il se comporte dans la réalité par opposition au « feu conventionnel » qui est défini par la courbe ISO-834. Cette méthodologie a été développée sur la base d'analyses et d'approches statistiques, probabilistes et déterministes. Elle est applicable à tous les matériaux structurels et à tous les bâtiments.

La figure 1.1 montre la comparaison entre les courbes de feu naturel (*i.e.* réel) pour différentes configurations (taille du compartiment, charge calorifique, isolation des murs, caractéristiques du combustible, ...) et la courbe de feu conventionnel.

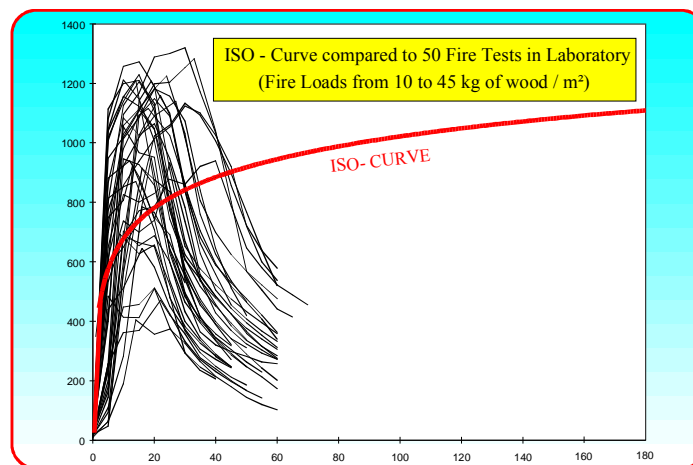


Figure 1.1 : Courbes température-temps pour un feu naturel et pour un feu conventionnel

Ceci illustre les difficultés rencontrées pour comprendre le comportement des éléments dans l'incendie réel lorsqu'on utilise des données obtenues uniquement avec la courbe de feu conventionnel. Les caractéristiques d'un incendie réel sont montrées sur la figure 1.2 et comportent :

- Une phase couvante : feu couvant à très basse température avec une durée souvent difficile à estimer.
- Une phase de croissance appelée « pré-flashover » (feu localisé) : la durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment. Le feu reste localisé jusqu'à une généralisation probable du feu.
- Un « flashover » : c'est un feu généralisé. Cette phase est généralement très courte.
- Une phase « post flashover » : cette phase correspond à un feu généralisé dont la durée dépend entre autres de la charge calorifique et de la ventilation.
- Une phase décroissante : le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé.

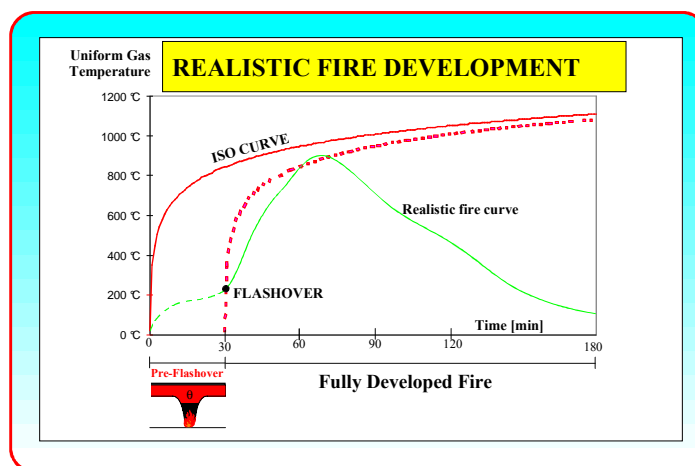


Figure 1.2 : Phases de feu naturel

2. METHODOLOGIE

2.1 Introduction

La détermination du développement du feu dans un compartiment nécessite de connaître de nombreux paramètres. Un certain nombre de ces paramètres sont déterminés par les caractéristiques du bâtiment. Néanmoins, la caractéristique principale, la « charge calorifique », dépend généralement de l'activité et peut ne pas être constante pendant la durée de vie du bâtiment. La charge calorifique peut être définie comme une distribution statistique.

De la même manière, la sécurité au feu d'un bâtiment a été déterminée grâce à une approche probabiliste. Dans le concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel, l'objectif est défini par une valeur cible de ruine. L'objectif n'est pas de changer le niveau de sécurité existant actuellement dans les règlements, mais de le quantifier grâce à des probabilités de ruine réalistes ou à un indice de niveau de sécurité. La combinaison de mesures actives et passives peut être utilisée pour atteindre un niveau de sécurité acceptable.

La méthode générale de mesure de la sécurité est basée sur la méthode utilisée pour le dimensionnement des structures à température normale et définit une charge calorifique de calcul prenant en compte la probabilité d'un incendie et l'influence de mesures actives de lutte contre l'incendie.

La charge calorifique est alors utilisée dans les modèles de calcul du développement du feu pour évaluer le comportement des structures en cas d'incendie. Les modèles pour déterminer la température à l'intérieur du compartiment sont décrits ci-après.

2.2 Objectifs

L'objectif est d'atteindre un niveau de sécurité acceptable. Ce niveau peut être défini par comparaison avec les autres risques existants, incluant l'effondrement de la structure du bâtiment dans des conditions normales. La probabilité cible qu'un effondrement de la structure se produise dans des conditions normales est de $7,23 \cdot 10^{-5}$ par bâtiment [10]. L'objectif est : P_f (probabilité de ruine) $\leq P$ (probabilité cible).

Comme cela est spécifié dans les Eurocodes, le feu est une situation accidentelle. Une grande étude statistique a été réalisée dans le but de déterminer les probabilités d'incendie. L'occurrence du feu dépend de l'activité du bâtiment. Une bonne corrélation entre des statistiques provenant de différents pays européens a pu être constatée [11]. Lorsqu'un incendie démarre, un effondrement ne peut avoir lieu que si le feu devient suffisamment important. Pendant cette phase, les mesures actives de lutte contre l'incendie, les occupants et les pompiers ont un rôle important à jouer. Cela signifie que dans un grand nombre de cas, l'incendie sera stoppé très rapidement, et ne se développera pas. Selon les statistiques, les mesures de protection actives et l'intervention des pompiers mises en oeuvre dans le bâtiment ont été évaluées pour déterminer la probabilité d'un incendie important. C'est pourquoi, selon les mesures de protection actives (sprinklers, détection, ...) et passives (compartimentage) mises en oeuvre dans le bâtiment, l'activité dans le bâtiment et l'intervention des pompiers, une charge calorifique est déterminée à partir d'une probabilité cible. Cette procédure est développée et détaillée en section 5.

2.3 Méthode de calcul du développement du feu

Il existe différents niveaux de méthodes de calcul de développement du feu :

- Modèles simplifiés : méthodes d'Hasemi et d'Heskestadt principalement
- Modèle de zones : ces modèles prennent en compte tous les principaux paramètres ayant une incidence sur le feu.
- Modèles de champs : trop complexes pour être utilisés dans une procédure générale. Cependant, les modèles de champs sont les seuls outils valables pour une géométrie complexe [19].

Les hypothèses des modèles à une zone sont liées à un feu généralisé avec une température uniforme dans le compartiment, tandis que celles des modèles à deux zones sont liées à une couche de fumée stratifiée provenant d'un feu localisé.

Le paramètre principal du développement du feu est le débit calorifique (en anglais RHR : rate of heat release). Il dépend de la taille et de l'activité du compartiment, ainsi que du temps. Le feu est initialement un feu localisé, en phase de pré-flashover. Le début de cette phase est caractérisé par une croissance du feu qui a été évaluée selon une hypothèse de feu en t^2 (avec t : temps en seconde). Ceci signifie que le débit calorifique est défini par une équation parabolique. Les bâtiments sont classés en 4 catégories selon la vitesse de propagation du feu : lent, moyen, rapide et ultra-rapide. Le débit calorifique atteindra une valeur maximale correspondant à un état stationnaire déterminé par des conditions de contrôle par le combustible ou par la ventilation.

Il est nécessaire de connaître l'évolution du débit calorifique et de déterminer si le feu va se développer jusqu'au flashover ou s'il restera localisé. Dans ces conditions, un modèle à deux zones est utilisé pour estimer l'effet général de la couche de fumée. L'action locale au voisinage du feu est également étudiée grâce à des modèles empiriques développés dans le cadre d'une recherche précédente « feu naturel dans des compartiment de grandes dimensions » [8]. Hasemi [17] a réalisé une étude expérimentale pour déterminer les actions thermiques localisées provenant d'un feu, à partir desquelles une méthode simplifiée a été développée. La combinaison des deux modèles permet la détermination du champ de température proche du feu et éloigné du feu.

2.4 *Comportement au feu des structures*

Le transfert thermique aux éléments de structure doit être calculé à partir de cette action thermique. Des modèles de complexité différente peuvent être utilisés. A partir du champ de température dans la structure et de la combinaison des charges au feu en cas d'incendie, le comportement au feu de la structure peut être évalué grâce à des modèles comportant également différents niveaux.

Des modèles simplifiés pour une analyse par élément peuvent être appliqués. Généralement, ces modèles sont basés sur la notion de température critique. Si la température d'échauffement est inférieure à la température critique, la stabilité est garantie ; si la température d'échauffement est plus élevée que la température critique, la ruine est possible. Il s'agit d'un critère simple de « vrai ou faux » pour la stabilité au feu. L'objectif est atteint si le temps pour atteindre la ruine est supérieur à la durée d'exposition au feu naturel requise.

Des modèles plus sophistiqués, basés par exemple sur des calculs aux éléments finis, peuvent être utilisés. Les résultats du modèle sont généralement exprimés en termes de déformation pendant la durée entière du feu. Dans certains cas, le critère de performance (destiné à mesurer à quel niveau les objectifs sont atteints) peut être donné en termes de déformation.

La connaissance du comportement au feu de la structure tient compte d'une évaluation s'appuyant sur des critères de performance en termes de déformation limitée ou de dommages subis par la structure.

