

RAPPORT D'ÉTUDE INERIS-DRA-INVE N° 46055 - C70050

11/01/2007

Incendies en milieu confiné

Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35)

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)



Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35)

Incendies en milieu confiné

Direction des Risques Accidentels

Unité Incendie Ventilation

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)

Liste des personnes ayant participé à l'étude : B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel

PREAMBULE

Le présent document a été établi :

- au vu des données scientifiques et techniques disponibles ayant fait l'objet d'une publication reconnue ou d'un consensus entre experts,

- au vu du cadre légal, réglementaire ou normatif applicable.

Il s'agit de données et informations en vigueur à la date de l'édition du document, avril 2005.

Le présent document comprend des propositions ou recommandations. Il n'a en aucun cas pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'une partie prenante.

	PAGE DE VALIDATION	١			
Incendies en m	ilieu confiné : Phénoménologie	et modélis	ation des effets		
Rédaction initiale					
Auteurs	Qualité	Date	Emargement		
F. Waymel	Ingénieurs de l'unité Incendie	1-1.11-2	11. h		
N. Gobeau	Ventilation	15 101107	Hofme		
Dans le cadre de la p manuel qualité, ce	l rocédure générale qualité de l'INERIS et document a fait l'objet de relectures et d'u	en respect du un contrôle pa	u paragraphe 14.2 du ar des vérificateurs.		
Vérificateur			1		
S. Duplantier	Responsable de l'unité incendie ventilation	16117	8 feel		
Approbateur			-		
B. Faucher	Directeur de la Direction des Risques Accidentels	2010/0	+ MF		

REPERTOIRE DES MODIFICATIONS

Révision	Relecture	Application	Modifications
Version 1			

TABLE DES MATIERES

1. OBJE	CTIF ET DOMAINE D'APPLICATION	9
1.1 Cor	ntexte général	9
1.2 Obj	ectifs et limites	9
1.3 Pré	sentation du document	10
2. ELÉM	ENTS D'ACCIDENTOLOGIE	11
2.1 Que	elques accidents remarquables	11
2.1.1 Le	es espaces sans ventilation forcée	11
2.1.1.1	Incendies d'entrepôts	11
2.1.1.2	Les immeubles et ERP	12
2.1.2 Le	es espaces avec ventilation forcée	14
2.1.2.1	Le métro	14
2.1.2.2	Les tunnels	16
2.2 Ana	Ilyse de l'accidentologie	22
2.2.1 Le	es Causes	22
2.2.2 Le	es conséquences	22
3. LES F	PHÉNOMÈNES INHÉRENTS AUX INCENDIES EN MILIEU CONFINÉ	23
3.1 Les	phénomènes liés aux incendies dans les infrastructures non ventilées	23
3.1.1 La	a phase initiale d'un incendie	23
3.1.2 La	a propagation	25
3.1.2.1	Par transmission de chaleur	26
3.1.2.2	Par déplacement des substances en combustion	27
3.1.2.3	Les différentes étapes de la propagation d'un incendie en milio confiné	eu 28
3.1.3 Tr	ansition vers l'embrasement généralisé : le Flash-Over	31
3.1.3.1	Conditions d'occurrence du phénomène de flashover	31
3.1.3.2	Evènements annonciateurs d'un flashover	33
3.1.4 L'i	ncendie pleinement développé	33
3.1.5 Pł	nénomènes particuliers liés aux incendies sous-ventilés	34
3.1.5.1	Le phénomène de pulsation	35
3.1.5.2	Le back-draft	36
3.1.5.	2.1 Conditions d'occurrence	36
Réf. : INERI	S-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné	

3.1.5.2	2.2 Phénoménologie du backdraft	. 37
3.1.5.2	2.3 Paramètre influençant l'occurrence du phénomène de backdraft	. 39
3.1.5.2	2.4 Evènements annonciateurs d'un backdraft	. 41
3.1.5.3	Phénomène de reprise du développement	. 41
3.2 La d	ispersion des fumées dans les infrastructures ventilées	. 42
4. MODÉ	LISATION DES PHÉNOMÈNES	. 45
4.1 Les	modèles simples et empiriques	. 45
4.1.1 Pri	ncipe	. 45
4.1.2 Est	timation du taux d'énergie dégagée	. 45
4.1.2.1	Estimation à partir de tests expérimentaux	. 46
4.1.2.2	Evolution temporelle du taux d'énergie	. 48
4.1.3 Pa	nache thermique et hauteur de flamme	. 50
4.1.3.1	Panache au centre d'une pièce	. 50
4.1.3.2	Couche d'air chaud sous le plafond	. 52
4.1.3.3	Cas particulier des entrepôts	. 53
4.1.3.4	Cas particulier des tunnels	. 54
4.1.4 Fla	shover	. 54
4.1.5 Dé	tection et suppression des incendies	. 56
4.1.5.1	Détection de la fumée	. 56
4.1.5.2	Moyens d'extinction	. 56
4.2 Les	modèles à zones	. 57
4.2.1 Pri	ncipe	. 57
4.2.2 Dif	férentes approches	. 58
4.2.2.1	Le terme source incendie	. 59
4.2.2.2	Le panache incendie	. 60
4.2.2.3	Le jet sous le plafond	. 61
4.2.2.4	L'interaction du panache et du plafond	. 61
4.2.2.5	La couche d'air chaud	. 61
4.2.2.6	La couche inférieure	. 61
4.2.2.7	Les ouvertures permettant une ventilation naturelle	. 63
4.2.2.8	Les systèmes de ventilation	. 63
4.2.2.9	Les parois	. 63
4.2.2.10) Les systèmes de prévention (détection, alarmes, suppression)	. 64
4.2.2.11	Les cibles (personnes et équipements)	. 64

4.2.3 L	es principaux outils existants	64
4.2.4 V	érification et validation	67
4.3 Les	modèles CFD (Computational Fluid Dynamics)	.68
4.3.1 P	rincipe	68
4.3.2 D	ifférentes approches	69
4.3.2.1	Géométrie et maillage	69
4.3.2.2	2 Calcul de la densité de l'air	70
4.3.2.3	B Modèles de turbulence	71
4.3.2.4	Modéles de combustion	73
4.3.2.5	6 Modèles de radiation	75
4.3.2.6	6 Modèles de transport des fumées	77
4.3.2.7	Conditions aux limites	78
4.3.2.8	3 Méthodes numériques	79
4.3.2.9	Le traitement des résultats	80
4.3.3 L	es principaux outils existants	80
4.3.4 V	érification et validation	81
4.4 Les	Modèles mixtes : zones-CFD	.85
4.4.1 P	rincipe	85
4.4.2 V	érification et validation	85
4.4.3 E	xemples d'application	85
4.5 Mo	dèles spécifiques pour la prise en compte des réseaux de ventilation.	.86
4.5.1 P	rincipes	86
4.5.2 N	éthode	87
4.5.2.1	Equilibrage du réseau	87
4.5.2.2	2 Evaluation de la dispersion des fumées sur le réseau	88
4.6 Co	mparaison des différents types de modèle	.88
4.6.1 D	omaines d'application	88
4.6.2 C	omparaison des différentes méthodes	89
5. LA S	ÉCURITÉ INCENDIE EN MILIEU CONFINÉ	.91
5.1 L'a	nalyse des dangers	.92
5.2 La	prévention	93
5.3 La	détection	.93
5.3.1 L	es détecteurs	93
5.3.2 L	es principes de fiabilité d'un système de détection	94

6. BIBLIOGRAPHIE	99
	07
5.5.3 Les secours	97
5.5.2 La réussite de l'évacuation	96
5.5.1 Evacuation, action prioritaire	95
5.5 Alerte / evacuation et action des secours	95
	00
5.4.3 La ventilation	95
5.4.2 La protection active	95
5.4.1 La protection passive	94
5.4 La protection	94

1. OBJECTIF ET DOMAINE D'APPLICATION

1.1 CONTEXTE GENERAL

Depuis l'année 2000, le Ministère en charge de l'Environnement (anciennement Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement devenu Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) finance un programme d'études et de recherches, intitulé depuis 2003 « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs » (DRA-35).

L'objet du premier volet de ce programme est de réaliser un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil évolutif sera constitué de différents rapports consacrés aux thèmes suivants :

- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE...)
- l'analyse et la maîtrise des risques,
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique..).

Chacun de ces documents reçoit un identifiant propre du type « Ω -X » afin de faciliter le suivi des différentes versions éventuelles du document.

In fine, ces documents décrivant les méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, constitueront un recueil des méthodes de travail de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels.

1.2 OBJECTIFS ET LIMITES

Ce rapport est spécifiquement consacré à la problématique des incendies en milieu confiné.

Il porte notamment sur la description et l'analyse des phénomènes qui peuvent être rencontrés lors des différentes phases de développement de ce type d'incident et qui ont pu être observés dans l'accidentologie. L'objectif est de fournir des notions et également quelques règles de calcul permettant d'évaluer le risque lié à chacun des phénomènes décrits.

Le présent document porte exclusivement sur l'aspect « milieu confiné ». Il s'agit donc d'aborder que les cas d'incendies répondant aux trois critères suivants :

- 1. la structure environnante englobe l'incendie,
- 2. la taille du foyer de l'incendie est significative comparativement aux dimensions de la structure,
- 3. la dispersion spatiale des fumées est limitée par la structure.

A titre d'exemple, l'incendie impliquant une poubelle sans se propager dans une salle de sport ne sera pas considéré comme un incendie en milieu confiné car la taille du foyer est minime comparativement à celle de la salle. Il en est de même pour le cas d'un incendie d'entrepôt généralisé où la toiture a fini par céder ; la dispersion des fumées se faisant à l'air libre dans ce cas.

1.3 PRESENTATION DU DOCUMENT

Afin de mieux cerner le risque inhérent aux incendies en milieu confiné, une analyse de l'accidentologie est proposée en première approche afin d'identifier les causes et les effets de ce type d'incident.

Une présentation et une analyse des phénomènes observés est ensuite détaillée. Cette analyse porte sur les phénomènes rencontrés lors des différentes phases possibles de développement des incendies en milieu confiné. Cette partie aborde notamment les aspects de propagation, le phénomène de l'embrasement généralisé encore appelé « Flash-over », celui du « back-draft »... Les phénomènes inhérents aux systèmes ventilés tels que les tunnels et les galeries souterraines seront également présentés.

Afin d'évaluer l'occurrence de certains phénomènes et de leurs effets sur le milieu ambiant, le thème qui suit porte sur la description de modèles physiques. L'un des problèmes difficiles pour les incendies en milieu confiné concerne la quantification de la dispersion de la chaleur et des toxiques au travers des mouvements de fumées. Une description des typologies de modèles utilisés dans ce domaine et de leurs limitations est également présentée.

Une revue des stratégies de sécurité incendie en milieu confiné est ensuite proposée. Sans vouloir être exhaustive, cette revue fournit quelques recommandations applicables à différents types d'installations. Enfin, ce document présente une ouverture sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie qui est de plus en plus utilisée dans les études de risques incendie. Cette méthode repose sur l'analyse des performances d'un système à atteindre des objectifs de sécurité vis à vis du risque incendie. Elle constitue un substitut et un complément par rapport aux approches prescriptives de la réglementation.

Pour chaque chapitre, le document s'articulera de la façon suivante :

- Une description des aspects relatifs aux incendies dans les infrastructures non ventilées ou ne disposant pas de systèmes de ventilation mécanique dimensionnés pour l'incendie. Ces infrastructures seront dénommées dans la suite du document « infrastructures non ventilées »,
- Une description des spécificités des « infrastructures ventilées ».

2. ELEMENTS D'ACCIDENTOLOGIE

L'analyse des incidents passés offre un enseignement indispensable pour comprendre les causes et les conséquences qui leurs sont liées. C'est dans cette démarche que s 'inscrit le présent chapitre.

En ce qui concerne les incendies en milieu confiné, ils peuvent toucher différents types d'environnements. On peut toutefois les classer suivant les trois catégories ci-après :

- les bâtiments publics : habitât individuel, bureaux et lieux publics ;
- les bâtiments industriels tels que les entrepôts ou les locaux techniques ;
- les installations souterraines tels que les systèmes de transport souterrains, les mines et carrières souterraines correspondant à des infrastructures ventilées.

2.1 QUELQUES ACCIDENTS REMARQUABLES

2.1.1 LES ESPACES SANS VENTILATION FORCEE

Il s'agit ici de l'habitât individuel, des immeubles de grande hauteur (IGH), des Etablissements Recevant du Public (ERP) et des entrepôts ou autres installations industrielles non ventilées.

2.1.1.1 INCENDIES D'ENTREPOTS

Le 08/11/2002

FRANCE - 21 - DIJON

25.2C - Fabrication d'emballages en matières plastiques

Une explosion se produit dans le foyer d'une chaudière dans une usine de fabrication d'emballages souples en papier et/ou matières plastiques comportant notamment une opération d'impression. Cette explosion provoque la projection du couvercle qui sectionne la canalisation de gaz au niveau de la soudure à l'aval des vannes de sécurité. La chaudière est composée d'un foyer qui chauffe un serpentin contenant de l'eau. Une pompe assure la circulation de cette eau chaude dans un réseau de tuyauteries. Selon l'exploitant, la pression maximale de service de ce réseau est inférieure à 4 bars, valeur à partir de laquelle la réglementation appareil à pression s'applique. Ce jour-là, la chaudière a été retirée de l'exploitation en raison de son mauvais fonctionnement et remise à la disposition de la société qui assure son entretien.

Le 30/11/2001 - 93 - AUBERVILLIERS

Manutention et entreposage

En début d'après-midi (15h30), un incendie détruit une partie d'un entrepôt jouxtant un stockage d'alcools. Ce dernier, situé en zone urbaine, abrite 6 500 m³ d'hydrocarbures particulièrement inflammables et susceptibles d'exploser. Le personnel est évacué aussitôt. L'incendie serait du à un feu de voiture, en stationnement dans la rue devant le mur de l'établissement, au droit de la tuyauterie d'arrivée de gaz. Le feu se serait ensuite propagé au poste de détente de la tuyauterie situé sur le mur. Le jet enflammé résultant communique l'incendie aux locaux techniques situés de l'autre côté du mur. Environ 150 pompiers et 25 véhicules en provenance de plusieurs casernes se rendent sur place. Les bacs de stockage et murs de séparation sont arrosés à titre préventif. Les services techniques du gaz sont appelés pour couper l'alimentation en gaz de la tuyauterie. Ils y parviennent après 45 min. Le feu est ensuite maîtrisé. L'intervention des pompiers a été gênée par la présence dans le local technique d'une bouteille d'acétylène, qui n'a finalement pas été affectée par l'incendie. Par ailleurs, le local technique se situe dans le même bâtiment que l'entreposage des produits en petit conditionnement (white-spirit, alcool). Ceci a constitué une menace d'aggravation pendant la durée du sinistre. En revanche, les cuves aériennes d'alcools sont distantes d'une cinquantaine de mètres du lieu de l'incendie. Au final, le poste de détente et l'atelier de réparation mécanique sont détruits. Il n'y a pas de blessé.

Saint-Egrève (38 -08/03/84)

Dans une usine conditionnant des produits chimiques, un incendie se déclare dans le bâtiment réservé aux stockages des produits finis et des emballages. Environ 20 000 générateurs aérosols de produits inflammables, également à proximité, explosent sous l'effet de la chaleur. Les pompiers maîtrisent l'incendie et parviennent à protéger les autres bâtiments. Les locaux directement concernés par le sinistre sont inutilisables et encombrés par les générateurs éventrés. Les jours suivants, les produits sont évacués par des entreprises spécialisées dans le traitement des déchets. Le ruisseau, situé en contrebas de l'usine, est pollué par les eaux d'extinction chargées en mousse et en produits chimiques.

2.1.1.2 LES IMMEUBLES ET ERP

Les attentats terroristes du 11 Septembre 2001 aux Etats-Unis

Le 11 Septembre 2001, une série d'attentats terroristes a été commise aux Etats-Unis et a consisté à détourner des avions de ligne pour les lancer à grande vitesse sur des bâtiments publics. Ainsi, des pirates de l'air ont précipité un avion de ligne sur chacune des tours jumelles du World Trade Center, les deux plus hautes tours de New-York qui abritaient des bureaux. Un troisième avion est délibérément écrasé sur le Pentagone, siège du Ministère de la Défense.

Après les impacts des avions sur les tours jumelles, qui se sont produits vers 8h45 pour la tour Nord et 9h pour la tour Sud, un incendie s'est déclaré dans chacune des tours. Une explosion, alimentée par le fuel provenant de l'avion, s'est tout d'abord produite et a propagé rapidement un incendie sous forme de boules de feu. Celui-ci a ensuite été entretenu par les matériaux combustibles présents dans les tours. La chaleur générée par les incendies a davantage fragilisé les structures des tours, déjà éprouvées par l'impact initial. Celles-ci se sont finalement effondrées respectivement 58 minutes après l'impact et début d'incendie pour la tour Sud et 103 minutes pour la tour Nord. Un troisième bâtiment, à proximité des tours jumelles, a également pris feu puis s'est effondré en fin de journée vers 17h30 après avoir été soumis à 70 minutes d'incendie et après avoir surtout été fragilisé par l'impact des débris provenant des tours jumelles. Au total, ce sont sept bâtiments et quatre stations de métro qui ont été en grande partie ou totalement détruits. Un huitième bâtiment a dû être démoli par la suite car les conditions toxiques à l'intérieur l'ont rendu inhabitable. Vingt-cing autres bâtiments ont été endommagés.

Le bilan humain est aussi très lourd : 2602 personnes sont mortes sur le site du World Trade Center sans compter les passagers des avions. Une grande partie des victimes, 76%, se trouvaient au niveau ou au-dessus des points d'impact. Les avions sont entrés en collision avec les tours de 110 étages entre les 93^{ème} et 99^{ème} étages pour la tour Nord en détruisant tout moyen d'évacuation vertical et entre les 77^{ème} et 85^{ème} étages pour la tour Sud en ne laissant qu'un seul escalier qui a permis l'évacuation de seulement 18 personnes situées dans les étages au niveau et supérieurs au point d'impact. Beaucoup de personnes, en particulier des pompiers et sauveteurs, se trouvaient encore dans les tours lorsque celles-ci se sont effondrées causant la mort de personnes dans et autour des bâtiments.

Une enquête a montré que ce sont les effets combinés de l'impact initial des avions sur les tours et de la propagation d'incendies qui ont conduit à leur effondrement {NIST,2005}. L'impact des avions a créé des dommages aux structures des tours, dommages toutefois insuffisants pour causer leur effondrement. Mais il a de plus arraché les protections thermiques au niveau des structures porteuses en acier. Ainsi, l'incendie a affaibli les structures non protégées qui ont fini par céder. L'enquête a établi qu'en l'absence de dommages aux structures et aux protections thermiques, un incendie de même puissance n'aurait probablement pas causé l'effondrement des tours. Les raisons de l'effondrement du bâtiment à proximité des tours jumelles n'ont pas encore été établies.