Le choix sur la performance à atteindre pour les calculs dépendra des conséquences de la ruine et de la fonction du bâtiment. Pour certains immeubles de grande hauteur, ceci peut signifier qu'il ne se produira pas de ruine pendant toute la durée de l'incendie.

Les caractéristiques de ces modèles sont développées dans la Partie 3.

2.5 *Données exigées*

Pour appliquer cette méthodologie, les caractéristiques du bâtiment doivent être connues. Cette méthodologie est appliquée compartiment par compartiment. Le compartiment doit être défini non seulement en termes de géométrie, mais aussi en termes de caractéristiques thermiques des murs qui peuvent accumuler et transférer une grande partie de l'énergie dégagée par le feu, et encore en termes d'ouvertures qui permettent l'échange d'air avec l'extérieur du compartiment. Quelques règles et tableaux sont donnés dans le chapitre 3 pour déterminer toutes ces données.

3. CARACTERISTIQUES DU COMPARTIMENT DU FEU

3.1 *Introduction*

Dans l'approche de la sécurité incendie basée sur le feu naturel, les calculs concernant la sécurité incendie sont basés sur des actions thermiques déterminées physiquement. Contrairement au calcul conventionnel, les paramètres comme l'importance de la charge calorifique, le taux de dégagement de chaleur et le degré de ventilation jouent un rôle important dans le calcul basé sur le feu naturel. Dans la plupart des bâtiments, le nombre de scénarios possibles d'incendie est infini et doit être réduit. Seuls des scénarios d'incendie réalistes les plus défavorables seront étudiés. Si les scénarios d'incendie de calcul sont choisis, un certain nombre de modèles incendie sont disponibles pour calculer les actions thermiques.

3.2 Limites du compartiment

Dans le concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel, le développement du feu est décrit dans le compartiment. On part de l'hypothèse que le feu ne s'étendra pas aux autres compartiments. Cela dépend du comportement du feu des constructions voisines (planchers, murs – y compris les portes –, etc.).

Il est nécessaire de comprendre ce comportement pour évaluer leur capacité à agir comme des obstacles à la propagation du feu.

Les options suivantes sont disponibles :

- Essais ad-hoc : l'élément peut être exposé dans un four à une courbe température-temps calculée avec des modèles de feu basés sur les scénarios de feu les plus défavorables.
- Jugement expert : cette approche utilise les données d'essais disponibles résultant d'essais de résistance au feu conventionnel ISO sur des éléments séparatifs.
- Utilisation directe d'exigences ISO : les règlements nationaux courants exigent une certaine résistance au feu conventionnel ISO pour les murs, les plafonds, les portes et les planchers, dépendant de l'utilisation et de la géométrie du bâtiment.

Les deux premières options peuvent être utilisées pour un nombre limité d'éléments séparatifs et entraînent des coûts élevés. Dans la pratique, c'est la troisième option qui est le plus souvent utilisée.

3.3 Parois : caractéristiques thermiques

La perte de chaleur hors du compartiment est un facteur important pour la détermination de la température. Les pertes de chaleur aux frontières du compartiment se produisent par convection et rayonnement (à travers les ouvertures) et par conduction (à travers les murs). Les caractéristiques thermiques des parois doivent être connues.

Les trois paramètres principaux caractérisant les propriétés thermiques d'un matériau sont :

- la chaleur spécifique c_p
- la densité ρ
- la conductivité λ .

La conductivité et la chaleur spécifique dépendent de la température.

Dans les modèles simplifiés, seule l'inertie thermique, appelée facteur b , est utilisée. Le facteur b est donné par l'équation suivante (3.1), à partir des propriétés thermiques :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (3.1)$$

- **Pour le calcul du facteur b , la densité ρ , la capacité spécifique c_p et la conductivité thermique λ de la frontière du compartiment peuvent être prises à température ambiante. [1].**

Dans le cas de parois composées de plusieurs matériaux, il est conseillé de déduire le facteur b selon la méthode suivante :

- Lorsqu'un matériau (2) est isolé par un matériau dense (1), alors $b_1 < b_2$ est le facteur b du matériau 1 : $b = b_1$.
- Dans le cas contraire, si $b_1 > b_2$, nous pouvons définir une épaisseur limite pour le matériau 1 égale à (3.2) :

$$S_{1,\text{lim}} = \sqrt{\frac{t_d \lambda_1}{c_1 \rho_1}} \quad \text{où } t_d \text{ est le temps nécessaire pour atteindre la phase décroissante} \quad (3.2)$$

Le facteur b est alors déterminé par :

$$\text{Si } s_1 > s_{1,\text{lim}}, \text{ alors } b = \frac{s_1}{s_{1,\text{lim}}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,\text{lim}}}\right) b_2$$

Le tableau 3.1 donne les caractéristiques des matériaux les plus communément utilisés pour différentes températures.

Matériau	Température (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg°K)
Béton normal	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
Béton léger	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
Acier	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
Laine céramique	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
Ciment	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
Silicate de calcium	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
Bois	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
Brique	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
Verre	20	0,78	2700	840

Tableau 3.1 : Caractéristiques thermiques des matériaux

3.4 Caractéristiques des ouvertures

Les ouvertures dans un local clos peuvent consister en fenêtres, portes et ouvertures dans le toit. La sévérité du feu dans un local clos dépend de la surface d'ouvertures.

Le facteur d'ouverture O utilisé dans les modèles simplifiés est défini selon l'équation (3.3) :

$$O = \frac{A_w \sqrt{H}}{A_t} \quad (3.3)$$

Lorsque plusieurs ouvertures verticales doivent être considérées, la surface globale et une hauteur équivalente doivent être utilisées. Elles sont déterminées par les équations (3.4) et (3.5) :

$$A_w = \sum A_{w_i} \quad (3.4)$$

$$H = \frac{\sum A_{w_i} H_i}{A_w} \quad (3.5)$$

où A_w est la surface d'ouverture, H est la hauteur d'ouverture et i est relatif à l'ouverture n°i.

3.5 Ventilation mécanique

L'utilisation de la pressurisation est un moyen de protection intéressant pour les cages d'escalier. La ventilation mécanique est également souvent employée pour les systèmes d'évacuation de la chaleur et des fumées (SHEVS : Smoke and Heat Exhaust Ventilation System).

4. CARACTERISTIQUES DU FEU

L'objectif de ce chapitre est de fournir toutes les informations nécessaires à un bureau d'étude pour faire face à un problème d'incendie. La première donnée nécessaire pour concevoir un bâtiment contre l'incendie est de définir l'énergie qui va affecter la structure. L'une des solutions serait de réaliser un essai de feu réel dans le bâtiment. Ceci n'est pas applicable en raison de son coût et, de plus, ne fournirait des informations que pour l'un des nombreux scénarios de feu qui pourraient se produire dans le bâtiment. Les informations fournies par les essais au feu, les modèles de développement du feu et les modèles structurels ont été combinés pour obtenir une caractérisation du feu pour différents scénarios.

4.1 Charge calorifique

Le problème principal est de savoir quelle charge calorifique doit être prise en compte dans le développement du feu. Il est très rare que la charge calorifique puisse être déterminée de façon déterministe. Dans ce cas, elle doit être définie de façon statistique.

4.1.1 Approche déterministe

La charge calorifique Q dans un compartiment est définie comme l'énergie totale susceptible d'être dégagée en cas d'incendie. Une partie de l'énergie totale sera utilisée pour échauffer le compartiment (parois et air interne) ; le reste de l'énergie sera évacué par les ouvertures. Les composants du bâtiment tels que les revêtements des murs et des plafonds, et son contenu, tel que le mobilier, constituent la charge calorifique. Divisée par la surface au sol, la charge calorifique Q donne la densité de charge calorifique q_f .

Dans l'Eurocode 1, la densité de charge calorifique caractéristique est définie par l'équation (4.1) :

$$q_f = \frac{1}{A_f} \sum_i (\psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad (4.1)$$

où :

M_i est la masse du matériau i (kg)

H_{ui} est la valeur énergétique nette du matériau i (MJ/kg) (voir tableau 4.1)

m_i est le facteur décrivant le comportement de combustion du matériau i

ψ_i est le facteur d'évaluation de la charge calorifique protégée du matériau i

A_f est la surface au sol du compartiment [m^2]

$H_{ui} \cdot M_i$ représente la quantité totale d'énergie contenue dans le matériau i et évacuée supposant une combustion complète. Le facteur 'm' est un facteur (sans dimension) compris entre 0 et 1, représentant l'efficacité de combustion ; $m = 1$ correspond à la combustion complète et $m = 0$ correspond au cas des matériaux qui ne contribuent pas au feu.

Une valeur de $m = 0,8$ est suggérée en l'absence de données précises. Pour le bois, une valeur de 17,5 MJ/kg est suggérée pour H_u , conduisant à 14 MJ/kg pour (m_{Hu}).

Produits solides		
Bois		17,5
Autres matériaux cellulosiques		20
▪	Vêtements	
▪	Liège	
▪	Coton	
▪	Papier, carton	
▪	Soie	
▪	Paille	
▪	Laine	
Carbone		30
▪	Anthracite	
▪	Charbon	
▪	Houille	
Produits chimiques		
Série des alcanes		50
▪	Méthane	
▪	Ethane	
▪	Propane	
▪	Butane	
Série des oléfines		45

Produits solides	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ethylène ▪ Propylène ▪ Butène 	
Série des aromatiques <ul style="list-style-type: none"> ▪ Benzène ▪ Toluène 	40
Alcools <ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthanol ▪ Ethanol ▪ Alcool éthylique 	30
Carburants <ul style="list-style-type: none"> ▪ Essence, pétrole brut ▪ Diesel 	45
Polymères <ul style="list-style-type: none"> ▪ Polyéthylène ▪ Polystyrène ▪ Polypropylène 	40
ABS (plastique)	35
Polyester (plastique)	30
Polyisocyanerat et polyuréthane (plastiques)	25
Polychlorure de vinyle, PVC (plastique)	20
Bitume, asphalte	40
Cuir	20
Linoléum	20
Pneus	30
NOTE : Les valeurs données dans ce tableau ne sont pas applicables pour calculer le contenu énergétique des carburants	

Tableau 4.1 : Valeur énergétique nette de matériaux combustibles H_u (MJ/kg) recommandée pour le calcul de la charge calorifique

4.1.2 Approche statistique

L'approche statistique est valable uniquement pour des types de bâtiments dans lesquels des quantités similaires de charge calorifique sont présentes. Dans ces cas, la densité de charge calorifique suit une distribution statistique donnée. En pratique, un bon accord est obtenu avec une distribution de Gumbel type I.

Les valeurs (pour 80, 90 et 95 % fractiles) sont calculées à partir de cette distribution. Les valeurs du tableau 4.2 sont issues de valeurs généralement acceptées et provenant de documents internationaux [2, 21, 22]. Ces valeurs sont données dans le tableau ci-dessous pour un certain nombre de bâtiments.

	<i>Ecart-type</i>	<i>Moyenne</i>	<i>80 % fractile</i>	<i>90 % fractile</i>	<i>95% fractile</i>
Appartement	117	780	860	930	1000
Hôpital	135	450	550	630	700
Hôtel (chambre)	87.5	350	410	460	510
Bibliothèque	840	1200	1800	2300	2760
Bureau (standard)	225	450	620	740	870
Ecole	140	350	450	530	610
Centre commercial	180	600	730	840	930
Théâtre (cinéma)	90	300	365	420	460
Transport (espace public)	30	100	120	140	160

Tableau 4.2 : Données de densité de charge calorifique pour différents bâtiments [MJ/m²] (correspondant à une distribution de Gumbel type I)

4.2 Type de feu

Il est également nécessaire de savoir quelle quantité de la charge calorifique totale va brûler en cas d'incendie et comment cela va affecter la courbe température-temps se produisant dans le scénario.

Les incendies (excepté les incendies criminels et les explosions, qui ne sont pas le but de la recherche) ne débutent jamais en même temps dans la totalité d'un compartiment. Ils débutent toujours par un feu localisé qui, dans certaines conditions, se développera jusqu'à se généraliser.

Les différences principales entre un feu localisé et un feu généralisé sont données dans le tableau 4.3.

	<i>Charge calorifique</i>	<i>Température des gaz</i>
Feu localisé	Seule une partie du compartiment est soumise au feu	Deux zones (deux courbes température-temps)
Feu généralisé	La charge calorifique est répartie uniformément dans tout le compartiment	Une zone (une courbe température-temps)

Tableau 4.3 : Différences entre un feu localisé et un feu généralisé

Dans les cas où la totalité du compartiment est soumise au feu, on suppose une température uniforme des gaz chauds. Dans le cas d'un feu généralisé, l'ensemble des combustibles présents brûlent, de telle sorte que la totalité du compartiment est remplie de fumée, des produits de la combustion et d'air qui se mélangent si bien que le gaz dans la totalité du compartiment peut être considéré comme homogène et représenté par une seule température. Le chapitre 6 décrit en détail une méthode permettant de déterminer la (les) courbe(s) température-temps (T-t) devant être utilisée(s) pour le comportement au feu de la structure en cas d'incendie.

4.3 Feu de calcul

Une fois que la charge calorifique a été caractérisée, il est nécessaire de savoir à quelle vitesse la charge calorifique va brûler. Ceci va conduire au débit calorifique (RHR).

4.3.1 Contrôle du feu par le combustible et contrôle par la ventilation

La charge calorifique définit l'énergie disponible mais la température des gaz chauds lors d'un incendie dépend du débit calorifique (RHR). La même charge calorifique brûlant très rapidement ou bien lentement peut conduire à des courbes température-temps complètement différentes.

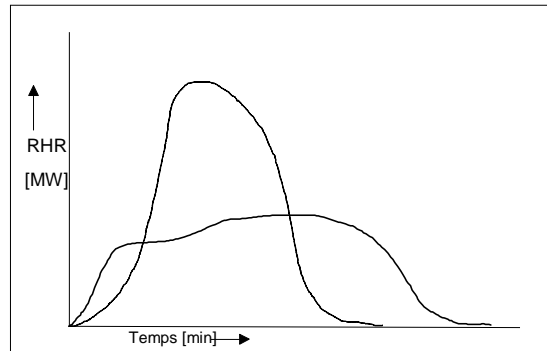


Figure 4.1 : Deux courbes de débit calorifique (RHR) différentes mais correspondant à la même charge calorifique.

Le débit calorifique est la source de croissance de la température des gaz chauds, et la cause principale de la propagation des gaz et de la fumée. Un incendie type commence par un feu d'intensité faible puis connaît une phase de croissance. Deux phénomènes peuvent se produire lors de la phase de croissance, selon qu'il subsiste ou non suffisamment d'oxygène pour alimenter la combustion :

- lorsque la taille du feu atteint sa valeur maximum sans limitation d'oxygène, le débit calorifique est limité par la charge calorifique disponible (contrôle par le combustible) ;
- la taille des ouvertures dans le compartiment est trop faible pour permettre une entrée d'air suffisante, l'oxygène disponible limite le débit calorifique (contrôle du feu par la ventilation).

Les deux types de feu peuvent conduire à un « flashover ».

Cet important phénomène, le « flashover », marque la transition d'un feu localisé à un feu impliquant tout le combustible exposé dans le compartiment. Les deux régimes sont illustrés sur la figure 4.2, qui présente les graphiques du taux de combustion en fonction du paramètre de ventilation $A_w \sqrt{h}$, avec A_w la surface d'ouverture et h la hauteur d'ouverture. Les graphiques sont donnés pour différentes densités de charge calorifique. Commenant dans le côté gauche de la figure dans le régime de contrôle par la ventilation, avec un paramètre de ventilation croissant, le taux de combustion augmente jusqu'à atteindre la valeur limite déterminée par la densité de la charge calorifique et demeure alors approximativement constante (zone de contrôle par la combustion).

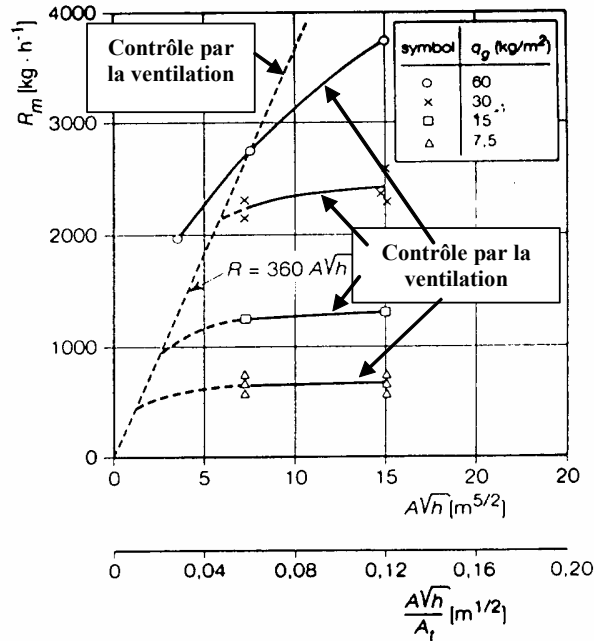


Figure 4.2 : Taux de pyrolyse pour différentes densités de charge calorifique.

4.3.2 Débit calorifique de calcul

La croissance du débit calorifique jusqu'à la valeur maximale (voir figure 4.3) est donnée par (4.2) :

$$RHR = (t / t_\alpha)^2 \quad (4.2)$$

où :

RHR = débit calorifique du feu pendant sa phase de croissance (MW)

t = temps

t_α = constante de temps donné dans la figure 4.4 (s)

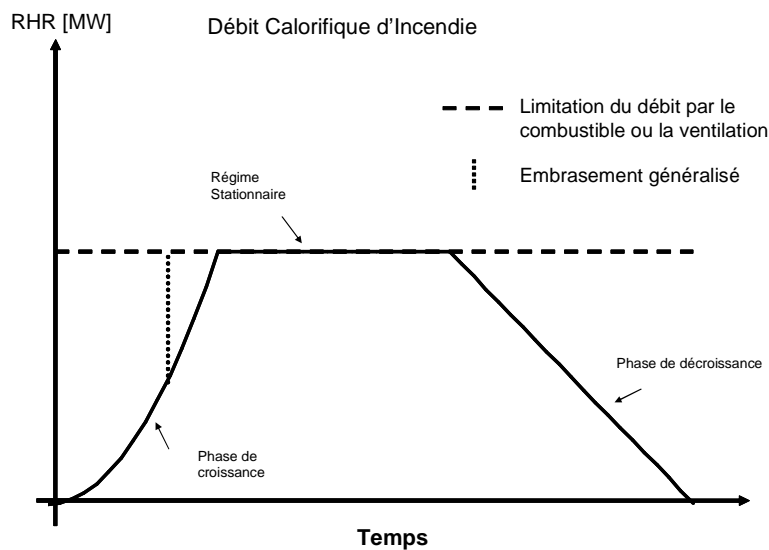


Figure 4.3 : Débit calorifique en fonction du temps

Trois phases sont reconnues : croissante, stationnaire (post flashover) et décroissante.

Le paramètre de croissance du feu donné dans les normes [1, 2] varie selon les types de bâtiments ; des informations sont données en figure 4.4 pour la classification et la détermination de ce paramètre.

Après la phase de croissance, la courbe de débit calorifique (RHR) suit un plateau horizontal avec une valeur maximale de RHR définie par le combustible (voir figure 4.4) ou par la ventilation.