L'enquête a aussi montré que les escaliers des tours n'étaient pas suffisamment renforcés pour résister à l'impact initial et permettre l'évacuation des personnes situées au niveau et au-dessus du point d'impact. Pour les étages inférieurs, les escaliers de secours se sont avérés en nombre et capacité suffisants pour permettre au plus grand nombre d'occupants d'évacuer avant l'effondrement des tours. Toutefois, l'attaque terroriste a eu lieu tôt le matin lorsque les tours n'étaient occupées qu'au tiers ou à moitié de leur capacité. Il a été estimé qu'il aurait fallu trois heures pour évacuer les tours si celles-ci avaient été occupées à leur maximum. Dans la législation américaine, les issues de secours sont en fait prévues pour l'évacuation d'un étage et non pas d'un bâtiment complet. Au Pentagone, qui abrite le Ministère de la Défense, un incendie s'est déclaré puis une partie du bâtiment s'est effondrée. Les victimes ont été relativement peu nombreuses, 125 au total, car les bureaux dans cette partie étaient peu occupés en raison de travaux de réfection. Beaucoup moins d'informations sont toutefois disponibles pour ce site que pour le site du World Trade Center.

Un immeuble d'habitation à Neuilly-sur-Seine le 14 Septembre 2002

Un incendie s'est déclaré dans une chambre sous les toits d'un immeuble de 7 étages le 14 Septembre 2002 à 18 h.

Une première explosion s'est produite dix minutes après l'arrivée des pompiers puis une seconde dix minutes plus tard à un autre étage. Cinq pompiers ont été grièvement blessés par ces explosions. Tout d'abord soignés sur place, ils ont ensuite été transférés dans un centre de grands brûlés où leur décès a été constaté.

Les deux locataires de la chambre étaient absents pendant les faits et l'origine de l'incendie n'a pas été identifiée avec certitude. Toutefois, un démarrage de feu sur la literie, qui a presque complètement brûlé, par une cigarette mal éteinte par exemple ou un début d'incendie au niveau du téléviseur tout proche semble plausible.

Les témoignages recueillis notamment sur les conditions de ventilation de la chambre, les températures ressenties dans les couloirs et la cinétique de l'incendie semblent indiquer qu'il s'est produit une combustion éclaire, encore appelé « back-draft » : lorsque l'incendie s 'est déclaré, il semble qu'il ait été approvisionné suffisamment en air frais pour se développer et se généraliser à la pièce entière. Au cours de son développement, des vapeurs encore combustibles se seraient formées et se seraient répandues dans l'immeuble. Ces vapeurs se seraient embrasées soudainement lorsque les conditions de flash-over, portant sur des valeurs élevées de températures ambiantes et chaleurs radiatives, auraient été remplies. Ceci aurait produit des phénomènes thermiques violents non seulement dans la chambre où l'incendie a démarré mais aussi dans les couloirs voisins où les pompiers ont été retrouvés. Bien que la position des pompiers au moment des explosions ne soit pas connue, la suite d'évènements cidessus pourrait expliquer les graves brûlures observées chez les pompiers, même si ceux-ci n'ont pas eu le temps de s'enfuir et se trouvaient où leurs corps inanimés ont été trouvés.

2.1.2 LES ESPACES AVEC VENTILATION FORCEE

2.1.2.1 LE METRO

Station King's Cross du métro londonien, Angleterre, le 18 Novembre 1987

L'incendie survenu à la station du métro londonien King's Cross le 18 Novembre 1987 a été dévastateur et meurtrier. Les parties supérieures, c'est-à-dire les entrées et le hall principal, de cette grande station desservant six lignes ont brûlé. Trente et une personnes ont trouvé la mort.

L'incendie s'est déclaré sous les escaliers automatiques faits de bois. C'est probablement une allumette mal éteinte qui a mis le feu à de l'huile et détritus sous l'escalier. Bien qu'il était interdit de fumer dans le métro, y compris dans la station, les gens commençaient à allumer une cigarette sur l'escalier qui les conduisait à la sortie. En effet, des traces de bois brûlé ont été retrouvé en dix-huit endroits sous l'escalier montrant des départs de feu qui se sont fort heureusement éteints d'eux-mêmes et n'ont donc eu aucune conséquence.

Le grand nombre de victimes a été dû à un phénomène particulier de combustion appelé 'trench effect' : au lieu de se dresser verticalement, les flammes se sont couchées le long de l'escalier, chauffant ainsi d'autant plus les marches en bois. Les flammes n'étaient pas très visibles pour les passagers dans le hall ni pour les services de sécurité car elles étaient en grande partie cachées par la balustrade de l'escalier. De plus, la fumée produite par la combustion du bois était blanche. Les personnes présentes ont donc tout d'abord sous-estimé l'importance de l'incendie. L'évacuation du hall de la station n'est d'ailleurs pas apparue nécessaire d'autant plus que celui-ci était situé à un niveau plus bas que celui de l'incendie, qui en principe se développe vers le haut.

Mais lorsqu'un nombre de marches suffisamment important a atteint de fortes températures, un phénomène de 'flashover' s'est produit au niveau de l'escalier. L'incendie s'est alors développé de façon exponentielle et un jet de flammes soutenu s'est dirigé du tunnel de l'escalator vers le hall, mettant ainsi le feu aux combustibles présents dans le hall. De plus, la peinture contenant un solvant qui revêtait le plafond du tunnel de l'escalator a rendu l'incendie plus meurtrier : la peinture s'est enflammée pendant le 'flashover' et elle a produit des fumées noires toxiques. Les trente et une personnes décédées sont celles qui n'ont pas pu s'échapper du hall avant de succomber aux fumées toxiques et aux fortes chaleurs. La disposition du tunnel de l'escalator et du hall ont fait que des températures de l'ordre de 600°C ont été atteintes.

Suite à cet incendie, les mesures suivantes ont été prises : les escaliers en bois ont été remplacés à l'exception à ce jour d'une station ; l'installation de sprinklers et de détecteurs de chaleur a été rendue obligatoire au niveau des escaliers ; un entraînement incendie de tout le personnel en station doit être effectué deux fois par an ; des améliorations ont été apportées à la communication entre les services d'urgence.

Station à Daegu, Corée du Sud, le 18 Février 2003

Un pyromane a mis le feu à une rame de métro en arrêt à la station Joongang-ro du métro de Daegu en Corée du Sud le 18 Février 2003 vers 10h, pendant les heures de forte affluence. L'incendie s'est propagé à une seconde rame de métro entrée dans la station après le début d'incendie. Celui-ci a été très meurtrier : 198 personnes sont mortes et 147 autres ont été blessées.

Le pyromane, instable mentalement, a dit avoir voulu se suicider dans un lieu public. Il a commencé à sortir des cartons remplis de liquide inflammable et un briquet lorsque le métro quittait la station Yeok. Des passagers suspicieux ont alors essayé de l'empêcher de mettre le feu. Dans la lutte, le contenu d'un des cartons s'est répandu dans le train et s'est enflammé alors que la rame s'arrêtait à

la station Joogang-ro. Le pyromane et la plupart des passagers du train ont réussi à se sauver. En deux minutes, l'incendie s'est propagé aux six voitures de la rame. Les sièges et le sol étaient composés de matières inflammables (fibre de verre, vinyl carboné, polyéthylène) qui ont produit des fumées noires toxiques.

Malheureusement, le conducteur de la rame n'a pas prévenu le personnel opérant le métro de l'incendie. Ceux-ci ont vu la fumée sur le circuit vidéo. Ils ont prévenu le conducteur d'un train s'approchant de la station d'être prudent en raison de la présence d'un incendie. Le train s'est arrêté à côté de celui en flammes. Les portes se sont ouvertes brièvement puis se sont refermées, probablement pour éviter que les fumées n'entrent dans le train. Un système automatique de sécurité a détecté l'incendie et a coupé l'approvisionnement électrique des deux trains, empêchant le train qui ventait d'entrer en station de repartir. Le conducteur a tout d'abord demandé aux passagers de rester assis alors qu'il essayait de contacter ses supérieurs. Ceux-ci lui ont conseillé de quitter le train et de se sauver. Le conducteur a alors ouvert les portes et s'est enfui mais il a emmené avec lui la clef maître, coupant ainsi les batteries autonomes du train. Les portes ne se sont donc pas ouvertes et 79 passagers ont été pris au piège et sont mortes dans ce train.

Le manque d'équipement de sécurité a aussi alourdi le bilan de cet incendie. Il n'y avait pas d'extincteur à bord des trains et les stations n'étaient pas équipées de sprinklers, ni d'éclairage d'urgence. De nombreuses victimes sont mortes asphyxiées alors qu'elles essayaient de trouver une sortie à la station enfumée. L'incendie a pu être éteint à 13h25 mais il a fallu attendre trois heures et demie supplémentaires avant que les services de secours ne puissent entrer dans la station, temps nécessaire à la dissipation des fumées toxiques.

Depuis, la sécurité du métro a été améliorée : les matériaux de construction du métro sont résistants au feu ; six stations ont été équipées de systèmes de sécurité.

2.1.2.2 LES TUNNELS

Le tunnel sous la Manche, entre la France et l'Angleterre, le 18 Novembre 1996 et le 21 Août 2006

Un incendie s'est déclaré le 18 Novembre 1996 à bord d'un train transportant des camions et leurs chauffeurs. L'incendie a été remarqué peu de temps avant son entrée dans le tunnel en direction de l'Angleterre mais le conducteur n'a été prévenu que plus tard. Il a alors essayé de poursuivre sa route jusqu'à la sortie du tunnel mais un problème technique, indépendant de l'incendie, l'a forcé à s'arrêter à l'intérieur. Après une exposition aux fumées d'environ vingt minutes, les passagers et le personnel ont pu être évacués par un train de passagers allant en direction opposée dans le tunnel adjacent. Le tunnel sous la Manche est constitué en fait de trois tunnels parallèles: un pour chacune des directions et un tunnel de service. Des passages les relient entre eux tous les 375 mètres et des conduits d'aération relient les deux tunnels principaux tous les 250 mètres.

Aucun mort n'a été à déplorer mais les dégâts matériels et économiques ont été importants. La locomotive et dix camions ont été complètement détruits. De

sérieux dommages ont été causés au tunnel sur une longueur d'un kilomètre ; le service normal du tunnel n'a pu reprendre que six mois après.

Le train transportait vingt-neuf camions dont un avait à son bord du polystyrène, classé matière dangereuse. Il y avait un wagon juste derrière la locomotive pour accueillir les trente et un chauffeurs de ces camions. Le train avait une longueur de 800 mètres. L'incendie, qui a probablement démarré sur l'un des camions, se situait vers le milieu du train, proche du camion qui transportait le polystyrène.

D'autres trains se trouvaient dans le tunnel au moment de l'incendie : trois trains en amont du train en feu ; deux trains, une locomotive seule et un train de passagers, sont entrés après que l'incident se soit déclaré ; trois trains circulaient en sens inverse dans le tunnel parallèle.

L'incendie a été tout d'abord remarqué par des agents de sécurité avant l'entrée du train dans le tunnel puis il a été détecté par des systèmes en place dans le tunnel qui se sont allumés au fur et à mesure de la progression du train. Le conducteur a été prévenu de la probabilité d'un incendie à bord de son train par le poste de commande qui lui a conseillé de poursuivre sa route jusqu'à la sortie du tunnel où l'attendraient les pompiers pour intervenir. Un train entré dans le tunnel après a dû ralentir à cause de l'épaisse fumée. Au même moment, les systèmes de détection du tunnel confirmaient la présence de fumées. Il s'ensuivit une série de mesures au cas où le train ne parviendrait pas à la sortie du tunnel : tous les trains furent ralenti ; toutes les valves des conduits de ventilation ont été fermées ; les portes coulissantes au niveau des crossover côté français et anglais et au niveau des passages entre les tunnels ont été fermées; les pompiers anglais et français ont été mobilisés. Le poste de commande voulait en fait isoler les deux tunnels opérationnels mais n'y est pas parvenu : une porte entre les passages ne s'est pas fermée et la porte du crossover côté français est resté entrouverte.

A cause d'un incident sans rapport avec le feu, le conducteur du train en feu a dû s'arrêter. Il a suivi la procédure et a stoppé le train près d'un des passages entre les tunnels. Il était alors à 19 km de l'extrémité France et à 32 km de l'extrémité Royaume-Uni. *Le train était situé sur trois passages : l'un près du wagon des chauffeurs de camions ; un autre près du wagon avec le camion transportant du polystyrène et l'autre près du dernier wagon.*

A cause de la fumée dans le tunnel, le conducteur ne pouvait pas voir le numéro du passage à côté duquel il s'était arrêté. Le poste de commande savait que le wagon des chauffeurs était près d'un passage mais ne savait pas lequel. La ventilation du tunnel a été mise en marche pour pousser les fumées mais une erreur commise par le poste de commande a fait que les ventilateurs étaient sans effet.

Les conditions à bord du train devenaient de plus en plus difficiles à mesure que les fumées s'infiltraient. Aucune personne dans le train n'a remarqué le passage vers le tunnel de service qui était pourtant à hauteur du wagon.

Le poste de commande a fait reculer le dernier train entré dans le tunnel et a évacué le conducteur de la locomotive entrée après le train avec l'incendie à son bord. De plus, l'un des trains circulant en direction inverse dans l'autre tunnel a été stoppé au niveau de l'incendie pour permettre au besoin l'évacuation des passagers et du personnel.

Le poste de commande a ensuite ouvert les deux portes des passages où ils pensaient que le wagon des chauffeurs étaient pour permettre aux pompiers d'accéder. Ceux-ci se sont alors rendu compte que la ventilation ne marchait pas. Cette dernière a finalement été mise en route correctement et elle a poussé les fumées loin du train. Aussi, l'ouverture de la porte du tunnel de service a entraîné l'approvisionnement en air frais qui a dégagé les fumées et permis aux passagers de se rendre compte qu'ils étaient près d'un passage. Le tunnel de service a son propre système de ventilation qui le pressurise de façon à empêcher l'infiltration de fumées.

Les passagers ont été dirigés dans le tunnel de service. De là, ceux qui pouvaient marcher ont été conduits dans l'autre tunnel et ils sont montés à bord du train en direction de la France. Ils ont pu quitter le tunnel sains et saufs même si le train a dû traverser un nuage de fumées au niveau du crossover à cause de la porte restée entrouverte. Les blessés plus graves ont été évacués du tunnel dans des véhicules équipés comme des ambulances par le tunnel de service.

Il aura fallu ensuite cinq heures aux pompiers pour éteindre l'incendie.

Trois enquêtes indépendantes ont été menées. Celles-ci ont conduit à une série de changements dont les plus importants sont :

- les procédures de contrôle et d'opération de la ventilation ont été simplifiées et un plus grand nombre d'agents de sécurité sont présents au poste de commande ; en particulier, ceci permet d'avoir un agent qui ne s'occupe que des alarmes incendie.
- La politique d'amener le train avec un incendie à son bord au bout du tunnel pour intervenir a été abandonnée. Maintenant, le train sera stoppé dès que l'incendie a été repéré et les passagers seront tout de suite conduits dans le tunnel de service par le chef de train.
- Les trains transportant des camions sont équipés de systèmes automatiques d'extinction incendie et ils sont plus longs, laissant ainsi plus d'espace entre les wagons transportant les camions et celui transportant les chauffeurs.
- Les communications entre les services d'urgence français et anglais ont été renforcées. En particulier, des exercices communs et des échanges de personnel entre les brigades de pompiers anglaise et française sont organisés.

Un incident s'est produit depuis, le 21 Août 2006. Il s'est agi de l'incendie d'un moteur de camion chargé à bord d'une navette. Le feu a été rapidement maîtrisé et les 34 passagers évacués. Ainsi, il n'y a pas eu de blessés et les dégâts ont été beaucoup moins importants que lors du précédent incendie : seule une caténaire a été endommagée dans le tunnel nord où a eu lieu l'incendie. Le tunnel sud qui n'a pas souffert de l'incendie a réouvert trois heures après l'incendie et le tunnel nord a été remis en usage après seulement un peu plus de 24 heures.

Eurotunnel, l'opérateur du tunnel, a mis en avant l'efficacité des systèmes de suppression incendie dans le tunnel, du système de ventilation pour dégager les fumées et de la qualité des procédures d'intervention.

Le tunnel du Mont-Blanc entre la France et l'Italie, le 24 Mars 1999

Le 24 Mars 1999, 39 personnes sont mortes suite à un incendie qui s'est déclaré à bord d'un camion transportant de la farine et de la margarine dans le tunnel du Mont-Blanc, long de 11,6 kilomètres et large de 8,6 mètres, reliant la France à l'Italie.

Le conducteur s'est rendu compte de l'incendie à bord de son véhicule alerté par les conducteurs allant dans la direction opposée. Il avait déjà parcouru plusieurs kilomètres dans le tunnel. Il s'est arrêté à mi-chemin entre l'entrée et la sortie du tunnel pour essayer d'éteindre lui-même l'incendie mais en vain. Le personnel du tunnel a déclenché l'alarme quelques minutes plus tard et a fermé l'entrée du tunnel dans les deux sens. 10 voitures et 18 camions entrés du côté français étaient à ce moment déjà dans le tunnel. Quelques véhicules entrés par le côté italien ont pu passer près de l'incendie et traverser le tunnel. Certains véhicules du côté français ont réussi à faire demi-tour et à sortir malgré l'épaisse fumée qui avait rapidement envahi le tunnel. Malheureusement, les camions les plus larges n'ont pas pu suivre la même démarche faute de place. La plupart des conducteurs ont fermé leurs vitres et ont attendu les secours.

Un effet cheminée dû à la pente du tunnel s'est produit : de l'air frais était aspiré côté italien, poussant la chaleur et les fumées de l'autre côté, plus élevé. Le système de ventilation du tunnel a amplifié ce phénomène poussant les fumées du côté français à une vitesse trop rapide pour que quiconque ait le temps de se mettre à l'abri. Les fumées auraient aussi causé la panne des moteurs de certains véhicules et de nombreux conducteurs qui sont sortis de leurs véhicules pour rejoindre les refuges ont été rapidement asphyxiés.

Quelques minutes après que l'alarme ait été donnée, les services de secours français de Chamonix sont intervenus. Mais la violence de l'incendie a causé la fonte des câbles électriques et a plongé le tunnel dans le noir. Les équipes de secours n'ont donc pas pu, dans ces conditions, s'approcher de la source d'incendie, d'autant plus que de nombreux véhicules endommagés bloquaient leur passage. Elles ont abandonné leurs engins et se sont abritées dans des refuges pressurisés. Elles ont été sauvées cinq heures plus tard par une troisième équipe de pompiers qui est passée par un conduit de ventilation. Des 15 pompiers pris au piège, un est mort et tous les autres étaient dans une condition critique.