Dans [1, 2] et [7], cette phase de décroissance est supposée linéaire. Des formules sont données pour le calcul du temps du début de la phase de décroissance et la durée de cette phase. D'après des résultats d'essais, on peut estimer que cette phase de décroissance commence lorsqu'approximativement 70 % de la charge calorifique totale a été consommée.

La figure 4.4 donne la proposition de courbe RHR du projet NFSC. La courbe inclut la phase de croissance, la phase stationnaire et la phase de décroissance.

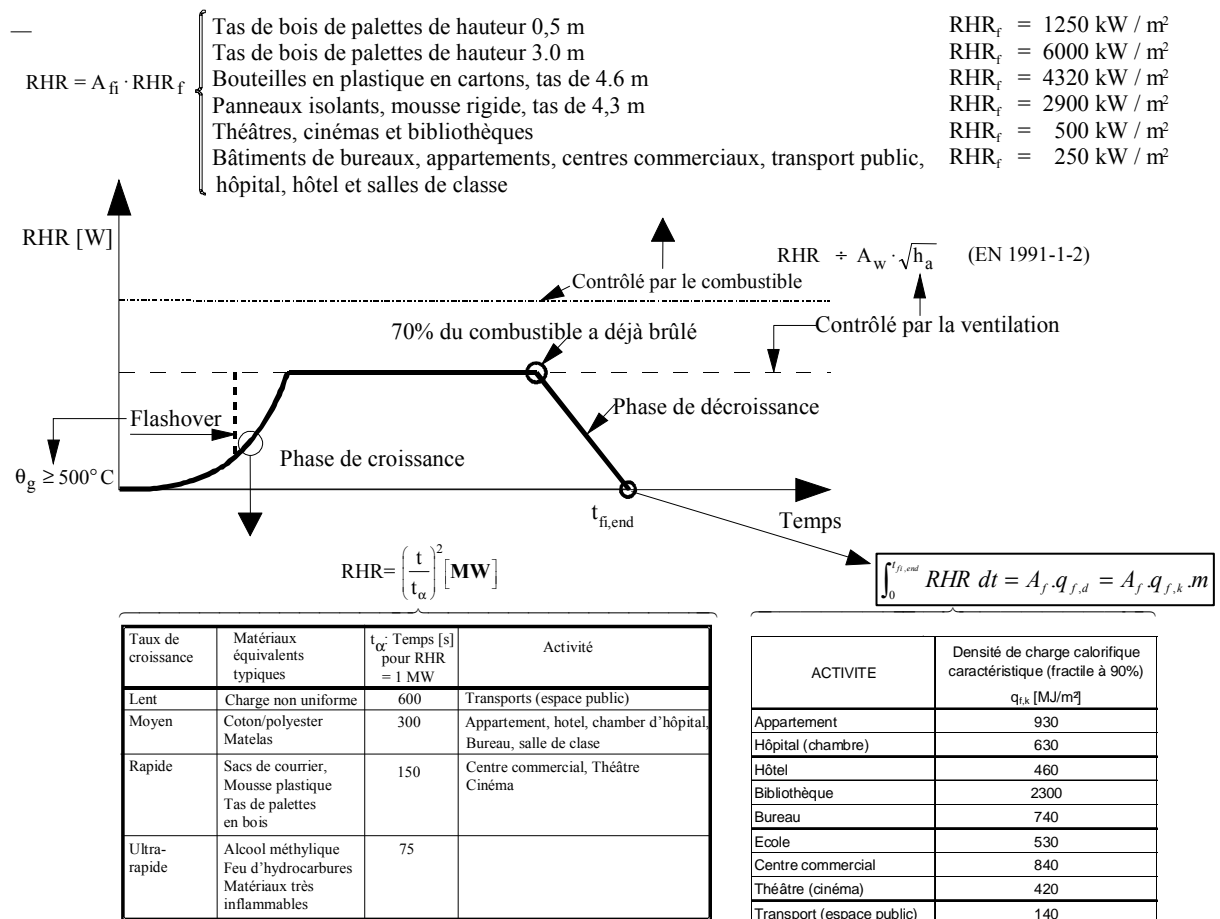


Figure 4.4 : Débit calorifique de calcul (1)

4.3.3 Données expérimentales

Une autre manière d'obtenir la courbe de débit calorifique est de réaliser un essai. Les techniques de mesure des débits calorifiques (excepté dans une bombe calorifique) n'étaient pas disponibles il y a quelques années, jusqu'à ce que le principe de calorimétrie par consommation d'oxygène ait été développé. Les méthodes précédentes nécessitaient la mesure directe d'enthalpie, ce qui est très difficile à réaliser correctement. Cependant, la technique par consommation d'oxygène a permis d'effectuer ces mesures plus facilement. Le principe de consommation d'oxygène établit que, avec un facteur d'incertitude réduit, la chaleur dégagée par la combustion de n'importe quel combustible courant est lié uniquement à la masse d'oxygène provenant de sa combustion [6]. Cette technique a été utilisée et a permis d'établir une base de données des résultats d'essais. Différentes sources d'information sont disponibles dans la littérature pour obtenir des données sur les valeurs de débit calorifique [3, 4, 5, 6].

Le logiciel HAZARD [5], modèle de simulation à deux zones, contient une base de données fournissant des informations sur le débit calorifique de différents produits. Ces produits sont de ceux que l'on trouve généralement dans les foyers, comme les chaises, les télévisions et les arbres de Noël. Ceci conduit évidemment à une limitation de l'utilisation du logiciel, bien que dans son champ d'application, il semble être une très bonne source d'information, étant donné qu'il inclut chaque phase d'une courbe de débit calorifique. Argos [4] est une autre base de données dans le cadre d'un programme de simulation du feu. Dans Argos, on trouve différentes équations pour des feux de solides, des feux de liquide et des feux couvants. Ces équations définissent le débit calorifique comme une fonction de la vitesse de diffusion du feu dans les directions verticale et horizontale. Ces valeurs numériques, valables pour différents matériaux et objets, sont données dans la base de données Argos.

Une autre source d'information provenant des résultats d'essais est le document intitulé «Fire ignition», réalisé par l'Université de Lund [3]. Il est présenté comme la base de données HAZARD mais contient davantage de résultats. Dans ce document, on peut trouver des informations non seulement sur les objets domestiques mais également sur différents types de véhicules. Le CITCM en France a réalisé des essais au feu sur des voitures récentes (fabriquées en 1996) [9], sur des chambres d'hôtel et sur des meubles réels et a mesuré le débit calorifique. Ces données expérimentales sont très intéressantes, car la majorité des essais mentionnés dans la littérature a été réalisée avec des bûchers de bois comme combustible.

5. DEVELOPPEMENT DU FEU

5.1 Introduction

Lorsqu'on simule de façon numérique le développement du feu, différentes simplifications de la dynamique du feu peuvent être réalisées. Ce chapitre présente les modèles à appliquer en situation de pré-flashover (modèles de feu localisé et modèles à 2 zones) et en situation de post-flashover (feu généralisé). Les modèles de champs (CFD : Computational Fluid Dynamics) ne sont pas abordés dans ce chapitre. Ils sont trop complexes et nécessitent trop de temps pour être utilisés comme un outil simple.

5.2 Feu localisé

Dans un feu localisé, il y a accumulation de produits combustibles dans une couche sous le plafond (couche supérieure), avec une interface horizontale entre cette couche chaude et la couche inférieure où la température des gaz demeure beaucoup plus basse.

Cette situation est bien représentée par un modèle à deux zones, utilisé dans toutes les situations de pré-flashover. En plus du calcul de l'évolution de la température des gaz, ces modèles sont utilisés pour connaître la propagation des fumées dans les bâtiments et pour estimer la sécurité des personnes en fonction de la hauteur de la couche de fumée, de la concentration des gaz toxiques, du flux radiatif et de la densité optique.

L'action thermique sur les éléments horizontaux situés au-dessus du feu dépend également de leur distance par rapport au foyer. Elle peut être estimée par des modèles spécifiques déterminant l'évaluation de l'effet local sur les éléments adjacents, comme la méthode d'Heskestad ou d'Hasemi (17).

5.2.1 Modèles à deux zones

Le terme « modèle de zones » est le nom donné aux modèles calculant le développement de la température des gaz dans le temps à partir des équations de conservation de la masse et de l'énergie pour chaque zone du compartiment. Ils sont basés sur l'hypothèse fondamentale que la température est uniforme dans chaque zone.

Les modèles de zones ne donnent pas seulement l'évolution de la température des gaz dans le compartiment, mais aussi des informations supplémentaires comme la température dans les murs ou la vitesse des gaz à travers les ouvertures.

Les données que l'on doit fournir à un modèle de zones sont :

- des données géométriques comme les dimensions du compartiment, des ouvertures et des séparations ;
- les propriétés des matériaux composant les parois ;
- les données concernant le feu comme la courbe de débit calorifique (RHR), le taux de pyrolyse, la chaleur de combustion du combustible.

Dans un modèle de zones, les équations exprimant les bilans de masse et d'énergie sont écrites pour chacune des deux couches et les échanges entre les deux couches sont pris en compte par des modèles d'entraînement d'air.

Comme résultat de la simulation, la température des gaz est donnée pour chacune des deux couches, ainsi que des informations sur les températures des murs et le flux passant par les ouvertures. L'évolution de l'épaisseur de chaque couche constitue un résultat important. L'épaisseur de la couche inférieure, qui conserve une température relativement basse et ne contient pas de produits de combustion, est très importante pour estimer la tenabilité du compartiment pour les occupants. La figure 5.1 montre comment un compartiment est modélisé par un modèle à deux zones et représente différents termes d'équilibre d'énergie et de masse.