Quelques autres personnes ont aussi été sauvées grâce aux refuges bien que les portes coupe-feu de ceux-ci aient été originellement conçues pour résister pendant deux ou quatre heures (selon leur vétusté) alors que l'incendie aura duré 56 heures avec des températures atteignant 1000°C. Le pouvoir calorifique du chargement de margarine, équivalent à 22.000 litres d'essence, est principalement en cause. De plus, l'incendie s'est ensuite rapidement propagé aux autres camions qui transportaient aussi des produits inflammables.

L'effet cheminée était notable dans les conséquences de l'accident : seuls les véhicules du côté français, plus élevé que le côté italien et vers où la chaleur et les fumées sont allées, ont été pris dans l'incendie ; presque tous les véhicules du côté italien n'ont pratiquement pas été endommagés.

27 personnes sont mortes dans leurs véhicules, 10 en essayant de se sauver à pied. Sur les 50 personnes prises au piège dans l'incendie, seulement 12 ont survécu.

Le tunnel est resté fermé pendant trois ans suite à l'incendie et a subi des transformations majeures : il a été équipé d'un système automatisé de détection, des baies de sécurité ont été rajoutées, une issue de secours parallèle au tunnel a été creusée, un poste d'intervention qui dispose de camions incendie a été installé au milieu du tunnel.

Le lourd bilan de l'incendie a aussi en partie été imputé au manque de coordination entre les deux sociétés, l'une française, l'autre italienne, responsables de la gestion du tunnel.

Le tunnel de Kaprun en Autriche le 11 Novembre 2000

Un incendie s'est déclaré sur le funiculaire du Mont Kitzsteinhorn en Autriche le 11 Novembre 2000 alors qu'il traversait un tunnel. Il a été très meurtrier, causant la mort de 155 personnes.

Il était 9h lorsque le funiculaire a démarré pour gravir le Mont Kitzsteinhorn au départ du village de Kaprun, en Autriche Les passagers de la cabine montante situés dans le compartiment le plus bas ont vu des petites flammes sortir du compartiment arrière lorsque que la cabine était dans le tunnel. La cabine s'est arrêtée 530 mètres après l'entrée du tunnel mais les portes sont restées bloquées. Douze passagers du compartiment inférieur ont pu sortir en brisant des vitres. L'un de ces passagers était un pompier volontaire et il a su guider les autres pour les mettre à l'abri : il leur a fait descendre le tunnel en passant devant l'incendie et alors que ceux-ci craignaient de voir le funiculaire descendre la pente. Le conducteur a finalement réussi à débloquer les portes et des passagers encore conscients dans la cabine ont essayé de s'échapper en s'éloignant de la source incendie, c'est-à-dire en remontant le tunnel. Malheureusement, l'effet cheminée dû à la pente du tunnel a dirigé les flammes et les fumées toxiques vers eux et leurs corps ont été retrouvés sur une distance de 140 mètres en amont de la cabine. Aucun n'a réussi à rejoindre le puits de ventilation situé 130 mètres plus loin et qui aurait pu constituer une issue de secours. Aussi, les deux seules personnes à bord de la cabine descendante, le conducteur et un passager, sont mortes asphyxiées ainsi que trois autres situées dans la station en amont. Au total, 155 personnes sont décédées.

L'incendie a eu pour origine une fuite d'huile d'un conduit hydraulique du système de freinage et un appareil de chauffage défectueux qui avait été installé de façon illicite dans la cabine inférieure du conducteur, inoccupée au moment de l'incendie. L'appareil de chauffage a fourni la chaleur nécessaire à l'embrasement de l'huile et des panneaux de bois et autres matériaux proches préalablement enduits d'huile. C'est la perte du liquide hydraulique qui a causé l'arrêt du funiculaire par l'intermédiaire d'un système de sécurité et qui a aussi empêché l'ouverture des portes par le conducteur qui s'était rendu compte qu'il y avait un incendie.

Le tunnel mis en service en 1974 et rénové en 1994 avait une longueur de 3300 mètres et une pente moyenne de 42%. Sa section était beaucoup moins

importante que celle, par exemple, du tunnel routier du Mont-Blanc et ce plus grand confinement a favorisé l'élévation de la température lors de l'incendie. Celle-ci a été estimée aux alentours de 1000°C. Bien que les cabines étaient en matériaux ignifuges, elles n'ont pas résistées à cette forte chaleur. Seul le châssis en acier, qui a une température de fusion de 1500°C, n'a pas fondu. De plus, le tunnel n'était équipé d'aucun système d'extinction d'incendie si bien que les secours n'ont pu pénétrer dans le tunnel que lorsque l'incendie s'est éteint de luimême et que les fumées toxiques se sont dissipées. Le funiculaire avait été conçu en estimant que le risque incendie était présent dans les stations mais très improbable dans le tunnel. Ceci explique l'absence de moyens d'extinction et la présence d'un escalier large de seulement 50 cm pour l'évacuation d'un funiculaire qui avait la capacité de transporter 180 personnes dans chacune des directions.

Le funiculaire de Kaprun n'a pas été remis en service mais a été remplacé par un téléphérique. Les cabines des autres funiculaires autrichiens sont maintenant équipées de masques à gaz, de marteaux et de pics pour briser les vitres. Des extincteurs ont également été ajoutés.

Le tunnel de Fréjus, le 4 Juin 2005

Le feu a pris dans un camion, à environ la moitié du tunnel long de 12,8 kilomètres, reliant Modane (Savoie) à la ville italienne de Bardonecchia. Il a vraisemblablement été provoqué par une fuite de gazole sur un camion transportant des pneus, selon les images prises par une caméra de surveillance du tunnel. On y voit du gazole fuir du turbo-compresseur du camion de pneus. Il est possible qu'il y ait eu une panne mécanique. Le carburant est arrivé sur le moteur et s'est enflammé et en un instant le camion était en feu.

Le feu s'est alors propagé à trois autres véhicules, dont un autocar de la Sitaf (société Italienne exploitante). Les pompiers ont retrouvé deux corps sans vie. Le premier, un Slovène de 23 ans, a été découvert dans l'abri numéro 6 du tunnel, côté français de l'ouvrage. Il s'agissait probablement du conducteur de l'un des camions en feu. Un autre chauffeur slovaque, de 24 ans, à été retrouvé à proximité. Plusieurs autres personnes ont été intoxiquées par la fumée, mais sans gravité. Cinq personnes ont été hospitalisées à Turin, mais leur état n'inspirait pas d'inquiétude. Du côté italien, 19 voitures, un autobus, un camping car et neuf chauffeurs de poids lourds ont réussi à sortir du tunnel après le début de l'incendie. La fumée et la chaleur dégagée par l'incendie a considérablement gêné la progression des pompiers.

2.2 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

2.2.1 LES CAUSES

Les causes varient en fonction du type d'environnement :

Pour l'habitation individuelle et les ERP, la cigarette est la principale cause identifiée. Il existe néanmoins d'autres causes telles que les surtensions d'équipements électriques ou leur mauvaise utilisation comme la couverture de chauffages électriques ou les guirlandes lumineuses laissées sans surveillance. Les feux de cheminées et de friteuses sont également des causes non négligeables.

Pour les entrepôts (statistiques du BARPI : site : <u>http://aria.ecologie.gouv.fr/barpi</u>), les actes de malveillance sont responsables à 28% des causes d'incendie. S'agissant d'installation entreposant de nombreux types de produits avec des installations complexes, elles sont sujettes à la défaillance humaine, ce qui constitue 22% des causes d'incendie. Les autres causes sont principalement dues à des défaillances matérielles. Les produits combustibles impliqués sont variés (liquides inflammables, aérosols, combustibles solides...).

Dans les systèmes de transport en souterrains, la charge combustible disponible est en grande majorité apportée par les véhicules. Ainsi, dans le cas des tunnels routiers, les incendies sont souvent provoqués soit par auto-inflammation du véhicule (principalement des poids lourds), soit à la suite d'un accident à l'origine d'un court-circuit électrique ou d'un épandage de carburant sur un élément mécanique. Il existe néanmoins des cas particuliers tels que l'incendie du tunnel du Mont blanc où l'incendie pourrait avoir été causé par un mégot de cigarette ayant atteint le compartiment moteur du camion à l'origine de l'incendie ou encore le cas du tunnel du Fréjus où la fuite de gasoil s'est produite en l'absence d'accident. Dans les métros, l'échauffement de pneumatiques est à l'origine de plusieurs incendies. Il existe toutefois d'autres origines tels que les défauts de matériels comme les escalators.

Pour les mines et carrières, les incendies sont principalement dus à l'échauffement mécanique des engins de chantier ou convoyeurs blindés.

2.2.2 LES CONSEQUENCES

Elles sont de trois types :

- impact sur les personnes : la toxicité des fumées est la principale cause de décès pour les incendies en milieu confiné ;
- impact sur l'infrastructure ou sur le patrimoine : les niveaux de température atteints sont susceptibles de provoquer des effondrements de structures ;
- impact sur l'environnement provoqué par les eaux d'extinction et les émanations de fumées vers l'extérieur.

3. LES PHENOMENES INHERENTS AUX INCENDIES EN MILIEU CONFINE

Les incendies en milieu confiné constituent un problème complexe. Il est en effet impossible de décrire et de prédire tous les développements spécifiques possibles d'incendie. Toutefois, sur la base de l'accidentologie et du retour d'expérience, il est possible d'identifier différentes phases types de développement. En effet, en fonction des produits combustibles mis en jeu, de leur agencement, de l'infrastructure et de la ventilation, il est possible d'observer différentes évolutions possibles de l'incendie conduisant chacune à des phénomènes particuliers. La Figure 1, représentant la température moyenne du local en feu en fonction du temps, illustre bien la multitude des évolutions possibles des incendies en milieu confiné, en particulier dans le cas des infrastructures non ventilées. La démarche retenue dans ce chapitre consiste dans un premier temps à décrire et à analyser ces différentes phases afin de mieux comprendre l'apparition de certains phénomènes et leurs conséquences tant sur le développement même de l'incendie que sur l'environnement proche. Dans un second temps, nous aborderons la problématique de la dispersion de fumées spécifique aux ouvrages ventilés.



Figure 1 : les évolutions possibles d'un incendie en milieu confiné

3.1 LES PHENOMENES LIES AUX INCENDIES DANS LES INFRASTRUCTURES NON VENTILEES

Les paragraphes 3.1.1 et 3.1.2 s'appliquent également au cas des infrastructures ventilées.

3.1.1 LA PHASE INITIALE D'UN INCENDIE

Cette phase est illustrée par la courbe surlignée de la Figure 2. Ce qui est intéressant durant cette première phase, c'est de comprendre les mécanismes à l'origine du départ d'un incendie. Ces mécanismes sont communément appelés cause de l'incendie. A titre d'exemple, le retour d'expérience a démontré que la

principale cause d'incendie mortel dans l'habitat était lié à l'inflammation des literies due à la cigarette.

Les causes peuvent être diverses et dépendre de l'installation. Dans le cas des tunnels par exemple, les incendies sont souvent provoqués par des accidents de la circulation ou par auto-échauffement d'éléments mécaniques. Il en est de même pour les chantiers en souterrains. Dans le cas des installations industrielles, les causes sont très variées : origine électrique, emballement chimique, acte de malveillance...



Figure 2 : phase initiale d'un incendie

Dans tous les cas, l'initiation est issue d'un dégagement suffisant d'énergie pour permettre l'échauffement d'un élément combustible jusqu'à une température telle qu'une réaction de combustion s'amorce. Ce mécanisme constitue le processus d'inflammation. Il est à noter que la réaction de combustion se produira toujours entre l'oxygène de l'air et le combustible sous forme gazeuse.

En fonction de la nature du combustible (gaz, liquide ou solide), le processus d'inflammation sera alors différent.

Pour les gaz, l'initiation se produit dans un mélange combustible comburant dont les proportions sont comprises entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI), l'énergie apportée pour initier la combustion du mélange est souvent très faible. Cette énergie est communément mesurée dans les proportions stœchiométriques de la réaction de combustion. Elle est alors appelée Energie Minimale d'Inflammabilité (EMI) Cette énergie est souvent de l'ordre de quelques mJ, ce qui explique pourquoi une étincelle peut suffire à enflammer le mélange.

Pour les liquides, la combustion se produit sur la partie évaporée à condition que le produit émette suffisamment de vapeur pour créer un mélange inflammable avec l'air ambiant. La température du liquide doit alors être supérieure à sa température de point éclair.

Pour les combustibles solides, le phénomène d'initiation est plus complexe car il est régi par le transfert de chaleur au sein du matériau. L'énergie reçue par le

combustible correspond à un flux thermique incident. Ce flux génère une augmentation de la température du solide jusqu'à l'obtention de la température de sublimation ou d'un seuil de décomposition et d'évaporation du matériau en vapeur combustible (Drysdale, 1996). Ce processus est appelé phénomène de pyrolyse. Le délai d'initiation dépend de l'intensité du flux thermique, des propretés thermiques (inertie thermique), de la température d'inflammation et du taux d'humidité du matériau. Des composés chimiques peuvent également être incorporés au matériau permettant ainsi de retarder ce processus. Les courbes de la Figure 3 donnent quelques exemples de délai d'inflammation pour le cas d'un matériau traité et celui d'un matériau non-traité en fonction du flux thermique reçu.



Figure 3 : Délai d'initiation en fonction du flux thermique reçu

3.1.2 LA PROPAGATION

Cette phase correspond à la montée en puissance de l'incendie liée à la combustion de proche en proche des éléments inflammables contenus dans le local en feu. Elle se traduit par une accélération de la montée en température dans le local (cf. Figure 4)



Figure 4 : phase de propagation

Durant cette phase la disposition des éléments combustibles joue un rôle important car c'est un des critères qui permettra le développement ou non de l'incendie et sa propagation. En effet, si le combustible initiateur de l'incendie se trouve en faible quantité et qu'il est suffisamment éloigné des autres combustibles, le flux thermique qu'il dégage pourrait être insuffisant pour accroître la température des autres combustibles et initier leur combustion. Dans ce cas, l'incendie s'éteint de lui même par manque de combustible, ce qui se traduit par une baisse de la température dans le local (cf. Figure 5)



Figure 5 : phase d'extinction liée à une carence en combustible

Comme dans le cas des incendies en milieu ouvert, la combustion peut se propager de deux façons différentes : soit par transmission de chaleur, soit par déplacement des substances en combustion.

3.1.2.1 PAR TRANSMISSION DE CHALEUR

Pour simplifier les explications, seuls les différents types de transmissions possibles sont présentés, l'ensemble étant schématisé à la Figure 7 :

- **Par rayonnement :** la chaleur dégagée par la combustion est partiellement restituée à l'environnement par rayonnement thermique.
- **Par conduction** : la chaleur se transmet dans la masse du matériau. Cette transmission se fait de proche en proche sans transfert de matière.

Par convection : le transport de la chaleur se fait par mouvement d'un fluide. Ce phénomène contribue le plus souvent à la propagation des sinistres par le déplacement des gaz chauds sur des distances importantes et à des niveaux différents (transport d'un feu de sous sol dans les combles ; transport d'un feu par des gaines. Ce mode de propagation est plus courant en milieu confiné qu'en milieu ouvert. Une notion importante dans les mouvements convectifs des gaz chauds est que le mouvement se produit toujours dans le sens des pressions les plus élevées vers les pressions les plus faibles. En milieu sous-ventilé, les effets de pressions sont issus principalement des phénomènes d'expansion thermique et des phénomènes de flottabilité. La Figure 6 donne un aperçu de la localisation et des niveaux de surpression générés par un incendie en local semi-ouvert et en local fermé.



Figure 6 : effets de pression dans un local semi-ouvert et dans un local fermé



Figure 7 : principe de propagation de la combustion par transmission de chaleur

3.1.2.2 PAR DEPLACEMENT DES SUBSTANCES EN COMBUSTION

Le déplacement des substances peut se faire de différentes manières :

- **Par les gaz :** dans un feu, la combustion est souvent incomplète par manque d'oxygène et donc plus particulièrement dans le cas des incendies en milieu confiné. De ce fait, il subsiste des nappes de gaz imbrûlés. La
- Réf. : INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné

combustion de ces nappes peut se poursuivre sur une distance notable avec parfois une rupture de flamme, puis réinflammation à une distance variable par un nouvel appel d'air. Ces distances peuvent être importantes.

- **Par les liquides :** Le liquide en feu s'écoule et entre en contact avec d'autres substances combustibles.
- **Par les solides :** la propagation se fait par brandons ou escarbilles. Les brandons sont des fragments de solides en ignition pouvant franchir des distances importantes (100 à 150 m) avec l'aide du vent. Les escarbilles sont des petites particules incandescentes qui se déplacent sur quelques mètres.

3.1.2.3 Les differentes etapes de la propagation d'un incendie en milieu confine

Le mécanisme de propagation du feu en espace confiné sous ventilé fait appel aux différents modes de transmission de la chaleur dont certains sont privilégiés en fonction de la progression du feu. Il est donc important pour décrire ce mécanisme de distinguer différentes étapes.

Etape 1 (Figure 8) :

L'inflammation du combustible initiateur de l'incendie est à l'origine d'une flamme localisée. Cette flamme est source de rayonnement infrarouge dont l'intensité peut atteindre des valeurs de l'ordre de 200 kW/m² au contact de la flamme. Les matériaux combustibles situés à proximité subissent alors une sollicitation thermique importante capable d'engendrer à leur tour leur combustion.



Figure 8 : Propagation d'un feu en espace confiné sous-ventilé – développement de la flamme

La température élevée des flammes induit des forces d'Archimède importantes. Le développement de l'incendie durant cette phase se fait donc majoritairement dans le sens vertical ascendant. Toutefois, la propagation latérale n'est pas exclue mais sa vitesse est moins rapide. D'autre part, lorsque la flamme est bloquée par le plafond, la propagation latérale de la flamme se développe alors davantage. Le schéma de la Figure 9 permet d'illustrer la manière dont se propage en priorité la flamme. La propagation descendante et au niveau du sol reste faible. Les coins sont particulièrement propices au développement de la flamme car les deux murs constituant le coins rayonnent l'un sur l'autre, ce qui favorise la montée en température et l'inflammation des revêtements de surface combustibles.



Figure 9 : directions privilégiées du développement de la flamme (flèches en rouge)

Etape 2 (Figure 10) :

Au bout d'un certain temps, une couche thermique contenant les gaz chauds et les suies se forme en partie supérieure du local par effet de gravité. La présence de cette couche entraîne le début de la pyrolyse des éléments combustibles présents en partie supérieure. Cette pyrolyse est générée à la fois par les phénomènes de convection naturelle des gaz chauds et par le rayonnement de la flamme et des fumées.



Figure 10 : Propagation d'un feu en espace confiné - apparition de couches thermiques, influence du rayonnement et de la convection naturelle

Etape 3 (Figure 11) :

En raison du confinement et de l'absence d'extraction suffisante, les gaz de combustion et les suies s'accumulent en partie haute. De fait, la couche thermique n'atteint pas un équilibre et commence à descendre (Heskestad, 1986). Ce phénomène entraîne une inflammation des produits combustibles par convection au contact des gaz chauds.