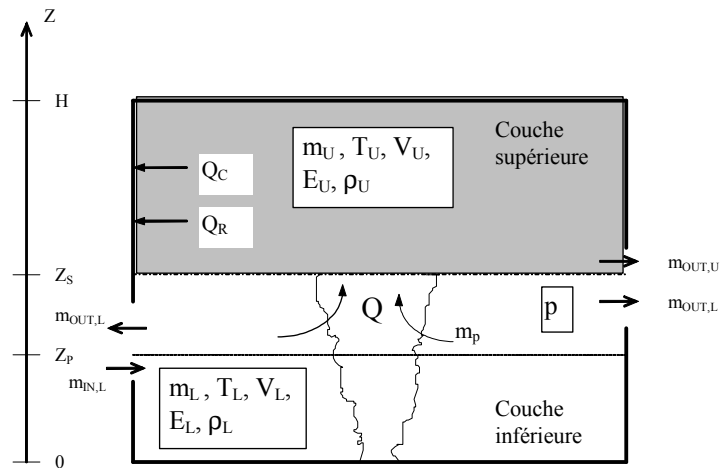


Figure 5.1 : Un compartiment dans un modèle à deux zones

La figure 5.1 est typique d'une situation simple où le compartiment échange la masse et l'énergie uniquement avec l'extérieur. Ces types de modèles permettent d'analyser des bâtiments plus complexes dans lesquels le compartiment d'origine a des échanges de masse et d'énergie avec l'extérieur mais aussi avec les autres compartiments du bâtiment. Cela présente un intérêt particulier pour analyser la propagation de fumée du compartiment d'origine vers d'autres compartiments adjacents. Une telle situation, analysée par un modèle multi-compartiments à deux zones, est décrite sur la figure 5.2.

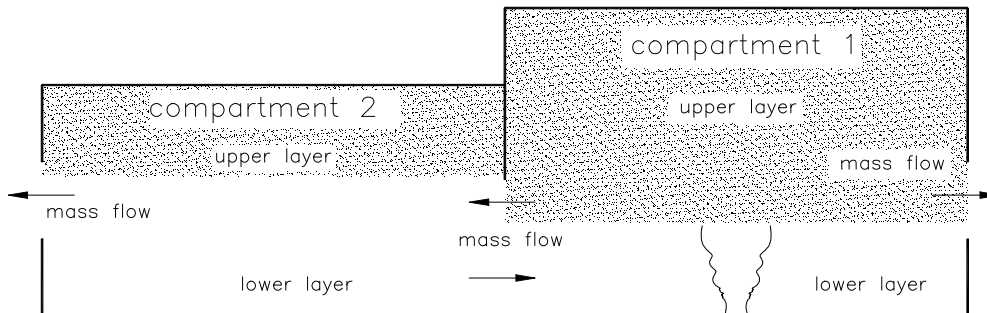


Figure 5.2 : Un compartiment dans un modèle multi-compartiments à deux zones

5.2.2 La méthode d'Heskestad

L'action thermique d'un feu localisé peut être évaluée en utilisant la méthode d'Heskestad (1) lorsque les flammes ne touchent pas le plafond ou dans le cas d'un feu extérieur.

La longueur de flamme L_f d'un feu localisé (voir figure 5.3) est donnée par :

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Dans le cas $L_f < H$ ou pour un feu extérieur, la température $\Theta(z)$ dans le panache le long de l'axe vertical de la flamme est donnée par :

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/5} (z-z_0)^{-5/3}$$

où :

D est le diamètre du feu [m], voir figure 5.3

Q est le débit calorifique [W] du feu
 Q_c est la partie convective du débit calorifique [W], avec $Q_c = 0,8 Q$
 z est la hauteur [m] le long de l'axe de la flamme, voir figure 5.3
 H est la distance [m] entre la source du feu et le plafond, voir figure 5.3

Note :

Cette formule n'est valide que pour des températures de flamme inférieures ou égales à 900°C.

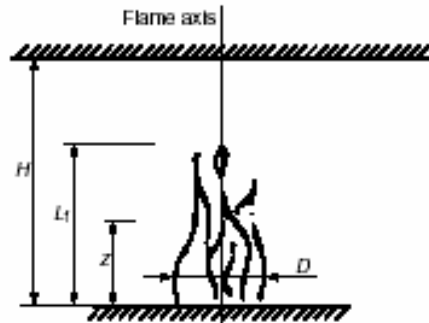


Figure 5.3 : Modèle de feu localisé pour des flammes n'atteignant pas le plafond

5.2.3 Méthode Hasemi [1, 17]

La méthode Hasemi [1, 17] est un modèle simple pour l'évaluer les effets d'un feu localisé sur des éléments de structure horizontaux situés au-dessus du feu. Elle est basée sur les résultats d'essais réalisés à l'Institut de Recherches du Bâtiment de Tsukuba au Japon.

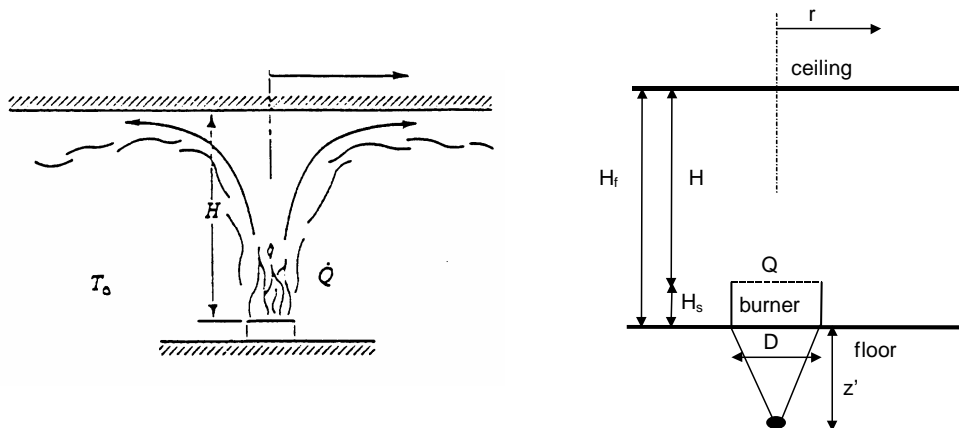


Figure 5.4 : Schéma de feu localisé et description d'un feu de Hasemi

Les données pour l'application de la méthode sont :

- Q Débit calorifique du feu [W]
- H_f Hauteur entre le plancher et le plafond [m]
- D Diamètre (ou longueur caractéristique) du feu [m]
- H_s Distance verticale entre le plancher et la source du feu [m]

Les variables sont :

- H Distance entre la source du feu et le plafond [m]
- Q^* Taux adimensionnel de dégagement de chaleur [-]
- Q_H^* Taux adimensionnel de dégagement de chaleur [-]
- z' Position verticale de la source de chaleur virtuelle, par rapport à la source du feu [m]

L_H Longueur horizontale de la flamme sur le plafond [m]
 r Distance horizontale, au plafond, à partir du centre du feu [m]

La procédure est :

Calculer H $H = H_f - H_s$ (5.1)

Calculer Q^* $Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}}$ (5.2)

Calculer Q_H^* $Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}}$ (5.3)

Calculer z' $z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3})$ $Q^* < 1,00$ (5.4)

$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5})$ $Q^* \geq 1,00$ (5.5)

Calculer $(L_H + H)/H$ $\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33}$ (5.6)

Calculer L_H à partir de la valeur calculée dans l'équation précédente et à partir de la valeur de H

Calculer la valeur du flux q'' dans (kW/m²) à une distance r, selon :

$q'' = 100$ $y < 0,30$ (5.7)

$q'' = 136,30 - 121,00 y$ $0,30 < y < 1,0$ (5.8)

$q'' = 15 y^{-3,7}$ $y > 1,0$ (5.9)

où $y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'}$ (5.10)

Le flux q'' reçu par le plafond diminue en fonction de la proportion y et augmente en fonction de Q. La figure 5.5 montre ces résultats pour le cas suivant :

$r = 0$ $H = 5$ m $D = 3$ m

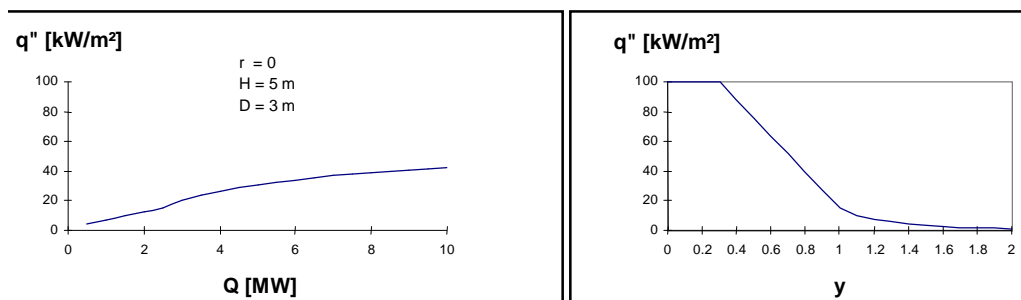


Figure 5.5 : q'' en fonction de y et Q

5.2.4 Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu localisé

Dans un feu localisé, la distribution de la température des gaz dans le compartiment peut être estimée par un modèle à deux zones. Dans ce modèle, la température des gaz dans chaque couche est calculée avec l'hypothèse qu'elle est uniforme dans chaque couche. Cette température moyenne dans la zone chaude est généralement suffisamment précise tant que des phénomènes globaux sont considérés : quantité de fumée à extraire du bâtiment, probabilité de flashover, écroulement total du toit ou du plafond, etc.

Pour l'évaluation du comportement local d'un élément de structure situé au-dessus du feu, l'hypothèse d'une température uniforme peut être insuffisante et le modèle à deux zones doit être combiné avec la méthode du feu localisé donnée au paragraphe 5.2.3.

Les températures proches de la poutre sont obtenues par – pour chaque point sur le long de la poutre - en prenant la température la plus haute estimée par chacun des modèles.