Figure 11 : Propagation d'un feu en espace confiné - descente des couches thermiques, pyrolyse et inflammation des produits au contact des gaz chauds

3.1.3 TRANSITION VERS L'EMBRASEMENT GENERALISE : LE FLASH-OVER

Lorsque l'apport en air frais est suffisant, l'incendie poursuit sa progression jusqu'un stade particulier se traduisant par une élévation importante de la température dans le local en feu dépassant les 500°C. Cette phase particulière est représentée sur la figure suivante.



Figure 12 : phase d'apparition du flash_over

Le phénomène de flash-over est un phénomène qui a été très largement étudié depuis les années 1970 autant d'un point de vue expérimental que numérique.

3.1.3.1 CONDITIONS D'OCCURRENCE DU PHENOMENE DE FLASHOVER

Au cours du développement du feu, la partie supérieure de la flamme entraîne de plus en plus d'air vicié, souillé de produits de combustion. Ceci mène à une augmentation du taux d'accumulation des vapeurs combustibles partiellement brûlées et de fumées pleines de suies. Etant donné que la température de la couche de gaz chauds continue à s'élever, cette dernière rayonne vers la partie inférieure de la pièce avec une plus grande intensité, augmentant non seulement la vitesse de combustion du feu initial, mais également la vitesse de pyrolyse des surfaces combustibles voisines. Cette situation implique en définitive :

- d'une part, une couche chaude de gaz combustibles et de fumées située en partie supérieure du local,
- d'autre part, une couche froide plutôt constituée d'air frais et située en partie basse de la pièce.

Dans ce cas, les conditions sont réunies pour engendrer le flashover.

L'occurrence du flashover dépend donc a priori de deux conditions essentielles (Face Au Risque, 1996) :

- le local doit être suffisamment ventilé pour alimenter le feu en oxygène lors de sa phase de croissance décrite ci-avant. Il est à noter que la combustion devient très difficile en dessous d'un taux d'oxygène inférieur à 12%,

 la quantité de combustibles doit être suffisante par rapport au volume de la pièce.

Si la première condition n'est pas établie, le feu risque de manquer d'air assez rapidement ce qui va engendrer l'apparition d'un feu couvant et une diminution des températures dans la pièce (cf. Figure 13). Cette phase est en générale à l'origine d'une production importante de gaz imbrûlés et de substances dangereuses. Dans la suite du document, il sera indiqué que ce type de feu peut être à l'origine du phénomène de backdraft.



Figure 13 : Extinction par manque d'oxygène

La seconde condition est directement liée au fait qu'en partie haute du local, se crée ou non une couche de gaz chauds possédant une température suffisamment élevée. Des essais ont montré que cette température doit être d'environ 500 – 600 °C pour qu'il y ait embrasement généralisé de la couche chaude puis du reste de la pièce (d'où flashover) (Hagglund & al., 1974 ; Fang, 1975). A noter qu'en général, lors d'un flashover, des flammes émergent également très largement du local par les ouvertures (propagation de la flamme aux gaz et fumées s'évacuant par les ouvertures). Dans les mêmes conditions de géométrie, Waterman (1968) a conclu qu'un flux radiatif d'approximativement 20 kW/m² reçu au niveau du sol était requis pour qu'un flashover se produise. Les études expérimentales réalisées par la suite ont confirmé ces deux critères de criticité qu'impliquent la température de la couche supérieure des gaz chauds et le flux radiatif reçu au sol (Drysdale, 1998).

Par ailleurs, il est à noter que le monoxyde de carbone qui est un gaz combustible issu soit d'une combustion incomplète soit d'une pyrolyse de matière combustible (pyrolyse du bois par exemple) possède une température d'auto-inflammation de 605 °C (INRS, 1994) ce qui pourrait expliquer en partie l'inflammation spontanée de la couche chaude pour ce même niveau de température. De plus, pour que la couche chaude s'auto-enflamme, il faut également que les concentrations de gaz combustibles et d'air la composant soient comprises dans une plage définie entre les limites d'inflammabilité (domaine d'inflammabilité d'un gaz). Le fait d'augmenter la température d'un gaz inflammable engendre un élargissement de ce domaine d'inflammabilité (diminution de la LII¹ et augmentation de la LSI²).

3.1.3.2 EVENEMENTS ANNONCIATEURS D'UN FLASHOVER

Des signes précurseurs d'un flashover sont généralement visibles aux abords du local en feu et peuvent ainsi alerter les pompiers du danger imminent (Face Au Risque, 1996) :

- la présence d'ouvertures dans le local permettant d'alimenter continuellement en air le feu,
- la visualisation de flammes locales bien jaunes,
- une chaleur intense due aux températures excessives,
- la visualisation, en partie haute des ouvertures (à l'interface fumée/air), de « langues » de flammes appelées également en langue anglo-saxonne, « rollover ».

Ce phénomène de « roll-over » se produit à la fin de la phase de croissance : des imbrûlés situés au niveau du plafond peuvent être expulsés hors de la pièce par surpression. Ils se mélangent à l'air extérieur et lorsque le domaine d'inflammabilité est atteint, des flammes peuvent se former au niveau du plafond à l'interface fumée/air. Ces « roll-over » sont considérés en général comme les prémices d'un flashover.

3.1.4 L'INCENDIE PLEINEMENT DEVELOPPE

Cette phase correspond au pic de puissance de l'incendie Elle peut durer plusieurs heures en fonction de la quantité de combustible disponible.

¹ LII : Limite Inférieure d'Inflammabilité.

² LSI : Limite Supérieure d'Inflammabilité.

Réf. : INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné



Figure 14 : phase de l'incendie pleinement développé

Cette étape suit l'étape d'embrasement généralisé. Elle est caractérisée par une température de l'ordre de 800-900°C. Elle suppose que l'apport d'air frais dans le local est suffisant pour assurer la combustion de l'ensemble des matériaux inflammables contenus dans l'enceinte en feu. C'est au cours de cette phase que le risque de propagation d'un local à un autre est le plus important. En effet, en cas de communication entre les locaux, la convection des fumées transporte une quantité d'énergie importante capable d'aller enflammer les combustibles contenus dans la pièce voisine. D'autre part, la conduction à travers les parois du local en feu peut conduire à l'échauffement de la face opposée des parois et être ainsi à l'origine de l'inflammation de produits situés à proximité des murs dans la pièce voisine.

3.1.5 PHENOMENES PARTICULIERS LIES AUX INCENDIES SOUS-VENTILES

Les locaux dits non-ventilés, tels que définis dans le présent référentiel, le sont en général suffisamment pour permettre un apport d'air frais capable d'alimenter un incendie dans un processus normal de développement, c'est à dire comprenant les étapes décrites auparavant, à savoir :

- l'initiation,
- la propagation,
- l'embrasement généralisé,
- le feu pleinement développé et extinction par manque de combustible.

En effet, à titre d'exemple, la présence de bouches d'aération naturelles, le bris de vitres soumises aux effets thermiques de l'incendie, la présence d'un système de ventilation sanitaire, l'effondrement de la structure constituent des causes possibles permettant d'assurer un apport d'air frais suffisant pour alimenter l'incendie.

En revanche, cela n'est pas toujours le cas et il existe des situations fortement confinées où le développement de l'incendie est entièrement contrôlé par la quantité d'air disponible dans le local en feu. Il est important de rappeler à ce stade que la combustion devient très difficile pour une concentration en oxygène dans le milieu inférieure à 12%. Ces situations correspondent aux incendies sousventilés où différents phénomènes spécifiques peuvent être observés. Ces phénomènes sont les suivants :

3.1.5.1 LE PHENOMENE DE PULSATION

Ce phénomène se manifeste par une oscillation importante de la température du local telle que représentée sur la Figure 15.



Figure 15 : phénomène de pulsation

Ce processus s'enclenche après une diminution de la puissance de l'incendie suite au manque d'oxygène. La température dans le local en feu se met alors à chuter, ce qui entraîne une diminution volumique des gaz contenus dans le local. Cette diminution volumique se traduit par une pression négative dans le local (cf. Figure 16). L'air extérieur est alors entraîné à l'intérieur par les ouvertures disponibles. Cet air permet alors une reprise de la combustion générant une augmentation de la température du local et donc une dilatation des gaz créant une pression positive dans l'enceinte chassant les fumées vers l'extérieur ainsi que l'oxygène encore disponible. La puissance chute alors de nouveau et le processus se répète alors successivement, ce qui conduit à la pulsation observée.

> > ré inflammation possible

Figure 16 : Effets de pression à l'origine du phénomène de pulsation

3.1.5.2 LE BACK-DRAFT

Ce phénomène se traduit sur la courbe d'évolution de l'incendie présentée sur la Figure 17 par une montée brutale de la température dans le local en feu. Lorsqu'il apparaît, il est toujours précédé par une phase d'auto-extinction de l'incendie liée au manque d'oxygène et présentée précédemment sur la Figure 13.



Figure 17 : Phénomène de Back-draft

Par rapport au phénomène de flashover, assez peu d'études ont été conduites sur le phénomène de backdraft (Fleischmann, 1999 ; Gottuk, 1999 ; Weng, 2003). La plupart des paragraphes qui suivent présentent plus particulièrement l'étude expérimentale menée par Gottuk (1999). Cette étude s'inscrivait principalement dans un programme ayant pour but d'améliorer les techniques d'intervention des pompiers de l'US NAVY. Dans cette optique, une meilleure compréhension du phénomène de backdraft était nécessaire.

3.1.5.2.1 CONDITIONS D'OCCURRENCE

Si le local est totalement hermétique ou presque (légère entrée d'air sous la porte par exemple), le feu va se développer initialement avec le peu d'oxygène présent dans la pièce, puis va rapidement manquer d'air. Cette situation désigne typiquement un feu couvant qui génère des produits de combustion incomplète du type monoxyde de carbone, méthane et autres hydrocarbures et particules de carbone (suies). La chaleur accumulée lors du développement de l'incendie peut également entretenir la vaporisation continue d'un combustible, créant ainsi une grande quantité d'imbrûlés. L'atmosphère contenue dans la pièce est alors riche en gaz combustibles, si le feu ne s'éteint pas complètement et s'il reste quelques points d'incandescence, il ne manque plus qu'un dernier élément pour qu'il y ait réaction : l'oxygène. L'entrée d'air brutale dans la pièce peut s'obtenir de différentes façons :

- soit par le bris d'une fenêtre sous l'effet de la chaleur ou de l'action volontaire des pompiers,
- soit par l'ouverture malencontreuse d'une porte.

3.1.5.2.2 PHENOMENOLOGIE DU BACKDRAFT

La Figure 18 présente la phénoménologie du backdraft en déclinant ce phénomène en plusieurs étapes. Le paragraphe suivant décrit ces différentes étapes.

Un backdraft peut se développer à partir de feux de matériaux combustibles solides ou de liquides inflammables qui, en s'appauvrissant en oxygène, génèrent une atmosphère riche en combustibles (Figure 18-1). Si de l'air se retrouve injecté soudainement dans l'espace contenant cette atmosphère viciée par l'ouverture d'une porte ou par une fenêtre brisée (Figure 18-2), un courant d'air frais s'écoulera par gravité dans le local tandis que les gaz, riches en combustibles, plus chauds, s'évacueront vers l'extérieur par la partie haute de l'ouverture (Figure 18-2). L'air et les gaz riches en combustibles se mélangeront (Figure 18-3) le long de l'interface entre les deux écoulements de gaz et d'air frais (de sens opposé). Si, localement, un mélange inflammable se forme, une déflagration peut se produire dès que le mélange entre en contact avec une source d'inflammation (Figure 18-4). La déflagration provoquera le réchauffement des gaz et leur expansion, poussant ainsi les gaz imbrûlés à l'extérieur du local devant le front de flamme (Figure 18-5). Ces gaz se mélangeront avec l'air extérieur à l'espace en feu. Comme la flamme traverse le local et passe par l'ouverture, elle enflamme au passage un mélange très riche en gaz imbrûlés situés à l'extérieur du local provoquant ainsi l'occurrence d'une boule de feu et d'une onde de pression (Figure 18-6). Le backdraft est désigné d'ailleurs assez souvent comme une explosion de fumées dans lesquelles il y a des imbrûlés (Face Au Risque, 1996). La Figure 19 montre la photo d'une boule de feu engendrée par un backdraft lors d'essais menés par Gottuk (1999). Le phénomène de backdraft se définit plus particulièrement entre le moment de l'entrée d'air brutale (Figure 18-2) et le moment de l'effet de souffle (Figure 18-6).



Figure 18 : Développement d'un backdraft (Gottuk, 1999).



Figure 19 : Boule de feu induite par un backdraft lors d'un essai mené par Gottuk (1999)

3.1.5.2.3 PARAMETRE INFLUENÇANT L'OCCURRENCE DU PHENOMENE DE BACKDRAFT

Mis à part la ventilation qui, comme on a pu le constater précédemment, est un facteur déterminant dans l'apparition du backdraft, une condition doit également intervenir sur la quantité de combustible contenue initialement dans la pièce par rapport au volume de celle-ci.

Les différents essais réalisés par Gottuk (1999) sur le phénomène de backdraft mettaient en jeu un feu initiateur de gasoil dans un local clos. Ces essais ont montré qu'il existait une corrélation entre l'occurrence d'un backdraft et la valeur de la fraction massique de combustible. En dessous d'une certaine fraction critique de combustible, le backdraft ne se produit pas. Ce concept de fraction massique critique de combustible peut s'illustrer en utilisant un diagramme standard d'inflammabilité ou diagramme ternaire. La Figure 20 présente comme exemple le diagramme ternaire d'explosivité de l'hexane mélangé à l'oxygène et à l'azote.



Figure 20 : Diagramme ternaire d'explosivité (Gottuk, 1999).

Ce diagramme consiste en trois axes représentant la concentration massique de combustible, d'oxygène et d'azote. Tous les mélanges se situant dans la plage en grisée sont inflammables. Le point A représente l'air pur sans combustible.

Pour un feu de local clos qui a consumé tout ou presque l'oxygène présent dans le local, les flammes visibles vont peu à peu s'amoindrir pour disparaître complètement et laisser place à un feu couvant. L'espace se retrouve alors riche en combustible (soit en raison de la combustion incomplète durant l'incendie soit en raison de la pyrolyse continue du combustible). De plus, il est raisonnable de supposer que les produits de combustion (tels que le CO₂) jouent le rôle d'inerte et qu'ils peuvent être représentés dans ce diagramme par l'azote. Ainsi, donc, le mélange présent dans la pièce s'illustrera par un point situé le long de l'axe de l'azote (points D, C ou B par exemple). Le point C désigne par exemple un mélange de 11 % de combustible et de 89 % de gaz inertes (azote + produits de combustion).

La ligne entre le point C et le point A représente la variation de composition du si une ouverture était faite dans le local. Cette ouverture permettrait à l'air frais de s'écouler à l'intérieur de la pièce et de se mélanger à la composition désignée par le point C. Etant donné que la ligne C-A vient tangenter le domaine d'inflammabilité, ceci implique que le point C désigne la fraction massique critique de combustible nécessaire pour obtenir un mélange inflammable avec l'air et donc l'apparition d'une explosion de fumées ou backdraft.

Ainsi, comme le montre le diagramme, un mélange appauvri en oxygène avec une concentration en combustible supérieure au point C (c'est-à-dire point D par exemple) sera en mesure de produire un mélange inflammable après qu'il se soit mélangé avec suffisamment d'air (ligne D-A).

A contrario, une concentration en combustible inférieure à celle du point C (point B par exemple) ne produira jamais de mélanges inflammables (ligne B-A) et aucun backdraft ne pourra donc se produire.

Tous ces résultats s'entendent pour une atmosphère homogène initialement dans la pièce totalement saturée en combustible et en gaz inertes. Toutefois, il est raisonnable de penser que l'atmosphère initiale du local puisse avoir une concentration non nulle en oxygène. Dans ces conditions, la fraction massique critique de combustible sera plus faible (point F). La valeur de cette fraction massique critique est ainsi fonction de la teneur en oxygène de l'atmosphère présente dans le local au moment de l'entrée d'air frais. Sans présence d'oxygène, cette valeur est maximale (Gottuk, 1999).

3.1.5.2.4 EVENEMENTS ANNONCIATEURS D'UN BACKDRAFT

Certains évènements se manifestant au niveau du local en feu peuvent avertir les pompiers quant au risque de backdraft (Face Au Risque, 1996) tels que :

- la présence de fumée noire devenant gris jaune qui désigne une combustion incomplète,
- une chaleur excessive due au confinement de l'incendie,
- évacuation par les quelques interstices (fente sous la porte par exemple) de fumées noires de suies par bouffée en raison de la convection et de la turbulence,
- mouvements d'air soudains et rapides,
- pas de flammes visibles, seules des flammes bleutées : feu couvant.

Si ces signes précurseurs sont reconnus à temps avant que le phénomène de backdraft ne se déclenche, des conditions particulières d'intervention sont à prévoir.

3.1.5.3 PHENOMENE DE REPRISE DU DEVELOPPEMENT

Ce phénomène apparaît dans les mêmes conditions qu'un backdraft suite à un apport soudain d'air frais dans le local à l'exception que la température initiale des imbrûlés est supérieure à leur température d'auto-inflammation. Ces gaz s'enflamment donc rapidement au contact de l'air. Le processus de mélange formant un nuage explosif tel que défini dans le backdraft n'a donc pas le temps de se réaliser. Le phénomène explosif n'apparaît donc pas et s'apparente plutôt au phénomène du flash-over.



Figure 21 : Reprise du développement

3.2 LA DISPERSION DES FUMEES DANS LES INFRASTRUCTURES VENTILEES

Les ouvrages tels que les tunnels et les galeries souterraines sont en général dotés de systèmes de ventilation mécanique dont le rôle est de contrôler les phénomènes de dispersion de fumées. Le système de ventilation est en principe conçu par rapport à une stratégie d'évacuation du personnel présent dans l'infrastructure. Deux types de stratégies sont à retenir :

1. Pousser les fumées vers une zone où il n'y a pas de personnes. Dans le cas des tunnels, cela concerne les ouvrages monodirectionnels pour lesquels les véhicules restent bloqués que d'un seul côté de l'incendie. La ventilation adoptée est appelée ventilation longitudinale. La vitesse du courant d'air créé par la ventilation doit alors être supérieure à une vitesse appelée « vitesse critique » à partir de laquelle l'ensemble des fumées est repoussé d'un seul côté. Cette vitesse dépend de plusieurs paramètres tels que la puissance de l'incendie, la pente de la galerie et le rapport hauteur sur largeur de la galerie. Si la vitesse critique n'est pas atteinte, un phénomène de retour de fumées vers l'amont appelé « backlayreing » est alors observé. Ce type de ventilation peut être assuré soit par des batteries d'accélérateurs ou par le jeu du soufflage et de l'extraction d'air sur les différents cantons³ si l'ouvrage est équipé d'un système de ventilation transversale. L'objectif étant dans tous les cas de créer une surpression suffisante en amont du foyer de l'incendie.

³ canton : dans le cas d'un tunnel long, celui-ci est découpé en plusieurs tronçon de ventilation. Chaque tronçon, appelé canton, est géré par un ventilateur et une gaine indépendants des autres cantons.

Réf. : INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné



Figure 22 : déplacement des fumées en ventilation longitudinale

2. Maintenir la stratification des fumées et extraire celle-ci en plafond. La vitesse longitudinale doit alors être réduite au niveau du foyer de manière à ne pas déstabiliser la couche stratifiée de fumées chaudes. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer d'un système de ventilation transversale. Ce système permet de mettre en dépression une gaine de désenfumage. Des trappes de désenfumage sont alors ouvertes au niveau desquelles les fumées sont aspirés vers la gaine de désenfumage. Pour maintenir la stratification des fumées, la vitesse du courant d'air longitudinal doit être inférieure à une vitesse dite vitesse de déstratification. Cette vitesse de déstratification reste en l'état actuel des connaissances difficile à déterminer car les fumées peuvent être stratifiées au niveau du foyer et se déstratifier plus loin. En particulier, la présence de véhicules peut être à l'origine d'une déstabilisation de la couche chaude.



Figure 23 : maintien de la stratification – ventilation transversale

4. MODELISATION DES PHENOMENES

Il existe un certain nombre de modèles qui permettent d'évaluer les conséquences des incendies en milieu confiné. Le choix du modèle dépend alors du niveau de précision souhaité dans l'évaluation et également des moyens et du temps disponible pour réaliser les calculs de simulation

4.1 LES MODELES SIMPLES ET EMPIRIQUES

4.1.1 PRINCIPE

Ces modèles reposent sur des équations algébriques ou des approches analytiques simples et proviennent souvent de corrélations établies à partir de données expérimentales. Ils ont en général été conçus pour un usage spécifique comme par exemple l'estimation de la montée en puissance d'un incendie ou de la température de la couche chaude dans la pièce où a lieu l'incendie.

Ces modèles peuvent être utilisés seuls ou bien être incorporés à des modèles plus complexes tels que ceux décrits après, c'est-à-dire les modèles à zone et les modèles de champs communément appelés CFD (Computational Fluid Dynamic). Par exemple, des modèles empiriques décrivant l'évolution de la chaleur dégagée par l'incendie au cours du temps peuvent être employés dans un modèle CFD pour prescrire le comportement de l'incendie. Le modèle CFD prédit alors les températures, vitesses et concentrations en fumées dans le reste de la pièce et du bâtiment.

Sont présentés tout d'abord les modèles relatifs aux phénomènes se produisant pendant la phase de croissance d'un incendie : les modèles décrivant le taux de dégagement de la chaleur, la propagation des flammes, la pyrolyse des combustibles, le panache thermique et la couche chaude. Ensuite, des modèles s'intéressant aux phénomènes de flashover et de backdraft sont décrits. Enfin, des modèles regardant plus spécifiquement les moyens de détection et suppression des incendies sont présentés.

4.1.2 ESTIMATION DU TAUX D'ENERGIE DEGAGEE

Pour pouvoir déterminer le comportement d'un incendie afin d'évaluer si les occupants auront le temps de se sauver et si la structure résistera suffisamment longtemps, il s'agit en premier lieu d'estimer l'énergie ou la chaleur dégagée par l'incendie. Celle-ci permet ensuite de déterminer des grandeurs telles que la hauteur de flamme, la position de l'interface air chaud - air froid en cas de stratification, les températures, la concentration en produits de combustion. Ces dernières permettront de déterminer la tenabilité des locaux pour les habitants et la résistance des structures.

Il est aussi souvent nécessaire de déterminer le taux de chaleur dégagée, c'est-àdire la chaleur dégagée par unité de temps, exprimée en Watts ou en Joule/second. Celui-ci dépend de la vitesse à laquelle se produisent les réactions de combustion qui produisent de la chaleur.

Le taux de chaleur dégagée dépend du type de combustible, de sa quantité, de son orientation mais aussi des effets que le confinement peut avoir. Il y en a deux principalement :

- les gaz chauds s'accumulent dans le haut de la pièce et chauffent le plafond et les parois. Ces surfaces, ainsi que les gaz chauds émettent de la chaleur radiative sur la surface combustible, ce qui accélère le taux de combustion;
- 2) Le confinement a tendance à restreindre la disponibilité de l'oxygène nécessaire à la combustion mais les ouvertures (fenêtres, portes, fissures) ou la ventilation forcée peuvent au contraire apporter de l'oxygène. Le taux de combustion dépendra donc des conditions de ventilation de la pièce (taille et emplacement des ouvertures, débit d'air de la ventilation ou au niveau des ouvertures; ce dernier pouvant dépendre par exemple des conditions climatiques si l'ouverture donne sur l'extérieur).

Il existe différentes méthodes pour estimer le taux de chaleur dégagée : certaines reposent entièrement sur des tests expérimentaux alors que d'autres essaient de décrire par des équations certains phénomènes, comme par exemple les modèles de pyrolyse et de propagation de flamme. Les équations obtenues sont assez complexes et en général elles sont résolues numériquement plutôt qu'analytiquement. En particulier, ces modèles plus avancés sont utilisés dans des modèles numériques de type CFD. Ils seront donc décrits plus loin. Ils restent tout de même assez empiriques car il n'est pas encore possible de modéliser tous les phénomènes , nombreux et complexes, qui interviennent à partir des seules propriétés physico-chimiques du combustible. Ainsi, il est important de réaliser que même les modèles les plus complexes tels que les modèles tridimensionnels CFD reposent sur des relations empiriques.

4.1.2.1 ESTIMATION A PARTIR DE TESTS EXPERIMENTAUX

Les différents tests

Idéalement, les tests devront être effectués avec le combustible auquel on s'intéresse sous une forme identique (par exemple, s'il s'agit de vêtements : pliés et superposés ou bien sur un cintre) et dans des conditions proches des conditions réelles : c'est-à-dire dans une pièce ayant une géométrie et une taille similaires à la pièce à laquelle on s'intéresse et avec une ventilation semblable (soit les position et taille des ouvertures). Si le confinement n'a pas une influence importante sur le développement du feu, on peut alors utiliser des mesures provenant de calorimètres 'ouverts', c'est-à-dire où il n'y a ni confinement ni restriction en apport d'oxygène.

Ces tests à grande échelle sont toutefois difficiles et coûteux à réaliser. Ils ne sont donc pas beaucoup utilisés. A la place, des expériences à plus petite échelle sont employées. Il s'agit alors d'extrapoler les résultats à grande échelle et pour le type de confinement du scénario étudié.

Extrapolation des résultats des tests

Il y a essentiellement deux méthodes pour mesurer l'énergie libérée : soit mesurer la quantité d'oxygène consommée, soit mesurer le débit de masse de combustible perdu. Dans le premier cas, on déduit la quantité d'énergie produite en multipliant la masse d'oxygène consommée en kilogramme par 13 000 kJ. Dans le deuxième cas, on obtient le débit d'énergie avec l'équation :

 $\dot{Q} = \chi \, \dot{m} \, \Delta H_c$ $\dot{Q} = \chi \, A_f \, \dot{m}'' \, \Delta H_c$

ou bien

 \dot{m} est le débit de masse perdu (en kg/s) et \dot{m}'' est le débit de masse perdue par unité de surface horizontale (en kg/m²/s). A_f est la surface horizontale du combustible. ΔH_c est la chaleur de combustion complète (en kJ/kg). χ est le taux d'efficacité de la réaction de combustion.

Les valeurs de chaleur de combustion complète sont connues pour de nombreux produits et sont disponibles dans la littérature. Les valeurs moyennes de débits de masse perdues peuvent se trouver dans la littérature pour certains produits, par exemple Babrauskas (2002).

L'efficacité de la combustion χ dépend :

- De la nature du combustible : Les substances dont la combustion produit une flamme peu visible, c'est-à-dire qui produit peu de fumées telles que les alcools ont une efficacité proche de 1.
- Des conditions de ventilation :
 L'efficacité de la combustion diminue de façon notable avec le manque en oxygène, ce qui peut se produire dans des pièces de petite taille.

Il n'est donc pas toujours facile de déterminer χ .

Aussi, les valeurs obtenues pour les débits d'énergie seront d'autant plus fiables que les valeurs des débits de masse perdue proviennent de tests réalisés dans des conditions expérimentales proches du scénario étudié, c'est-à-dire de tests à grande échelle et dans un confinement ayant les mêmes caractéristiques que celles du scénario étudié.

L'extrapolation des résultats de tests à plus petite échelle, ou même à grande échelle mais réalisés dans des conditions de confinement différentes, est plus délicate. Le mieux consiste à utiliser des modèles incluant les principaux phénomènes physiques, comme par exemple des modèles de pyrolyse décrits plus loin, pour extrapoler les mesures faites à petite échelle. Ces modèles restent malgré tout assez complexe sans toutefois inclure tous les phénomènes physiques. Sinon, il existe des lois empiriques pour obtenir les débits d'énergie de l'incendie à partir de mesures à petite échelle réalisées dans des calorimètres ouverts mais seulement pour certains combustibles.

Parmi ceux-ci, citons le cas des flaques et des palettes de bois.

Pour les flaques, les relations empiriques utilisent des mesures de débits de masse perdue réalisées avec des flaques de grande taille et des mesures de la propriété radiative de la flamme. Ces relations donnent alors le débit d'énergie maximum atteint en fonction de ces valeurs et du diamètre de la flaque. Il est aussi possible d'obtenir le débit d'énergie de l'incendie en fonction du temps si le taux de régression, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'épaisseur de la flaque diminue, a été déterminé expérimentalement. Les équations empiriques et les valeurs des paramètres pour un grand nombre de combustibles liquides peuvent se trouver par exemple dans Drysdale (1998); Babrauskas (2002). Il est à noter qu'il est supposé que la taille des flaques est petite par rapport à la taille du confinement, autrement dit que l'apport en oxygène n'est jamais limité.

Il existe aussi des relations pour les palettes de bois. Celles-ci prennent en compte les caractéristiques des tasseaux qui constituent la palette, ainsi que leur disposition, la hauteur de la palette, la masse initiale de bois, et la ventilation de l'espace fermé où la palette est stockée. Ces relations sont décrites dans Babrauskas (2002).

D'autres relations ou indications sont données pour estimer le débit d'énergie pour d'autres combustibles tels que des chaises, câbles électriques, etc... (Babrauskas (2002))

4.1.2.2 EVOLUTION TEMPORELLE DU TAUX D'ENERGIE

Les modèles simples cités précédemment permettent d'évaluer le débit d'énergie moyen ou maximal atteint par l'incendie. Or dans la plupart des cas, celui-ci variera au cours du temps. On distingue en fait trois phases (voir Figure 24): la phase de croissance pendant laquelle l'incendie devient de plus en plus puissant à partir de l'instant d'ignition jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur maximale ; la phase stationnaire pendant laquelle l'incendie reste à sa puissance maximale ; puis une phase de décroissance pendant laquelle l'incendie diminue jusqu'à son extinction.



Figure 24 : Les trois phases d'un incendie au cours du temps

Il est parfois nécessaire d'obtenir l'évolution du débit au cours du temps afin de décrire plus précisément l'incendie et donc calculer aussi avec plus de précision les conséquences.

En particulier, si l'on s 'intéresse à l'évacuation des personnes, il sera souhaitable d'étudier le comportement de l'incendie sur 30 minutes; pour déterminer la résistance des structures, la durée devra s'étendre sur une période de 2 à 3 heures.

La phase de croissance

Il est assez courant d'utiliser des courbes standard pour décrire la phase de croissance en fonction du temps *t* de la forme :

$$\dot{Q} = \alpha \left(t - t_0 \right)^p$$

où t_0 est la période d'incubation, α représente un taux de croissance. Cette équation permet d'obtenir une approximation raisonnable du développement d'un incendie pour de nombreux combustibles.

L'exposant *p* est souvent pris égal à deux. La valeur de α peut se trouver dans la littérature pour certains combustibles (Karlsson et Quintiere (2000)).

Type de croissance	Exemples de combustibles	Valeur de α (kW/s ²)		
Lente	Meubles massifs	0,0029		
Moyenne	Matelas, meubles capitonnés	0,0117		
Rapide	Papier, boîtes en carton, tapisseries	0,0469		
Ultra-rapide	Liquides inflammables, vieux meubles et matelas	0,1876		

Sinon, il est de coutume de considérer trois grandes catégories d'incendie selon leur taux de croissance et de leur associer une valeur de α (voir Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des courbes standard de croissance

Des indications sur l'appartenance de certains combustibles à une classe de croissance sont données dans Karlsson et Quintiere (2000).

La phase stationnaire

La période de croissance est suivie soit par une phase où un taux de combustion maximum est atteint (l'incendie est dit alors contrôlé par le combustible), soit par une phase où il n'y a pas suffisamment d'oxygène pour entretenir la combustion. (l'incendie est alors dit contrôlé par la ventilation). Ce dernier cas peut conduire à un backdraft si le combustible non brûlé dans la pièce s'enflamme dans la pièce voisine ou au niveau des ouvertures lorsqu'il rencontre de l'oxygène.

Dans tous les cas, il faut faire des hypothèses pour déterminer le débit d'énergie maximum et le temps de durée de la phase stationnaire.

Si l'espace contenant l'incendie n'a pas d'ouverture vers les pièces voisines mais seulement vers l'extérieur, la valeur maximale du débit d'énergie peut être évaluée en considérant l'air disponible pour alimenter la combustion. Des relations existent pour déterminer la quantité d'air entrant dans une pièce par une ouverture (Karlsson et Quintiere (2000))

La phase de décroissance

Souvent, seules les 30 premières minutes après ignition sont considérées, notamment pour évaluer l'évacuation des personnes et il est considéré que l'incendie se poursuit à pleine puissance pendant cette période.

Si toutefois la quantité de combustibles est limitée, on peut alors essayer d'évaluer la phase de décroissance en fonction de celle-ci en se basant sur des données expérimentales disponibles telles que celles mentionnées plus haut – débit de masse perdue, taux de croissance.

Pour évaluer la résistance des structures, les conséquences de l'incendie doivent être évaluées sur une période plus longue mais ce sont alors des courbes de température standard qui sont utilisées plutôt que d'évaluer celles-ci à partir du débit d'énergie. Ceci n'entre pas dans le cadre de ce rapport.

4.1.3 PANACHE THERMIQUE ET HAUTEUR DE FLAMME

Une fois le débit d'énergie de l'incendie connu, il est alors possible d'utiliser des relations empiriques pour déterminer les caractéristiques de la flamme et du panache d'air chaud, qui transporte la chaleur et les fumées toxiques ainsi que de la couche d'air chaud qui se développe sous le plafond.

4.1.3.1 PANACHE AU CENTRE D'UNE PIECE

Les travaux de Zukoski (Zukoski et al. (1980)), Hekestad (Hekestad (2002)), Mc Caffrey (McCaffrey (1979)) et Thomas (Thomas et al. (1963)) ont permis d'exprimer grâce à des données expérimentales les caractéristiques des panaches en fonction de la puissance de l'incendie, représentée par le débit d'énergie évalué précédemment.

Les relations établies par Zukoski sont basées sur des équations analytiques dont les paramètres ont été définis avec des données expérimentales, voire modifiés de façon à permettre un meilleur ajustement. Les équations analytiques ont été obtenues au départ en faisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices constituant un panache dit 'idéal':

- 1. le panache est supposé avoir une forme conique (voir Figure 25) dont la base inférieure est un point;
- 2. toute l'énergie de l'incendie est injectée au point -source et est transportée sans perte autrement dit aucune chaleur radiative n'est émise ;
- 3. Les variations de densité en fonction de la hauteur sont supposées négligeables ; seule la différence entre la densité de l'air ambiant et la densité du panache est considérée ; cette hypothèse restreint l'utilisation des équations de Zukoski à des incendies de faible puissance.
- 4. la vitesse ascendante de l'air du panache est supposée constante sur toute section horizontale du panache et la vitesse de l'air en dehors du panache est

supposée nulle ; de la même façon, la température est supposée constante sur une section horizontale ;

5. L'entraînement de l'air sur les côtés du cône est supposé proportionnel à la vitesse ascendante du panache.



Figure 25 : Panache en forme de cône au-dessus de la source (Karlsson et Quintiere (2000))

Les relations données par Zukoski expriment la débit d'air dans le panache, ainsi que la température et la vitesse ascendante en fonction de la hauteur.

Comparé au travail de Zukoski, Hekestad a utilisé des hypothèses plus réalistes et donc moins restrictives : le panache est toujours supposé avoir une forme conique mais dont la base ponctuelle n'est qu'une origine virtuelle située à une distance z_0 en dessous de la source réelle de l'incendie ; l'énergie de l'incendie est remplacée par l'énergie convective de façon à prendre en compte l'énergie perdue par radiation qui ne contribue pas à l'augmentation des température et vitesse du panache ; les profils de température et de vitesse ne sont pas supposées constants sur une section horizontale mais avoir une forme gaussienne. ; enfin les variations de densité en fonction de la hauteur sont prises en compte. Les relations établies expriment la distance z_0 de l'origine virtuelle ; la hauteur de la flamme ; le rayon du panache ; la température et la vitesse du panache sur l'axe ; le débit de masse d'air entraîné dans le panache.

Mac Caffrey a divisé, d'après des observations expérimentales, le panache en trois zones : la zone de flamme continue, la zone de flamme intermittente et la zone de panache. Il a établi des relations donnant les température et vitesse sur l'axe du panache et défini les paramètres de ces relations pour chacune des trois zones. Il est intéressant de remarquer que les résultats obtenus avec les relations de MacCafrey sont 10% plus élevées que ceux calculés avec les équations de Hekestad.

Thomas a complété le travail de MacCaffrey en étudiant des feux pour lesquels la hauteur de flamme est beaucoup moins grande que le diamètre de la source.

Dans ces conditions, le débit d'air entraîné dépend beaucoup moins de la puissance mais par contre, il dépend du périmètre de la source.

Il faut noter que toutes ces relations ont été obtenues lors d'expériences réalisées sans confinement, par conséquent elles ne sont pas valables lorsque l'incendie est proche d'une paroi. Le panache est aussi supposé axisymmétrique ; les relations ne conviendront donc pas pour des situations où le panache sera fortement influencé par la ventilation.

De plus, ces relations ne dépendent pas du combustible mais seulement de l'énergie dégagée par l'incendie qui est au mieux réduite pour ne considérer que l'énergie convective. En réalité, les pertes d'énergie par radiation varient avec le combustible et par voie de conséquence les températures de flamme aussi. Par contre, pour les zones au-dessus de la zone de flamme continue définie par MacCaffrey, la dépendance du panache en fonction du combustible est moins importante.