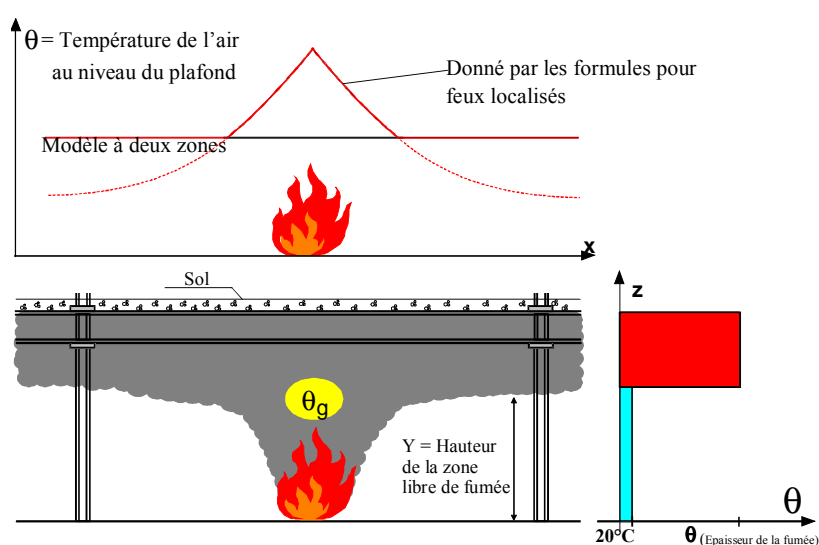


Figure 5.6 : Combinaison entre un modèle à deux zones et un modèle de feu localisé

La hauteur de la zone de fumée et les températures des gaz chauds au niveau des structures en acier à différentes distances du foyer peuvent être calculées par le modèle TEFINAF (8). Ce modèle combine un modèle à deux zones qui fournit la hauteur et la température moyenne de la zone chaude, et la méthode de feu localisé qui donne le pic de température au-dessus du feu et à différentes distances du foyer.

5.3 FEU GENERALISE

Pour modéliser un feu généralisé dans un bâtiment, il existe plusieurs types de modèles. Certains de ceux utilisés le plus fréquemment sont décrits dans ce chapitre.

Le concept de feu naturel (*i.e.* réel) est une alternative aux feu nominaux définis dans les codes normatifs (ISO, courbes hydrocarbure, ...).

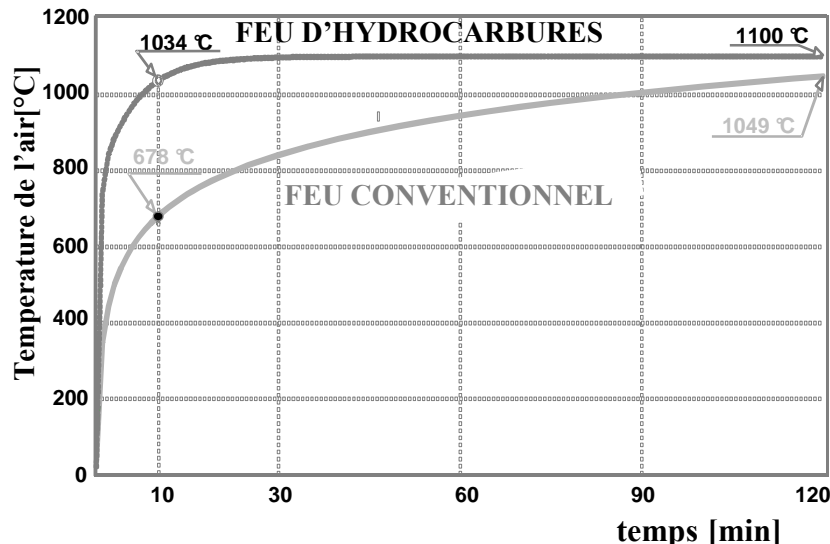


Figure 5.7 : Courbes de température pour les feux standard et hydrocarbure

Les modèles de champs (CFD) ne sont pas abordés dans ce chapitre. Ils sont trop complexes et nécessitent trop de temps et de données pour qu'on puisse les utiliser comme des outils de calcul simples.

5.3.1 Feux paramétriques

Les feux paramétriques constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un bâtiment particulier. Comme les feux nominaux, ils consistent en la détermination d'une courbe température-temps, mais ces courbes contiennent certains paramètres destinés à représenter certains aspects de la réalité.

Pour presque tous les feux paramétriques mentionnés dans la littérature, les paramètres pris en compte sont, d'une manière ou d'une autre :

- la géométrie du compartiment,
- la charge calorifique présente dans le compartiment,
- les ouvertures dans les murs et/ou dans le toit et
- le type et la nature des différents éléments de construction constituant les limites du compartiment.

Les feux paramétriques sont basés sur l'hypothèse que la température est uniforme dans le compartiment, ce qui limite leur champ d'application aux conditions de flashover dans des compartiments de dimensions modérées. Ils constituent néanmoins un pas significatif vers la considération de la nature réelle d'un feu particulier par rapport aux feux nominaux, tout en étant basés sur quelques expressions analytiques simples, c'est à dire qu'aucun outil informatique sophistiqué n'est nécessaire pour les appliquer.

Une proposition est faite dans l'annexe informative A de l'EN 1991-1-2 (1) pour un feu paramétrique. Elle est applicable pour des compartiments avec une surface au sol allant jusqu'à 500 m², sans ouverture dans le toit et pour une hauteur maximale de 4 m. Le paramètre b doit se trouver dans la gamme 100 à 2200 J/m²s^{1/2}K, et O doit être compris entre 0,02 et 0,20 (O et b sont définis ci-dessous).

Quelques corrections doivent être apportées pour améliorer la proposition de l'ENV 1991-2-2 (23). Elles sont les suivantes :

- une prise en compte plus précise de l'inertie thermique (facteur b) dans les murs constitués de différents matériaux ;
- l'introduction d'une durée minimale du feu, tenant compte d'un contrôle du feu par le combustible quand la charge calorifique est faible et que la surface des ouvertures est importante ;
- un facteur de correction qui tient compte du flux massique important par les ouvertures en cas du feu contrôlé par le combustible.

Cette nouvelle formulation du feu paramétrique est présentée ci-dessous et reste valable quel que soit le facteur b.

L'évolution de la température des gaz dans le compartiment est donnée par :

$$\Theta_g = 1.325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20^\circ \text{C} \quad (5.11)$$

avec :

$$t^* = \Gamma t \quad (5.12)$$

$$\Gamma = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (5.13)$$

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad (5.14)$$

et

t temps, en heures

A_v surface des ouvertures verticales, en m^2

h moyenne pondérée des hauteurs de fenêtre sur tous les murs, en m

A_t surface totale des parois (murs, plafond et plancher, y compris les ouvertures), en m^2

b est le facteur b en $(\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})$. Il dépend de l'inertie thermique des limites du compartiment (voir § 3.3 pour le calcul de b)

La durée de la phase de croissance est déterminée par :

$$t_{\max} = \max \left(0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O ; t_{\text{lim}} \right) \quad [\text{heure}] \quad (5.15)$$

avec :

$q_{t,d}$ valeur de la densité de la charge calorifique liée à A_t , en MJ/m^2

t_{lim} dans le cas d'un feu à faible vitesse de développement, $t_{\text{lim}} = 25$ min, dans le cas d'un feu à vitesse de développement moyenne, $t_{\text{lim}} = 20$ min et dans le cas d'un feu à vitesse de développement élevée, $t_{\text{lim}} = 15$ min.

Lorsqu'on applique l'équation 6.15, il existe deux possibilités :

- La durée de la phase croissante du feu calculée à partir du premier terme de l'équation, $0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ est plus grande que la limite choisie t_{lim} . Dans ce cas, les équations 5.11 à 5.14 et les équations 5.21 à 5.23 sont appliquées telles quelles, sans aucune modification.
- La durée de la phase croissante du feu calculée à partir du premier terme de l'équation,

$0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ est plus faible que la limite choisie t_{lim} . Dans ce cas, les équations 5.11 à 5.14 sont appliquées avec un facteur d'ouverture O_{lim} modifié, calculé comme conduisant au temps limite choisi à partir de l'équation suivante :

$$O_{lim} = 0,1 \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim} \quad (5.16)$$

Les équations 6.15 et 6.16 sont modifiées de la façon suivante :

$$t_{lim}^* = \Gamma_{lim} t \quad (5.17)$$

$$\Gamma_{lim} = \frac{(O_{lim} / 0,04)^2}{(b / 1.160)^2} \quad (5.18)$$

et t_{lim}^* est employé dans l'équation 5.11 au lieu de t^* .

Enfin, pour tenir compte de l'effet de la ventilation pendant la phase croissante, lorsque $t_d = t_{lim}$:

Si $O > 0,04$ et $q_{t,d} < 75$ et $b < 1.160$

$$\text{Alors } k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left(\frac{1.160 - b}{1.160} \right) \quad (5.19)$$

$$\text{et } d \Gamma_{lim} = k \frac{(O_{lim} / 0,04)^2}{(b / 1.160)^2} \quad (5.20)$$

La courbe température-temps pendant la phase décroissante est donnée par :

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625(t - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{pour } t_d^* \leq 0,5 \quad (5.21)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*) (t - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{pour } 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad (5.22)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(t - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{pour } 2,0 \leq t_d^* \quad (5.23)$$

Avec Θ_{max} la température maximale à la fin de la phase croissante donnée par 5.11 où $t = t_d$ donné par 5.15.

$$t_{max}^* = (0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \quad \text{pour } t_{max} > t_{lim}$$

$$x = \frac{t_{lim} \cdot \Gamma}{t_{max}^*} \quad \text{pour } t_{max} = t_{lim}$$

Un exemple des résultats (charge calorifique $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$, $b = 1.160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, facteur d'ouverture O variant de $0,04 \text{ m}^{1/2}$ à $0,20 \text{ m}^{1/2}$) est montré dans la figure 5.8.