Toutefois, pour des incendies très grands, les relations décrites ici tendront à sous-estimer les températures : la température prédite ne dépassera pas 800°C alors que les températures réelles peuvent atteindre 1200°C.

Les équations de ces différents modèles sont décrites dans des ouvrages généraux tels que Karlsson et Quintiere (2000).

4.1.3.2 COUCHE D'AIR CHAUD SOUS LE PLAFOND

Lorsque le panache atteint le plafond, l'air chaud le constituant se répand alors dans les directions radiales. Afin de déterminer le temps de réponse des équipements de détection et extinction d'incendie, il est important de déterminer la température et la vitesse de l'air chaud qui se propage sous le plafond (voir Figure 26).



Figure 26 : Développement d'une couche d'air chaud sous le plafond (Karlsson et Quintier (2000))

La couche d'air chaud sous le plafond a une épaisseur entre 5 et 12% de la distance *H* entre la source incendie et le plafond ; la vitesse et la température maximales se produisent à une distance sous le plafond d'environ 1% de *H*. A mesure que l'air se propage le long du plafond, l'air ambiant est entraîné et refroidit la couche d'air chaud. Celle-ci est aussi refroidie par les échanges de chaleur avec le plafond.

Alpert a obtenu empiriquement des relations qui expriment les températures et vitesses maximales de la couche chaude en fonction du débit d'énergie de l'incendie et de la distance *H*. Celles-ci sont aussi fonction de la distance radiale par rapport au point d'impact du panache avec le plafond. Ces relations ne sont pas valables à proximité du foyer. On trouvera ces relations dans Karlsson et Quintiere (2000).

Il est important de noter que ces relations ne sont valables que lorsque la couche d'air chaud n'a pas atteint les parois latérales de la pièce. Une fois les parois latérales atteintes, la couche d'air chaud s'épaissit et les estimations obtenues par les relations ont une incertitude de plus en plus importante. Aussi, les relations sont valables lorsque l'incendie est stationnaire, c'est-à-dire que lorsque le débit d'énergie est constant. Des relations valables pour un débit d'énergie variable au cours du temps ont été proposées par Hekestad et Delichatsios (Alpert (2002)).

Si ce n'est pas le panache mais la flamme elle-même qui atteint le plafond, les gaz non brûlés qui atteindront le plafond se disperseront radialement puis entraîneront de l'air ambiant qui servira à alimenter la combustion. Une flamme circulaire se formera sous le plafond. Des relations permettent de calculer la longueur de l'extension de la flamme le long du plafond (Karlsson et Quintiere (2000)).

4.1.3.3 CAS PARTICULIER DES ENTREPOTS



Figure 27 : Incendie d'un rack dans un entrepôt (Sheppard (2004)).

Les panaches qui proviennent de l'incendie de racks dans les entrepôts sont en fait plus étroits, plus chauds et ont une vitesse plus élevée que les panaches axisymmétriques qui sont décris par les relations plus haut. En effet, dans le cas des panaches axisymmétriques, l'air entraîné par celui-ci provient de toutes les directions sur toute la hauteur du panache alors que dans le cas de racks, l'air ne peut passer qu'au niveau des espaces entre les marchandises stockées. Ceci limite donc la quantité d'air ambiant qui peut être entraînée, donc le débit de masse entraîné, et par conséquent le panache est moins refroidi. Les vitesses seront plus élevées du fait de la plus faible masse d'air dans le panache. Il se crée en fait un effet cheminée entre les racks.

Des relations similaires à celles établies pour des panaches axisymmétriques peuvent être employés mais les valeurs des paramètres sont différentes. Aussi, la position de l'origine virtuelle change : celle-ci se trouve en fait au-dessus de la position réelle de l'incendie alors qu'elle était en dessous dans le cas de panaches axisymmétriques. Ces relations se trouvent dans Sheppard (2004).

4.1.3.4 CAS PARTICULIER DES TUNNELS

Dans les tunnels, les relations ci-dessus ne sont pas valables car la ventilation mécanique des tunnels influencent la flamme et le panache. Notamment, ceux-ci ne sont plus axisymmétriques mais penchés. Aussi, le plafond des tunnels n'est pas nécessairement plat puisque la section d'un tunnel est souvent en forme d'arc.

Kurioka et al. (2003) ont fait des expériences à petite et grande échelle avec des tunnels de sections différentes et en utilisant des sources incendie rectangulaires. Ils en ont déduit des relations qui donnent l'angle de la flamme, la hauteur apparente de la flamme, la température maximale et la position de la couche chaude en fonction du débit d'énergie, de la section du tunnel et de la vitesse de la ventilation mécanique. Deux cas ont été considérés : lorsque la flamme atteint le plafond et lorsqu'elle ne l'atteint pas (voir Figure 28).



Figure 28 : Flamme et panache dans un tunnel

4.1.4 FLASHOVER

Lorsque la température s'élève jusqu'à atteindre la température d'autoinflammation des combustibles présents dans la pièce, il se produit un flashover : le feu jusqu'alors localisé s'étend à toutes les surfaces combustibles de la pièce. Deux critères sont généralement employés pour déterminer si le flashover a lieu : si le flux thermique reçu au niveau du sol est d'environ 20kW/m² ou bien si la température atteinte dans la couche chaude, sous le plafond, est de 600°C. Le premier critère est préférable car puisqu'il prend en compte les facteurs de vue.

Certains chercheurs tels que Thomas (1981), Babrauskas (1980) ou encore McCaffrey et al. (1981) ont examiné un critère faisant appel à une puissance critique dégagée par la combustion nécessaire à l'apparition d'un flashover (Walton et Thomas (2002)). Pour ce faire, ils ont tout d'abord cherché à déterminer la température dans la pièce avant que le flashover ne se produise. Ils se sont basés sur l'expression du bilan thermique réalisé sur la couche chaude (Figure 29) tel que :

$$\dot{Q} = \dot{m}_g C_p \left(T_g - T_\infty \right) + \dot{q}_{loss} \tag{kW} \tag{1}$$

où : \dot{Q} : Puissance thermique libérée par l'incendie (kW)

 \dot{m}_{g} : Débit de gaz sortant de la pièce (kg/s)

 C_p : Chaleur spécifique de gaz (kJ/kg K)

 T_g : Température de la couche chaude (K)

 T_{∞} : Température ambiante (K),

 \dot{q}_{loss} : Pertes de chaleur radiatives et convectives (kW).



Figure 29 : Interaction du panache enflammé et du plafond – Formation d'une couche de fumée (Thomas & al., 1980).

Ils ont alors utilisé le critère de température de la couche chaude qui mêle physique et empirisme puisqu'une des hypothèses est de considérer que juste avant le flashover, la température de la couche chaude atteint une valeur de l'ordre de 500 - 600 °C.

Ainsi, en comparant les expériences et la physique et en supposant que les pertes de chaleur à travers les parois du local (parois verticales, sol et plafond) correspondent uniquement à un transfert radiatif, Babrauskas (1980) a défini la puissance thermique critique \dot{Q}_{FO} nécessaire à l'occurrence d'un flashover en fonction de la surface des parois et de la surface et hauteur de la ventilation (ouverture quelconque, fenêtre, porte,...) telle que :

$$\dot{Q}_{FO} = 361 A_W \sqrt{H} + 8.1 A_T$$

(kW) [2]

où A_T : surface des parois du local (m²).

 A_W : surface de l'ouverture (m²),

H : hauteur de l'ouverture (m).

L'équation **[2]** peut fournir une estimation de la puissance thermique maximale à ne pas dépasser lors d'un incendie dans une pièce pour éviter l'apparition d'un flashover. Cependant, ce type d'application requiert un minimum d'informations sur les puissances thermiques dégagées par les différents produits combustibles contenus dans la pièce et susceptibles de participer au feu initiateur. La puissance thermique critique peut être atteinte par la combustion soit d'un seul élément combustible soit de plusieurs en simultané.

4.1.5 DETECTION ET SUPPRESSION DES INCENDIES

Il est important de considérer les moyens de détection et de suppression d'incendie pour évaluer si un lieu est sûr en cas d'incendie.

4.1.5.1 DETECTION DE LA FUMEE

Lorsqu'un lieu est équipé de moyens de détection et/ou de suppression automatique d'incendie, il est important d'évaluer leur temps d'activation dont dépendra leur efficacité. Ceci nécessite la connaissance de la température près du détecteur et le temps de réponse du détecteur. La première peut être obtenue par les équations citées précédemment ou bien par des modèles plus complexes tels que les modèles à zones ou les modèles CFD décrits plus loin.

4.1.5.2 MOYENS D'EXTINCTION

Les moyens de suppression d'incendie sont principalement des sprinklers.

Les mécanismes d'extinction commencent à être compris mais pas encore suffisamment pour être capable d'identifier et modéliser tous les phénomènes qui interviennent. Ils peuvent être divisés en deux classes.

Il y a tout d'abord ceux qui agissent directement sur la flamme. Ils consistent à retirer de l'énergie à la flamme et au panache d'air chaud, ceci en agissant sur les phénomènes chimiques et thermodynamiques associés à la libération et à la distribution d'énergie lors de la réaction de combustion. Ainsi la température de la flamme diminue et lorsqu'elle atteint une valeur inférieure à la valeur critique nécessaire à maintenir la combustion, il y a extinction. Les paramètres qui

influencent ce processus sont les tailles des gouttelettes, leur vitesse intiale, l'énergie produite par l'incendie et la position de ce dernier.

Il y a ensuite les mécanismes qui agissent indirectement sur la flamme : l'oxygène est dissous dans la vapeur d'eau qui provient de l'évaporation des gouttelettes due à la chaleur de l'incendie.

La difficulté principale pour la modélisation de l'extinction est de prédire la quantité de brouillard qui atteint la zone de l'incendie.

4.2 LES MODELES A ZONES

4.2.1 PRINCIPE

Les modèles à zones consistent à décomposer le système en sous-éléments ou zones. Pour chacune des zones, des lois globales et semi-empiriques sont utilisées pour décrire ce qui s'y passe, y compris les échanges de masse et chaleur avec les zones voisines. Les propriétés physiques et quantités calculées, telles la température, concentration des fumées, sont supposées uniformes dans une zone.

Pour la plupart des modèles, une zone correspond à une pièce d'un bâtiment, un bureau ou un hall industriel. Toutefois, certains modèles décomposent une pièce en zones dont les frontières ne correspondent à aucune barrière réelle mais essaient de prendre en compte les phénomènes physiques de façon à ce que chaque zone ait des propriétés homogènes. La Figure 30 montre l'exemple d'un modèle employant deux zones pour prédire les conséquences d'un incendie dans une pièce ventilée : la zone 1 comprend le panache thermique au-dessus de la source incendie et la couche horizontale d'air chaud sous le plafond ; la zone 2 comprend le reste de la pièce.



Figure 30 : Modèle à deux zones (incendie dans une pièce ventilée, reproduit de Chow et al. (2006) avec la permission d'Elsevier)

La Figure 31 montre un modèle à six zones appliqué à un incendie dans un tunnel : la zone 1 comprend comme pour le modèle précédent le panache thermique au-dessus de la source incendie et la couche sous le plafond mais seulement sur une longueur de 50 mètres ; la zone 2 représente le reste du tunnel sur la longueur de 50 mètres ; les zones 3 et 4 représentent respectivement les couches supérieure et inférieure sur une longueur de 50 mètres en aval des zones

1 et 2 ; les zones 5 et 6 représentent de même les couches supérieure et inférieure sur une longueur à nouveau de 50 mètres en aval des zones 3 et 4. Au total 150 mètres de longueur de tunnel sont représentés. Les hauteurs des zones 2, 4 et 6, représentant les couches inférieures sont respectivement de 6,2 ; 6,4 et 6,6 mètres. Cette subdivision permet de prendre en compte la variation de l'épaisseur de la couche d'air chaud en fonction de la distance de l'incendie.



Figure 31 : Modèle à six zones (incendie dans un tunnel, reproduit de Chow (1996) avec la permission d'Elsevier)

Ces modèles reposent sur de nombreuses hypothèses, basées sur l'expérience et l'observation de développement d'incendie. Comme un incendie dans une pièce ne se comporte pas comme un incendie dans un atrium, un outil ne peut pas couvrir toutes les situations et reste spécifique à un type de problème.

4.2.2 DIFFERENTES APPROCHES

Mowrer et Stroup (1998) ont identifié onze éléments communs qui caractérisent un incendie en milieu confiné :

- 1. Le terme source de l'incendie,
- 2. Le panache de l'incendie,
- 3. Le jet sous le plafond ,
- 4. L'interaction du panache et du jet sous le plafond,
- 5. La couche d'air chaud,
- 6. La couche inférieure,
- 7. Les ouvertures permettant une ventilation,
- 8. Les systèmes de ventilation (injection, extraction ou une combinaison des deux),
- 9. Les parois (sol, murs, plafond),
- 10. Les cibles (les personnes, les équipements, les appareils de protection incendie),
- 11. Les systèmes de protection incendie (détection, alarme, suppression).

Le niveau de sophistication d'un modèle peut être déterminé par les niveaux de détails, de résolution et d'incertitude avec lesquels sont décrits chacun de ces éléments.

Les équations obtenues sont couplées et nécessitent des techniques numériques pour être résolues. Les modèles peuvent donc être évalués essentiellement en regardant comment sont décrits chacun des éléments ci-dessus. L'étendue des niveaux de sophistication est revue ci-dessous pour chaque élément.

4.2.2.1 LE TERME SOURCE INCENDIE

Quelques rares modèles essaient de prédire la cinétique de l'incendie, tel par exemple COMPBRN qui calcule la puissance d'incendie et les taux de combustion. Toutefois, ces modèles restent rudimentaires et reposent sur de nombreux paramètres d'entrée. Des résultats corrects ne sont obtenus que lorsque ceux-ci sont bien définis, ce qui requiert des tests préalables.

En fait, la plupart des modèles à l'heure actuelle, y compris les modèles à champs, se 'contente' de calculer les conséquences d'un incendie à partir de la connaissance de la cinétique de l'incendie qui est prescrite. Ainsi, les modèles peuvent être capables de représenter un ou plusieurs types d'incendie à condition de donner un minimum d'information, comme par exemple:

- Un brûleur à gaz ou feu torche: une vitesse de combustion est imposée qui est indépendante des conditions environnantes ;
- Un feu de flaque : le taux de combustion est calculé en fonction de la chaleur renvoyée à la surface horizontale de la flaque, qui est généralement caractérisée par son diamètre ou sa section donnés en paramètres d'entrée.
- Un feu de solide : les propriétés du combustible sont données ainsi que la géométrie du solide et le taux de combustion est évalué en fonction de la chaleur reçue par les surfaces du solide.
- Un feu de paroi : celui-ci se produit à la surface des murs exposés à une source de chaleur et implique les peintures ou autre revêtement.

Certains modèles peuvent prédire la dispersion de plusieurs composants chimiques, ce qui permet d'évaluer l'impact de l'incendie sur les personnes et les équipements. En particulier, les concentrations en monoxyde et dioxyde de carbone sont utilisées pour évaluer si l'air d'un espace est encore respirable. D'autres quantités comme les particules de suie et le chlorure d'hydrogène peuvent être importantes pour déterminer les dommages qui peuvent être occasionnés à certains systèmes. Ceci peut être utile en particulier pour les systèmes nucléaires.

Les espèces chimiques qui sont suivies dépendent de la façon dont la chimie de combustion est traitée par le modèle. Généralement, y compris pour les modèles à champs, sont spécifiés des facteurs de conversion qui représentent les taux de transformation des molécules de combustible et d'air en différents produits de combustion. Les valeurs de ceux-ci proviennent de tests réalisés généralement en laboratoire et ne peuvent pas pour l'instant être prédits à partir des mécanismes fondamentaux mis en jeu qui sont complexes et qui font intervenir un trop grand nombre d'équations. Certains modèles toutefois, comme CFAST, permettent de spécifier ces facteurs de conversion en fonction des conditions de ventilation dans l'enceinte et donc de prendre en compte une production plus importante de produits nocifs par des feux sous-ventilés. Là encore, la détermination des facteurs de conversion en fonction se fait de façon empirique, à partir de tests en laboratoire.

En général, la vitesse de pyrolyse du combustible est spécifiée et la génération de produits de combustion est déduite des facteurs de combustion et la production de chaleur des caractéristiques des combustibles. Certains modèles permettent de limiter la chaleur émise en fonction de l'oxygène disponible dans l'espace confiné. Il est à noter que pour les modèles qui n'offrent pas cette possibilité, la chaleur générée par l'incendie qui est prédite peut être irréaliste !

La chaleur globalement atteinte lors d'un incendie dans un espace confiné peut être suffisante pour enflammer d'autres combustibles dans la pièce et ainsi contribuer à augmenter la puissance et la gravité de l'incendie. Malheureusement, la possibilité de prédire l'inflammation, puis la cinétique de combustion, d'autres produits reste aujourd'hui encore très limitée.

Ainsi, la définition du terme source incendie, c'est-à-dire à l'heure actuelle la spécification de la puissance d'incendie et en particulier de son évolution au cours du temps, est cruciale pour l'obtention de résultats réalistes. Des efforts sont ainsi faits pour obtenir les données empiriques nécessaires à la définition des paramètres d'entrée. La fiabilité des résultats dépend toutefois en grande partie de la disponibilité et de la qualité de ces données.

4.2.2.2 LE PANACHE INCENDIE

Les produits de combustion sont chauds par rapport à l'air ambiant et ils sont donc soumis à des forces de gravité ascendantes. Ils forment un panache ascendant au dessus de l'origine de l'incendie et entraînent l'air ambiant. Cet air entraîné va refroidir le panache au fur et à mesure que celui-ci monte.

Ces panaches thermiques, et en particulier les panaches axisymétriques, ont été étudiés expérimentalement. Ainsi, les profils verticaux de vitesse et de température ont été mesurés pour un grand nombre de feux et des corrélations ont été déduites pour extrapoler ces données à tout incendie. Ces corrélations font apparaître la puissance de l'incendie et le diamètre caractéristique de la source incendie qui permettent de calculer les caractéristiques de la zone contenant le panache. Toutefois, l'utilisation de ces corrélations pour des situations différentes de celles étudiés expérimentalement peut conduire à des résultats peu fiables (voir par exemple Mowrer et Stroup (1998; SFPE (2002)).

Une méthode dite de réflection a été développée pour prendre en compte l'effet de la présence d'un obstacle tel qu'un mur qui fait perdre au panache son axisymétrie. Cette méthode consiste à augmenter l'intensité du feu en fonction du nombre de parois l'entourant de façon à reproduire la réflection de la chaleur sur les parois et à diminuer le diamètre de la source incendie afin de limiter l'entraînement d'air qui est gêné par la présence des parois. Cette méthode a donné des résultats acceptables mais elle n'a pas été beaucoup utilisée. Les outils CFAST, COMPBRN et FIVE, par exemple, offrent de tels ajustements.

D'autres modifications peuvent être adoptées pour prendre en compte des cas particuliers pour lesquels le panache n'est pas axisymétrique :

- lorsque la source incendie est horizontale, c'est-à-dire avec une dimension beaucoup plus large que l'autre ;
- lorsque la source est proche d'une arrivée d'air, par exemple près d'une fenêtre, et que cette arrivée d'air influence la forme et position du panache.

L'influence de la présence d'obstacles autres que des parois n'a par contre été que relativement peu étudiée et il n'existe donc pas de corrélations qui permettent de définir les caractéristiques de ces zones.

4.2.2.3 LE JET SOUS LE PLAFOND

Lorsque (et si) les gaz chauds atteignent le plafond, ceux-ci ne sont plus transportés verticalement mais horizontalement le long du plafond dans une direction les éloignant de la source incendie, ceci jusqu'à ce qu'ils atteignent les parois verticales de l'espace confiné ou tout autre obstacle.

Il n'existe des corrélations décrivant cette situation que pour deux géométries : un plafond infini, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de paroi verticale pour fermer l'espace ; et un plafond avec une dimension beaucoup plus grande que l'autre, correspondant par exemple au cas d'un couloir. Dans tous les cas, les parois sont relativement lisses.

Des corrélations ont aussi été établies pour des plafonds inclinés mais celles-ci ne semblent être utilisées pour l'instant par aucun modèle.

4.2.2.4 L'INTERACTION DU PANACHE ET DU PLAFOND

Si la couche de gaz chauds se développe de façon significative dans la zone confinée, l'air ambiant devient chaud du fait de l'échange de chaleur et ainsi, l'air entraîné par le panache et la couche chaude a une température assez proche de l'air au sein du panache et de la couche chaude. Par conséquent, cet air n'est plus refroidi aussi efficacement et la température du panache et de la couche chaude sont plus uniformes. Plusieurs méthodes analytiques ont été développées pour tenir compte de ce phénomène mais les prédictions obtenues par celles-ci ont été peu vérifiées.

4.2.2.5 LA COUCHE D'AIR CHAUD

La couche d'air chaud qui se forme sous le plafond a des propriétés de température et concentrations en gaz relativement homogènes. Ceci est dû au mélange turbulent au niveau de la zone de re-circulation d'air du panache et de la couche d'air chaud ainsi qu'au sein de la couche d'air chaud elle-même. Ceci a été relativement bien vérifié pour des incendies réels sauf dans les cas où la présence d'une ventilation crée un courant d'air près du plafond.

C'est pourquoi les modèles à zones qui considèrent la couche d'air chaud comme une zone et évaluent les propriétés de cette zone en les supposant uniformes à l'aide de bilans de masse et de chaleur au niveau de l'interface de la couche donnent de bons résultats. Par contre, les prédictions s'éloignent des observations lorsqu'il existe un courant d'air près du plafond qui détruit l'homogénéité de la couche d'air chaud et tend à produire un gradient de température linéaire, du sol au plafond. Malheureusement, les conditions pour lesquelles la couche d'air chaud n'est plus homogène ne sont pas bien définies.

4.2.2.6 LA COUCHE INFERIEURE

La couche inférieure a des propriétés qui varient de façon moindre que la couche chaude. Certains modèles considèrent simplement que cette couche reste aux conditions ambiantes de température et concentration en fumées. D'autres, comme par exemple CFAST, la traitent comme une zone aux propriétés homogènes et calculent celles-ci à l'aide de bilans de masse et de chaleur.

En fait, les fumées peuvent pénétrer la couche inférieure essentiellement au niveau des parois et des ouvertures où il se produit un mélange entre couche chaude supérieure et couche inférieure.

L'effet de mélange au niveau des parois est rarement inclus dans les modèles. Il peut être pris en compte en créant au moins trois zones dans le modèle au lieu de deux : une représentant la couche chaude, une la couche inférieure et une zone intermédiaire pour la zone de mélange. De tels modèles ont été créés pour prédire plus particulièrement les effets de ventilation sur la dispersion des fumées dans les tunnels. En effet, dans cette configuration, une zone de mélange apparaît entre couches inférieure et supérieure due à la ventilation relativement importante, si bien qu'un modèle à trois zones, représentant trois couches horizontales, est plus approprié qu'un modèle à deux zones. FASIT est l'exemple d'un tel modèle. Plus récemment, un modèle à plusieurs zones horizontales, ou couches, a été développé et permet de prédire le gradient de température (Xiaojun et al. (2005)). Il a été appliqué à des incendies dans une pièce avec une ouverture et de bons résultats ont été obtenus avec une vingtaine de couches, en particulier lorsque les échanges radiatifs avec les parois ont été pris en compte (voir Figure 32).



Figure 32 : Illustration d'un modèle à plusieurs zones horizontales, ou couches, pour une meilleure prédiction de la stratification (reproduit de Xiaojun et al. (2005) avec la permission d'Elsevier)

En cas de ventilation forcée proche du plafond, une stratification a été observée probablement due à l'injection d'air frais dans la couche d'air chaud qui descend et augmente ainsi le mélange entre l'air chaud et l'air frais. Il en résulte un gradient de température au lieu d'une température uniforme dans la couche chaude. Il est difficile de prendre cet effet en compte dans les modèles à zones. Le modèle à plusieurs couches présenté ci-dessus serait a priori le plus approprié mais il n'a pas été évalué dans ce cas de figure.

4.2.2.7 Les ouvertures permettant une ventilation naturelle

Certains bâtiments ont des ouvertures qui offrent une ventilation naturelle. Cellesci peuvent être aussi bien au sol qu'au plafond ou sur les murs latéraux. En cas d'incendie, les échanges d'air à travers ces ouvertures sont gouvernés par les différences de pression qui résultent des différences entre la densité de l'air provenant de l'incendie et la densité d'air ambiante. Il peut y avoir un mélange important entre air chaud et air froid au niveau d'une ouverture lorsqu'il y a un flux sortant et entrant par cette ouverture. C'est généralement ce qui se passe au niveau des portes.

Les modèles varient quant à leur possibilité de prendre en compte une ouverture : certains se limitent à une ouverture dans une paroi latérale alors que d'autres offrent la possibilité d'inclure plusieurs ouvertures dans les parois mais aussi dans le sol et plafond.

L'effet cheminée, qui est dû à la différence de pression entre l'air intérieur et l'air extérieur au bâtiment, peut avoir une influence importante surtout pour les bâtiments hauts et aux moments où les différences entre températures intérieures et extérieures sont grandes. L'effet du vent au niveau du bâtiment peut influencer l'écoulement d'air dans l'enceinte du bâtiment en présence et en l'absence d'incendie. Certains modèles comme CFAST peuvent prendre cet effet en compte, d'autres non.

4.2.2.8 LES SYSTEMES DE VENTILATION

Certains modèles offrent la possibilité d'inclure des systèmes de ventilation, à savoir un réseau de ventilateurs et conduits d'air. Dans certains modèles, la ventilation est représentée simplement par l'inclusion d'un débit volumique d'air alors que pour d'autres modèles, il est possible de spécifier la courbe de fonctionnement des ventilateurs et les pertes de charge le long des conduits de ventilation sont évaluées.

Toutefois, l'effet de cette ventilation forcée sur le gradient de température n'est pas toujours pris en compte. Il est possible de le prendre en compte dans CFAST mais de manière rudimentaire, le modèle à plusieurs couches de Xiaojun et al. (2005) restant probablement le meilleur moyen de prédire le gradient de température.

4.2.2.9 LES PAROIS

Une partie de la chaleur de l'incendie est transmise aux parois et aux équipements présents dans l'enceinte. Celle-ci peut atteindre jusqu'à 95-100% en début d'incendie. Ensuite, la température des parois et équipements va augmenter en fonction des propriétés des matériaux les constituant et leur capacité à absorber la chaleur va s'en trouver réduite, donc la fraction de chaleur de l'incendie perdue aux parois diminuera avec le temps.

La plupart des modèles à zones traitent les parois par une méthode dite de matériau thermiquement épais avec un modèle de convection de la chaleur monodimensionnelle. Ces modèles permettent de spécifier aux parois des conditions de transferts de chaleur par radiation et convection. Par contre, aucun modèle ne prend en compte les pertes de chaleur avec les équipements tels par exemple des câbles. Pourtant ces pertes peuvent être importantes s'il y a beaucoup d'équipements et en particulier si ceux-ci se trouvent au contact d'air chaud, soit typiquement au niveau du plafond. L'absence de leur prise en compte dans les modèles conduit à une surestimation de la température de la couche chaude.

D'autres modèles tel que FIVE prennent en compte les pertes de chaleur aux parois et équipements de façon plus simple et plus globale en fixant un coefficient de perte de chaleur. La perte de chaleur est alors évaluée en multipliant ce coefficient avec la différence de température entre la paroi et l'air au contact de la paroi. Ainsi, au fur et à mesure que la température de paroi augmente, la perte de chaleur diminue.

Plusieurs modèles permettent d'enregistrer la température de paroi au cours du temps ce qui est un paramètre de sortie important lorsqu'on s'intéresse à la réponse des structures.

4.2.2.10 LES SYSTEMES DE PREVENTION (DETECTION, ALARMES, SUPPRESSION)

Certains modèles permettent de prendre en compte la réponse thermique de détecteurs pour prédire leur activation en fonction de la température prédite.

Aussi, il est parfois possible d'inclure l'effet de l'impact de gouttes d'eau sur le développement d'un incendie, comme par exemple dans CFAST.

4.2.2.11 LES CIBLES (PERSONNES ET EQUIPEMENTS)

Certains modèles permettent d'évaluer la réponse d'une cible, qui peut être une personne ou un objet, à l'exposition de flux thermiques. Ceux-ci peuvent provenir des flux radiatifs et convectifs des flammes mais aussi des zones d'air chaud et d'objets.

Plusieurs méthodes existent pour évaluer la réponse des cibles. Les deux grandes catégories sont celles qui considèrent les matériaux comme thermiquement minces ou thermiquement épais, en fonction de leur résistance à la chaleur. Il y a malheureusement eu peu de comparaison des résultats avec des mesures à grande échelle.

4.2.3 LES PRINCIPAUX OUTILS EXISTANTS

Le Tableau 2 présente une liste non exhaustive d'outils existants reposant sur des modèles à zone. Elle provient essentiellement d'un recensement effectué par Friedman (1992), remis à jour par Olenick et Carpenter (2003).

Nom du modèle	Pays d'origine	Référence	Commentaires				
Modèles pour une	e seule pièce	•					
ASET	Etats-Unis	Cooper et Strou (1982)	up Modèle pour une pièce, sans ventilation				
ASET-B	Etats-Unis	Walton (1985)	ASET en langage Basic au lieu de Fortran				
DSLAYV	Suède	NDRI (1986)					
FireMD	Etats-Unis		Modèle à deux zones pour une pièce.				
FIRM	Etats-Unis	Janssens (2000)	Modèle à deux zones pour une seule pièce				
FIRST	Etats-Unis	Mitler et Rockett (1987	Modèle pour une seule pièce avec ventilation				
HarvardMarkVI	Etats-Unis	Rockett (1990)	Version précédente de FIRST				
HEMFAST	Etats-Unis	Dietenberger (1989)	Incendie de meubles dans une pièce.				
IMFE	Pologne		Modèle pour une pièce avec ouvertures de ventilation.				
NAT	France	Curtat (1987)	Modèle pour une pièce plus particulièrement pour la réponse des structures.				
NRCC1	Canada	Takeda et Yung (1992)				
NRCC2	Canada		Modèle pour un large espace horizontal.				
OSU	Etats-Unis	Sauer et Smith (1983)					
POGAR	Russie	Astapenko et al. (1988	3)				
R-VENT	Norvège	Meland et Skaret (198	7)				
SICOM	France	(1999)					
SmokePro	Australie		Modèle pour calculer la position de la couche de fumée.				
WPI-2	Etats-Unis	Satterfield et Barne (1990)	ett				
ZMFE	Pologne						
Modèles pour plu	sieurs pièce	s					
ARGOS	Danemark	Deibjerg et al. (2003)	Modèle à compartiments				
BRANZFIRE	Nouvelle- Zélande	Wade (2004);Wa (2004)	de Modèle pour plusieurs pièces (jusqu'à 10) incluant propagation de flammes, plusieurs sources d'incendie et ventilation mécanique.				
BRI-2	Japon/Etats -Unis	Nakamura et Tana (1988);Harada et (2000)	ka Modèle à deux couches pour le transport al. de fumée dans un bâtiment à plusieurs pièces et plusieurs étages.				
CCFM.VENTS	Etats-Unis	Cooper et Forney (199	00) Modèle pour plusieurs pièces avec ventilation.				
CiFi	France	Bodart et Curtat (1987) Modèle pour plusieurs pièces.				

COMPBRN-III	Etats-Unis	Ho et al. (1988)	Modèle à compartiments.		
FAS3D	Royaume- Uni	Rylands et McIntosh (2000)	Modèle à trois couches.		
FIRAC	Etats-Unis	Nicholas et Gregory (1986)	Utilise FIRIN, en incluant des systèmes de ventilation complexes.		
FIREWIND	Australie	Shestopal (1993)	Modèle pour plusieurs pièces ave plusieurs petits sous-modèle (amélioration de FIRECALC). Inclut u module d'évacuation.		
			Code commercialisé.		
FIRIN	Etats-Unis	Chan et al. (1982)	Modèle pour plusieurs pièces avec systèmes de ventilation (conduits, ventilateurs et filtres).		
MRFC	Allemagne	Schneider et al. (1997)	Modèle pour plusieurs pièces pour le calcul du transport de fumées et de la charge thermique sur les structures.		
WPIFIRE	Etats-Unis	Haynes (1994)	Modèle pour plusieurs pièces.		
SMKFLW	Japon	Matsushita et al. (1985)	Modèle à une couche pour le transport de fumées dans les bâtiments.		
CFAST/FAST	Etats-Unis	Peacock et al. (2000)	Modèle comprenant une suite de programmes ; CFAST est le solveur et FAST l'interface.		

Modèles spécifiques à une application

phénomène de 'preflashover'									
CALTECH		Zukoski et (1980)	Kubota	a					
FFM	Etats-Unis	Dietenberger (1991)						
HYSLAV	Suède	Hagglund (198	3)						
NBS	Etats-Unis	Quintiere et (1980)	McCaffrey	/					
RFIRES	Royaume- Uni	Pape et al. (19	81)						
SP	Royaume- Uni	Wickstrom et 0 (1990)	Goranssor	١					
phé	nomène de 'po	stflashover'							
COMF2	Etats-Unis	Babrauskas (1	979)	Modèle phénomè	pour ene de	une 'postfla	pièce shover'.	pour	le
SFIRE-4	Suède	Magnusson Thelandersson	e (1970)	t Modèle d	le post	flashov	er		
F	eux de nappe								
CFIRE-X	Allemagne	Offenhauser (1991)	et al	. Modèle aux feux	plus de naj	particu ope d'h	lièrement ydrocarbu	: desti ures.	iné
ł	Atria (larges esp	oaces verticaux	()						
FMD	Etats-Unis	Milke et Mowre	er (1993)	Modèle verticaux	pour)	atria	(larges	espac	:es
ŀ	lall (large espa	ce horizontal)							

NRCC2	Canada		Modèle pour un large espace horizontal.
Cabine	d'avion		
DACFIR-3	Etats-Unis	MacArthur (1982)	Modèle pour une cabine d'avion.
Centra	les nucléaire	es	
FIRAC	Etats-Unis	Nicholas et Gregory (1986)	/ Utilise FIRIN, en incluant des systèmes de ventilation complexes. Permet de calculer la taille des particules radioactives qui deviennent transportées dans l'air suite à l'incendie.
MAGIC	France	Gautier et al. (1999)	Modèle à deux zones pour des centrales nucléaires.
Tunnel	s		
FASIT	Royaume- Uni	Charters et al. (1994)	Modèle à trois zones dans la direction verticale.
Modèles divers			
FASTlite	Etats-Unis	Portier et al. (1999)	Version limitée de CFAST.
FIGARO-II	Allemagne	Heins (1991)	Modèle pour déterminer la tenabilité.
Ozone V2	Belgique	Cadorin (2003)	Modèle plus spécifiquement pour la réponse des structures. Disponible gratuitement : <u>http://www.ulg.ac.be/matstruc/Download.html</u>

Tableau 2 : Modèles à zones existants (d'après Olenick et Carpenter (2003))

4.2.4 VERIFICATION ET VALIDATION

Les modèles à zones reposent sur de nombreuses hypothèses et sur des relations semi-empiriques pour décrire les principaux paramètres du comportement d'un incendie. Comme ceux-ci dépendent du scénario incendie, en particulier de la configuration géométrique, un modèle à zones a un domaine d'application restreint. Il faut donc prendre connaissance des limites de validité du modèle, données en principe par le développeur. Les validations effectuées, soit par les développeurs soit les utilisateurs, donnent aussi une appréciation de la performance du modèle. Si un modèle est utilisé en dehors de son domaine de validation, il est conseillé d'effectuer soi-même un contrôle des résultats en comparant avec des mesures.

Certains développeurs essaient d'étendre le domaine d'application de leurs modèles en apportant des modifications aux relations semi-empiriques. Ceci fait en général appel à des paramètres qui sont à définir par l'utilisateur. Il faut faire attention à quelle valeur doit être utilisée pour le scénario étudié, et quelle valeur a été utilisée pour la validation d'un cas similaire.

Il est à noter que l'application d'un modèle à zones requiert une connaissance préalable du comportement de l'incendie pour définir correctement les zones du modèle et donc même un modèle validé pour un cas proche de l'application qui en

est faite peut donner de mauvais résultats si le problème a été mal défini par l'utilisateur.

4.3 LES MODELES CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

4.3.1 PRINCIPE

Les modèles Computational Fluid Dynamics, dits aussi modèles à champs, permettent d'obtenir une solution approchée des équations tridimensionnelles, stationnaires ou transitoires, de Navier-Stokes qui régissent le comportement des fluides. Comme ces dernières ne peuvent pas être résolues directement car ce sont des équations différentielles non linéaires et couplées, elles sont tout d'abord discrétisées. Pour ce faire, le volume du domaine de calcul est subdivisé en un nombre d'éléments de volume beaucoup plus petit. Le nombre de ces éléments dépend du scénario et des modèles physiques et numériques utilisés mais son ordre de grandeur est de quelques dizaines de milliers pour une pièce de 10 m³. Les équations sont discrétisées pour chacun de ces éléments. Ainsi est obtenu un large système d'équations algébriques fortement couplées. Une solution est calculée grâce à l'emploi de méthodes numériques itératives.