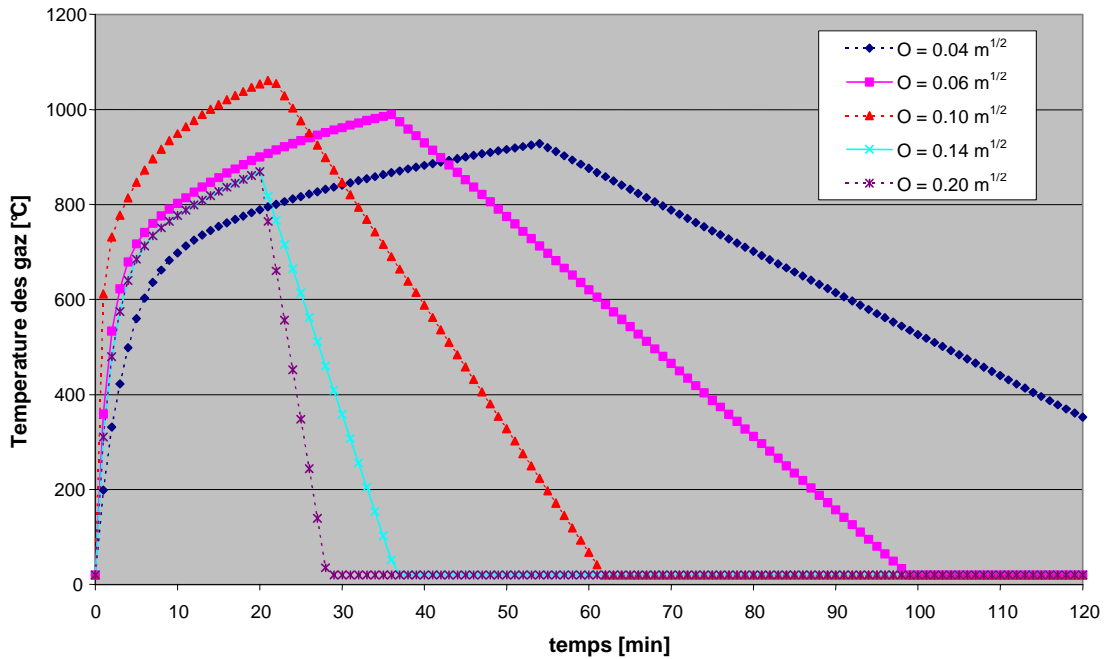


Figure 5.8 : Exemple de feux paramétriques (1)

En ce qui concerne le feu paramétrique, une comparaison a été faite entre les résultats issus d'essais [12] et ceux issus de calculs. La figure 5.9 concerne la température maximale relevée dans les gaz chauds. Le coefficient de corrélation, qui avait la valeur de 0,19 avec les formules de l'ENV 1991-2-2 [23], a maintenant une valeur de 0,83.

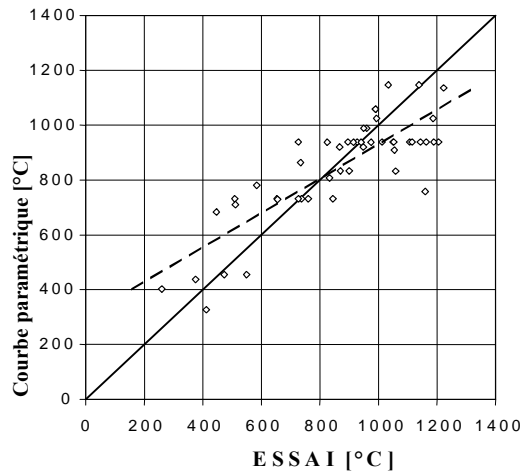


Figure 5.9 : Comparaison de la température maximale des gaz chauds dans le compartiment

5.3.2 Modèles de zones

Les modèles de zones ont déjà été présentés dans le chapitre 5.2.1, où une brève description d'un modèle à deux zones a été donnée. Le champ d'application d'un modèle à deux zones est la phase de pré-flashover du feu. Pour un feu généralisé, un modèle à une zone doit être utilisé.

5.3.3 Modèle à une zone

Le modèle à une zone est basé sur l'hypothèse fondamentale que, pendant le feu, la température des gaz chauds est uniforme dans le compartiment. Les modèles à une zone sont adaptés pour des conditions post-flashover.

Les données nécessaires sont les mêmes que pour un modèle à deux zones.

La figure 5.10 montre comment un feu de compartiment est modélisé, et représente différents termes d'échanges d'énergie et de masse.

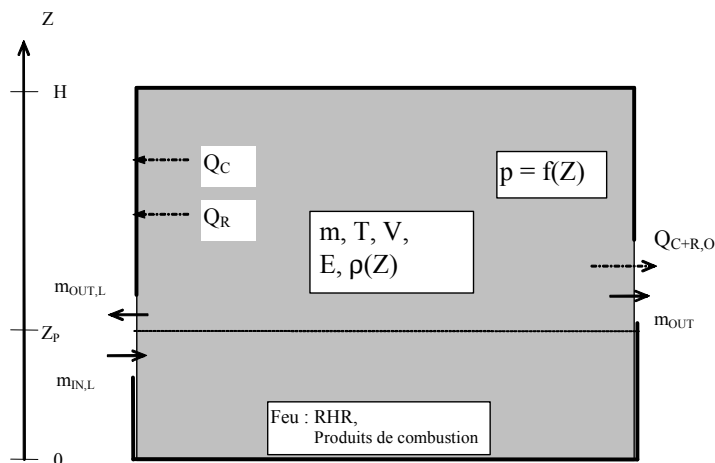


Figure 5.10 : Un compartiment dans un modèle à une zone

Dans le cadre des projets européens NFSC A & 2 [11, 12], le logiciel Ozone (basé sur un modèle de zones) a été développé à l'Université de Liège avec PROFILARBED Recherche et a été validé en prenant comme référence les résultats de 54 essais expérimentaux. La figure 5.11 donne une comparaison de la température maximale des gaz chauds mesurée lors d'un essai et calculée par le modèle. Chaque point est représentatif d'un essai et la ligne oblique est l'emplacement des points donnant une corrélation parfaite. La ligne en pointillé est la régression linéaire.

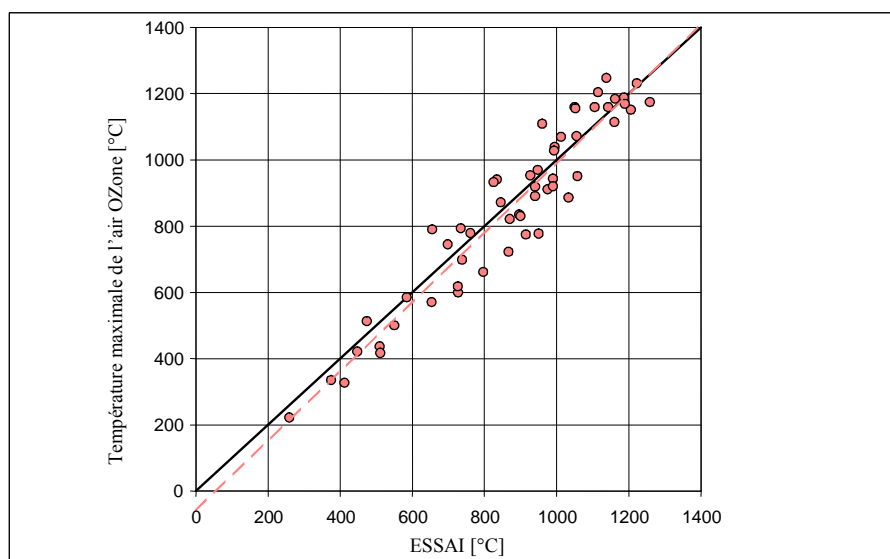


Figure 5.11 : Comparaison de la température maximale des gaz chauds dans le compartiment

Une autre comparaison est représentée sur la figure 5.12. Pour chaque essai, l'évolution de la température a été calculée pour une section en acier HEB200 non-protégée, $A_m/V = 147 \text{ m}^{-1}$, d'abord à partir de la température des gaz mesurée, puis avec la température des gaz calculée. Ceci a permis d'obtenir un graphique dans lequel chaque essai est représenté par la température maximale dans la section en acier non protégée.

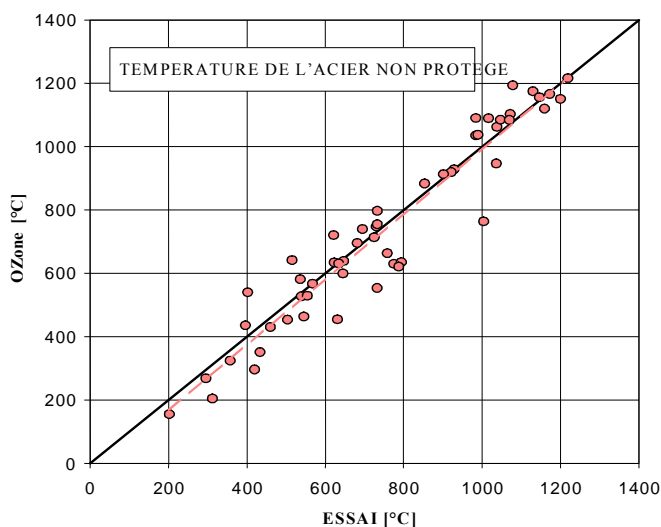


Figure 5.12 : Température maximale dans la section en acier non protégée

5.4 Combinaison entre les modèles à 1 zone et les modèles à 2 zones. Choix du modèle

Après avoir défini les caractéristiques du feu, c'est à dire la courbe du débit calorifique, la géométrie du compartiment et les caractéristiques des parois, il est nécessaire de choisir le modèle de feu naturel à appliquer selon le scénario considéré. Ce choix peut être fait suivant le domaine d'application des modèles.

Dans cette optique, on suppose que la première application doit être celle du « modèle à deux zones ». La question est comment et quand la transition de l'application du « modèle à deux zones » à celle du « modèle à une zone » se produit.

Les résultats d'un « modèle à deux zones » sont donnés sous la forme de deux variables principales :

- température de la zone supérieure T_u ;
- hauteur de l'interface des deux zones H_i .

Ces deux variables vont conditionner la simulation avec le modèle de zones (voir figure 5.15). Les quatre conditions suivantes peuvent limiter l'application d'un « modèle à deux zones » :

- condition 1 (C1) : $T_u > 500^\circ\text{C}$
La température importante des produits de combustion (plus élevée que 500°C) conduit à un flashover par une pyrolyse de l'ensemble de la charge calorifique du compartiment.
- condition 2 (C2) : $H_i < 0,2 \text{ H}$
La hauteur d'interface diminue et conduit à une très faible épaisseur de la couche inférieure, ce qui n'est pas représentatif d'un phénomène à deux zones.

La transition d'un modèle à une zone à un modèle à deux zones est représenté sur la figure 5.13.

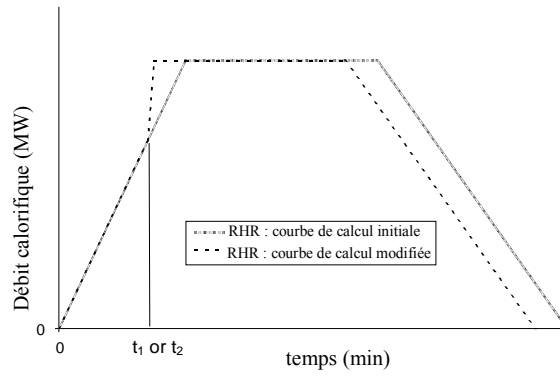


Figure 5.13 : Courbes de débit calorifique

L'approche décrite ci-dessus est présentée dans le schéma de la figure 5.14. Ce schéma montre dans quelles conditions (modélisation à deux zones ou à une zone) les courbes de température de calcul doivent être déterminées.

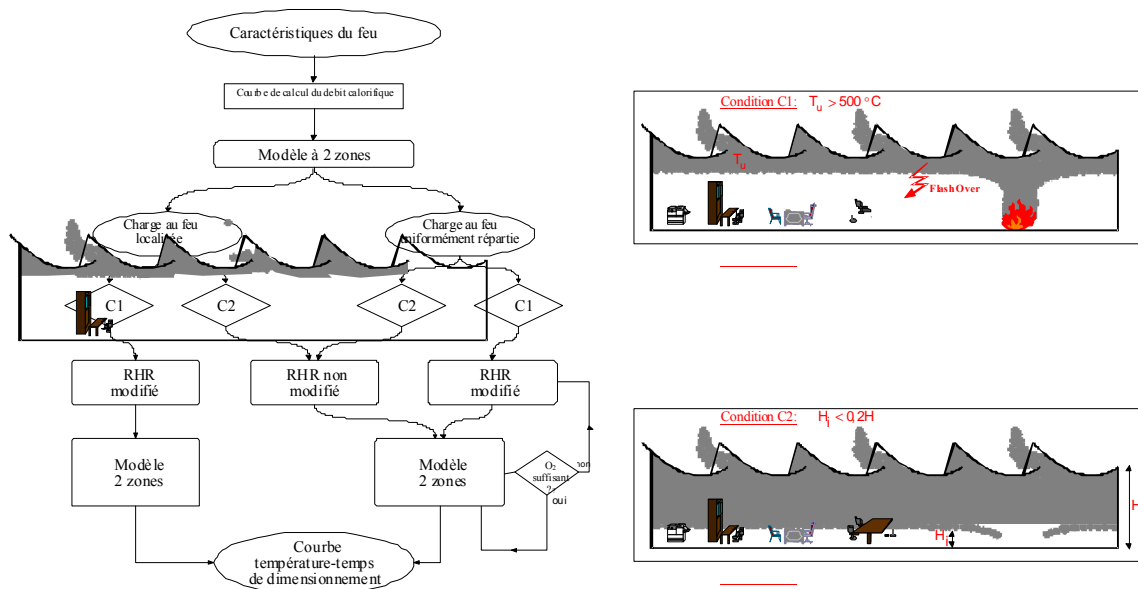


Figure 5.14 : Combinaison de modèles à une zone et à deux zones

6. ACTIONS MECANIKES SELON LES EUROCODES

En situation d'incendie, les charges mécaniques appliquées aux structures peuvent être obtenues en utilisant la formule suivante (voir relation 6.11b de l'EN 1990) :

$$E_{fi,d} = \sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ ou } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

où :

$G_{k,j}$ est la valeurs caractéristiques des actions permanentes

$Q_{k,1}$ est la valeur caractéristique de l'action variable dominante

$Q_{k,i}$: sont les valeurs caractéristiques des autres actions variables

$\Psi_{1,1}$ est le coefficient de combinaison pour l'action variable dominante

Ψ_2 est le coefficient de combinaison pour les autres actions variables

Les valeurs recommandées de Ψ_1 et Ψ_2 sont données dans le tableau 6.1.

Action	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Charges imposées dans les bâtiments, catégorie (voir EN 1991-1-1)			
Catégorie A : domestique, zones résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : zones de bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C : zones de congrégation	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : zones de commerces	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : zones de stockage	1,0	0,9	0,8
Catégorie F : zones de trafic routier poids du véhicule ≤ 3 kN	0,7	0,7	0,6
Catégorie G : zones de trafic routier $30 \text{ kN} < \text{poids du véhicule} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3
Charges de neige sur les bâtiments (voir EN 1991-1-3)			
Finlande, Islande, Norvège, Suède	0,70	0,50	0,20
Autres pays membres de la communauté européenne, pour les lieux situés à une altitude $H > 1000 \text{ m}$ a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Autres pays membres de la communauté européenne, pour les lieux situés à une altitude $H \leq 1000 \text{ m}$ a.s.l.	0,50	0,20	0
Charges de vent sur les bâtiments (voir EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0

Tableau 6.1 : Valeurs recommandées des facteurs ψ pour les bâtiments

Une autre notion largement utilisée dans les méthodes de calcul des Eurocodes est le niveau de chargement pour la situation d'incendie η_{fi} qui est définie comme $\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d}$ avec E_d et $E_{fi,d}$

respectivement l'effet de calcul des actions à température normale et l'effet de calcul des actions en situation d'incendie. Elle peut être déterminée d'une manière différente par :

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

où $\gamma_{Q,1}$ est le facteur partiel pour l'action variable principale 1.

En fait, le niveau de charge η_{fi} dépend fortement du facteur $\psi_{1,1}$ qui varie en fonction des catégories de bâtiments. Dans les EN 1993-1-2 (partie feu des structures en acier) et EN 1994-1-2 (partie des structures mixtes), la figure suivante (figure 6.1) montre clairement l'influence à la fois de la proportion de charge $Q_{k,1}/G_k$ et du facteur $\psi_{1,1}$ sur le niveau de chargement.

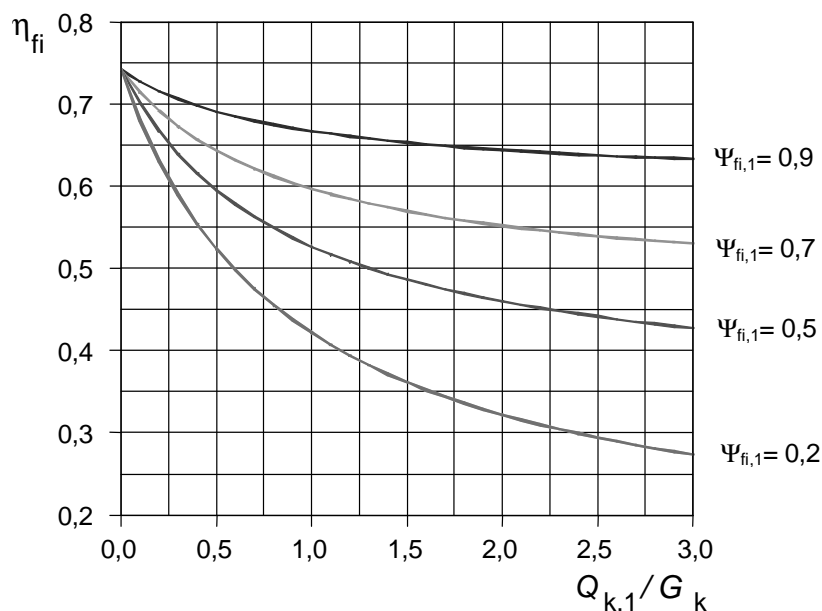


Figure 6.1 : Variation du facteur de réduction η_{fi} avec la proportion de charge $Q_{k,1}/G_k$

7. CONCLUSION

Nous avons vu dans cette partie les différents modèles disponibles pour calculer la température dans un compartiment en fonction du temps ainsi que les données nécessaires. Pour connaître la température des éléments de structure en fonction du temps, il est nécessaire de calculer le flux thermiques reçu par ces éléments.

Un transfert de chaleur convective et radiative se produit entre les gaz chauds, les flammes, les constructions voisines et les éléments de structure. Les émissivités et les coefficients de convection conditionnent le transfert de chaleur.

L'échauffement d'un élément de structure dépend du type d'élément (par exemple acier pur ou mixte acier/béton) et de la nature et de la quantité de protection au feu. Ceci constitue le sujet de la Partie 2.

Une fois connus le champ de température dans la structure et la combinaison accidentelle des charges, son comportement thermo-mécanique peut être déterminé. Ceci constitue le sujet de la Partie 3.

8. REFERENCES

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - June 1991
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second Edition - 13th April 1995
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317,517,618,832-February 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 – EUR 18867 EN
- [10] CEN; EN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 – EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN..
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function - , NFSC WG4, Zürich, March 1996
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.
Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".
Hasemi Y., Yokobayashi Y. , Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: "Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept – The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; EN1991-2-2, Eurocode 1– Basis of s design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003