La solution obtenue consiste en la valeur des variables sélectionnées pour chacun des éléments. Pour les incendies, les variables qui sont considérées sont la température de l'air, les composantes de la vitesse de l'air et les concentrations des produits toxiques émis lors de la combustion. La visibilité à travers les fumées peut aussi être déduite de la concentration des fumées (voir Figure 33).

Les modèles CFD permettent donc de prédire en détail ce qui se passe dans une enceinte, y compris lorsque celle-ci a une géométrie compliquée, et de prendre en compte les effets tridimensionnels. Par contre, ils nécessitent beaucoup plus de puissance de calculs que les modèles à zones. Il est donc souvent nécessaire de trouver un compromis quant au degré de sophistication de la modélisation des phénomènes physiques afin d'avoir des temps de calcul qui restent raisonnables.



Figure 33 : Illustration d'un modèle CFD

4.3.2 DIFFERENTES APPROCHES

Pour construire, un modèle CFD, il y a plusieurs étapes :

- La construction de la géométrie (paragraphe 4.2.1)
- La construction du maillage (paragraphe 4.2.1)
- La sélection des modèles physiques (paragraphe 4.2.2 à 4.2.6) : en fait, ce sont rarement les équations exactes de Navier-Stokes qui sont à l'origine des modèles CFD parce que la résolution des équations exactes serait trop coûteuse en temps de calcul comme c'est le cas pour la turbulence et la combustion. Ce sont donc des équations approchées qui sont proposées pour décrire les phénomènes physiques et l'ensemble de ces équations constitue un 'modèle'.
- La prescription des conditions aux limites (paragraphe 4.2.7)
- La sélection de méthodes numériques pour obtenir une solution approchée (paragraphe 4.2.8).
- Le traitement des résultats (paragraphe 4.2.9).

Pour chacune des étapes, différentes méthodologies apparaissent dans les outils CFD existants. Ces différentes approches sont revues et discutées pour l'application au calcul des conséquences d'un incendie. Ceci permettra ainsi d'évaluer un outil CFD en fonction du type de problème étudié et des modèles physiques et numériques disponibles dans l'outil.

4.3.2.1 GEOMETRIE ET MAILLAGE

La géométrie tridimensionnelle du scénario modélisé est tout d'abord construite : elle est représentée par un ensemble de surfaces qui correspondent au confinement de l'espace, c'est-à-dire représentent les murs des pièces, les sols, les plafonds, les escaliers, mais aussi les objets ou obstacles dans les pièces comme les meubles.

Dans le cas où le bâtiment n'est pas fermé mais a des ouvertures extérieures, celles-ci seront aussi représentées par des surfaces sur lesquelles seront imposées des conditions aux limites qui décriront l'influence de ce qui se passe à l'extérieur du domaine de calcul sur ce qui se passe à l'intérieur de ce dernier.

Dans certains outils, comme par exemple FDS, la géométrie ne peut être construite que par blocs, c'est-à-dire que les surfaces ne peuvent être que des carrés ou des rectangles. Ceci convient pour la plupart des bâtiments dont les pièces sont parallélépipédiques. Toutefois, il est plus difficile de représenter par blocs des bâtiments d'architecture moderne, qui incluent des espaces avec des formes circulaires, elliptiques ou autres, et qui peuvent avoir des toits qui ne sont pas plats. Certains outils permettent de représenter des courbes dans les géométries et sont plus adaptés pour ces cas spécifiques.

Il existe aussi différents types de maillage qui correspondent à des mailles ou éléments de formes différentes. D'une part, il y a des maillages structurés composés d'éléments hexagonaux qui forment des lignes continues à travers le domaine. Parmi ceux-ci, on trouve des maillages rectilignes pour lesquels les formes curvilignes de la géométrie sont représentées approximativement par des 'escaliers' (voir Figure 34-I) et des maillages 'body-fitted' qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie (voir Figure 34-II). Un autre type de maillage est le maillage non structuré qui comprend des éléments de formes diverses, qui peuvent être complexes. En conséquence, il n'apparaît pas de lignes directrices dans les maillages non structurés (vor Figure 34-II).

(III)





© British Crown copyright (2002)

Figure 34 : Maillages 2D - structurés: rectiligne (I) et 'body-fitted' (II) (d'après Tucker et Mosquera (2000));et non structuré (III) (d'après Gobeau et al. (2002))

Les maillages non structurés sont d'usage plus flexible: ils peuvent suivre les courbures des surfaces définissant la géométrie et donc être appliqués à tout type de bâtiment; aussi, il est possible de diminuer la taille des mailles à certains endroits, comme par exemple où se trouve l'incendie, sans trop augmenter le nombre des mailles dans le reste du domaine. A l'inverse, les maillages structurés conviennent plutôt aux bâtiments à géométrie rectiligne et la réduction en taille des mailles à un endroit particulier se répercute sur l'ensemble du maillage, ce qui au final peut augmenter significativement le nombre de mailles et par conséquent le temps de calcul.

Certains outils CFD offrent la possibilité d'utiliser différents types de maillage pour un même domaine de calcul et en général, tous offrent la possibilité de faire varier la taille des mailles. Toutefois, la flexibilité et la précision avec laquelle l'utilisateur peut contrôler la taille et forme du maillage varie d'un outil à l'autre.

Il est à signaler que le maillage joue un rôle important dans un calcul CFD car les résultats peuvent en dépendre. Ceci sera illustré au paragraphe 3.4.

4.3.2.2 CALCUL DE LA DENSITE DE L'AIR

Des températures relativement importantes sont générées par l'incendie qui modifient la densité de l'air. Un modèle compressible, ou faiblement compressible, doit être disponible dans le code CFD pour pouvoir prendre en compte les effets de ces variations de densité de l'air.

Certains modèles utilisent une approximation de Boussinesq pour prendre en compte la variation de la densité de l'air en fonction de la température dans les équations de quantité de mouvement. Au lieu de calculer la densité d'après la loi de gaz parfait comme ceci est fait dans un modèle compressible, celle-ci est

supposée constante sauf dans le terme de gravité des équations de quantité de mouvement pour lequel elle est supposée dépendre linéairement de la température. Cette hypothèse n'est valide que lorsque les différences de température sont de l'ordre d'une dizaine de degrés. Même si cela peut être vérifié pour une grande partie du domaine de calcul, les erreurs faites proche de la source incendie, où les températures atteignent quelques centaines de degrés, se répercutent dans le reste du domaine(Gobeau et Zhou (2002)).

4.3.2.3 MODELES DE TURBULENCE

Les incendies en milieu confiné génèrent de la turbulence qui interagit sur le mélange air-fuel et air-produits de combustion, donc influence la combustion et la dispersion des fumées. Les écoulements turbulents contiennent des tourbillons ayant une large gamme d'échelles de longueur et de temps. Pour un incendie confiné, ces échelles dépendent de la puissance de l'incendie et des dimensions du confinement mais la taille des tourbillons est typiquement comprise entre quelques millimètres et plusieurs mètres pour un même scénario (Cox (1995)). Ceci rend leur modélisation difficile.

Il existe trois grandes catégories de modèles de turbulence qui sont revues cidessous : Direct Numerical Simulation (D.N.S.) ; Large Eddy Simulation (L.E.S.) et modèles moyennés de Reynolds.

Direct Numerical Simulation (D.N.S)

Les équations exactes de Navier-Stokes sont résolues pour obtenir tous les tourbillons turbulents au sein de l'écoulement.

Toutefois, les mailles dans le domaine de calcul doivent être au moins de la taille du plus petit tourbillon et le pas de temps au maximum de la plus petite échelle de temps des tourbillons ce qui génère de grands nombres de mailles et pas de temps et donc des temps de calcul très longs, en particulier pour les écoulements fortement turbulents. Ceci rend l'application de la D.N.S. aux incendies dans les bâtiments impossible au vu de la performance actuelle des ordinateurs. Pour l'instant, ce modèle est essentiellement utilisé comme outil académique pour comprendre les phénomènes turbulents et proposer des modèles plus simples.

Large Eddy Simulation (L.E.S.)

Seuls les tourbillons de grande échelle sont prédits par un modèle L.E.S. L'effet des tourbillons de plus petite taille est pris en compte par un terme de fermeture dans les équations ou il est tout simplement ignoré.

La taille des mailles ainsi que du pas de temps doit être de l'ordre de grandeur du plus petit tourbillon résolu et donc cette technique, bien que relativement coûteuse en temps de calcul, l'est beaucoup moins qu'un modèle D.N.S. Il est donc possible de l'appliquer à des incendies en milieu confiné. Cette approche est d'ailleurs de plus en plus utilisée d'une façon générale et en particulier dans le domaine des incendies. Ceci est sans doute lié à la mise à disposition gratuite par l'institut Américain National Institute of Standards and Technology d'un outil CFD spécifique aux incendies, Fire Dynamics Simulator (FDS), basé sur la L.E.S..

La méthode L.E.S. représente a priori le meilleur compromis actuellement pour prédire un écoulement turbulent : moins coûteuse qu'une approche D.N.S., elle reste plus précise qu'un modèle moyenné de Reynolds (voir paragraphe ci-

dessous). Toutefois, les bénéfices lors de son application aux incendies restent relatifs. En effet, ce sont généralement les tourbillons de petite échelle qui agissent sur la combustion, autrement dit ceux qui ne sont pas prédits par un modèle L.E.S. Par conséquent, pour calculer les conséquences d'un incendie, un modèle de combustion relativement simple, qui ne prend pas en compte de façon détaillée l'influence de la turbulence, et identique à celui qui serait utilisé avec un modèle de turbulence moyenné doit être employé. Au final, il n'est pas évident que les résultats obtenus avec un modèle de turbulence L.E.S. seront meilleurs que ceux obtenus avec un modèle de turbulence moyenné. (Pope (2004)).

Modèles moyennés de Reynolds

Pour ce type de modèles, les équations exactes de Navier-Stokes sont moyennées. Les équations ainsi obtenues ne résolvent pas les mouvements turbulents au sein de l'écoulement mais permettent d'obtenir les caractéristiques moyennées de l'écoulement : vitesse, température, concentration en produits de combustion, ainsi que les corrélations de fluctuations moyennées.

Comme les mouvements turbulents ne sont pas résolus, il suffit que le maillage soit suffisamment fin pour permettre de capturer les phénomènes transitoires des valeurs moyennées. Le nombre de mailles nécessaire est donc beaucoup moindre que pour les méthodes L.E.S et D.N.S., ce qui donne des temps de calcul très raisonnables. Ces modèles peuvent donc être appliqués à des espaces confinés complexes et ayant un large volume.

Toutefois, les équations de ces modèles font apparaître des termes pour lesquelles des équations de fermeture du système d'équations à résoudre doivent être trouvées. Des hypothèses sont donc faites qui sont en général à l'origine des limitations de ces modèles. Aussi, les fermetures proposées font apparaître des 'constantes' dont les valeurs sont déterminées de façon empirique. Pour chacun des modèles existants, des valeurs de constantes ont été établies et acceptées de façon universelle. Celles-ci correspondent d'ailleurs souvent aux valeurs par défaut dans les codes CFD. Bien qu'elles aient été déterminées pour des configurations simples, elles ont été appliquées à de nombreux cas pratiques beaucoup plus complexes et les résultats obtenus se sont avérés acceptables.

Il est à souligner que pour l'application aux incendies, il est nécessaire d'utiliser des modèles moyennés de turbulence qui peuvent prendre en compte les effets de gravité dus aux différences de densité.

Les modèles moyennés apportent moins d'information que les modèles L.E.S et D.N.S. mais ces informations sont dans la grande majorité des cas suffisantes pour estimer la tenue des structures et des personnes en cas d'incendie. Seulement lorsque l'incendie génère des produits de combustion hautement toxiques, il pourra être nécessaire d'employer une méthode L.E.S. afin de pouvoir identifier les pics de concentration locaux et de courte durée que font apparaître les tourbillons turbulents et qui pourraient éventuellement correspondre aux conditions létales.

Le modèle moyenné de Reynolds le plus répandu est le modèle k-epsilon dont la fermeture repose sur l'hypothèse que le tenseur de Reynolds est une fonction linéaire du taux de cisaillement moyen local. Pour l'application aux incendies confinés, ces modifications doivent pouvoir prendre en compte à la fois les effets
instables liés aux différences de densité tels que ceux trouvés dans le panache thermique et les effets stables qui apparaissent près du plafond lorsqu'une couche d'air chaud se forme au-dessus de l'air ambiant plus frais.

Des modèles moyennés plus sophistiqués existent qui essaient de répondre aux limitations du modèle k-epsilon. Une équation de transport est employée pour obtenir le tenseur de Reynolds.

Modèles mixtes

Certains outils CFD permettent d'appliquer différents modèles moyennés de turbulence dans différentes parties du domaine. Ceci permet d'employer un modèle du second ordre près de la source incendie pour lesquels les performances d'un modèle plus simple comme le modèle k-epsilon sont assez limitées et de faire les calculs dans le reste du domaine avec un modèle du premier ordre qui est plus stable numériquement et présente moins de limitations plus loin de l'incendie.

La combinaison de modèles L.E.S. et moyenné est aussi à l'étude. Deux types de modèles hybrides existent : la méthode Detached Eddy Simulation (D.E.S.) et la méthode Very Large Eddy Simulation (V.L.E.S.).

Ces méthodes n'ont toutefois pas encore été évaluées pour l'application aux incendies.

4.3.2.4 MODELES DE COMBUSTION

Modèle de source volumique de chaleur

La méthode la plus simple pour modéliser les conséquences d'un incendie consiste à employer un modèle de source volumique de chaleur.

Dans ce modèle, le phénomène de combustion n'est en fait pas modélisé. Sont pris en compte seulement les effets thermiques et toxiques qui proviennent de la combustion. Une source de chaleur et de produits toxiques est imposée dans un volume prédéfini. Les caractéristiques de ce volume, taille et forme, correspondent à la zone de flamme de l'incendie dans laquelle se produit la combustion. La chaleur et les produits de combustion produits sont répartis uniformément au sein de ce volume. Les valeurs de flux de chaleur et production de produits toxiques proviennent idéalement de mesures ou bien peuvent être déduits de la connaissance de la composition du combustible et des propriétés des constituants. Il est possible de représenter le développement de l'incendie en faisant varier en fonction du temps les flux de chaleur et de produits de combustion ainsi que le volume au sein duquel ces valeurs sont prescrites. Ceci nécessite toutefois de connaître au préalable la cinétique de combustion.

Les résultats dépendent des paramètres d'entrée, et en particulier du volume de la source. Si des relations empiriques ont été établies pour déterminer la hauteur de flamme en fonction de la puissance incendie pour des situations relativement simples, tel un incendie sous un plafond infini, il existe des situations pour lesquelles il est plus difficile de définir au préalable la géométrie de la flamme. C'est le cas, par exemple, lorsque l'incendie est proche de parois ce qui va modifier l'entraînement d'air frais par la flamme et donc son approvisionnement en oxygène, ou lorsque l'incendie est soumis à une ventilation qui va influencer la

combustion. Un modèle de source volumique de chaleur n'est alors pas recommandé.

Modèles de combustion rapide

D'autres modèles ont été développés pour prédire la distribution de chaleur dans la flamme au lieu de l'imposer uniformément sur un volume prédéfini. Ces modèles sont capables de calculer la distribution de chaleur de la flamme, et donc de prédire la forme et le volume occupés par celle-ci, d'après les conditions de l'écoulement et les quantités respectives de combustible et air présentes qui sont évalués lors du calcul CFD.

Les modèles les plus simples sont basés sur l'hypothèse que la réaction de combustion se produit instantanément entre le combustible et l'air dans la limite des concentrations présentes et dans les conditions stoechiométriques. Cette hypothèse est valable lorsque le temps de combustion est très inférieur au temps de la turbulence caractérisant le temps de mélange combustible-comburant.

Le modèle de ce type le plus courant est le modèle 'Eddy-Break-Up' proposé initialement par Spalding (1971). Il suppose qu'une seule réaction se produit, qu'elle est instantanée et que tout le combustible est oxydé. Il fait intervenir une échelle de temps turbulent qui caractérise le mélange entre le combustible et l'air ambiant et qui est calculé d'après l'intensité de la turbulence présente dans l'écoulement et évaluée lors du calcul CFD. C'est ce paramètre qui en fait gouverne le processus de combustion. Ce modèle est trés utilisé pour évaluer les conséquences d'un incendie bien qu'il ne permette pas de quantifier les différents produits de combustion émis. Une équation supplémentaire peut être introduite pour chaque produit de combustion susceptible d'être généré et la quantité produite doit être spécifiée au niveau de la source incendie. Les informations nécessaires doivent provenir si possible de tests expérimentaux ou déduites des propriétés du combustible.

Modéles de combustion limitée par la cinétique chimique

En réalité, le processus de combustion n'est pas instantané mais il est limité par la cinétique des diverses réactions chimiques qui se produisent et qui sont de plus compétitives entre elles. Aussi les temps caractéristiques de ces réactions chimiques sont du même ordre de grandeur ou supérieurs au temps caractéristique de turbulence, l'hypothèse de réaction instantanée n'est plus valable.

Plusieurs modèles ont été développés pour essayer de prendre en compte la cinétique chimique des réactions. Le modèle de ce type le plus courant est le modèle dit 'laminar flamelet'. D'autres modèles plus sophistiqués sont en cours de développement mais ne sont pas encore disponibles dans les outils classiques de CFD.

Il est à noter que des diagrammes de combustion qui donnent les différents régimes de combustion en fonction de nombres adimensionnels ont été produits. Ceux-ci peuvent s'avérer utiles pour sélectionner le modèle de combustion le plus approprié pour un scénario donné. Se référer par exemple à Williams (1985) ou Borghi et Destriau (1998)

Modèles de pyrolyse

Des modèles de pyrolyse permettent de simuler la dégradation thermique et la pyrolyse de combustibles solides ou liquides. Ceux-ci évaluent les flux thermiques à la surface du combustible en prenant en compte la conduction de la chaleur au sein du combustible pour en déduire la surface soumise à pyrolyse et le taux de combustible transformé en gaz. Un modèle de combustion décrit plus haut est employé pour prédire la combustible solides ou liquides peut ainsi formés. La propagation de l'incendie au sein des combustibles solides ou liquides peut ainsi être prédite.

4.3.2.5 MODELES DE RADIATION

Vu les températures élevées atteintes par les incendies en milieu confiné, des échanges radiatifs ont lieu entre les sources de radiation que sont principalement le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les suies, et les receveurs, soit les parois solides, les mélanges de gaz et produits de combustion, et les particules de fumées.

Plusieurs types de modèles existent pour prendre en compte les effets des échanges de chaleur par radiation :

Méthode de perte de chaleur

Cette méthode se contente d'éliminer à la source la fraction de chaleur qui sera perdue par radiation. Celle-ci est généralement estimée à 25-30%. Ainsi, le flux de chaleur émis par l'incendie est fixé à la puissance de l'incendie moins les 25-30% perdus par radiation.

Le plus souvent, la chaleur ainsi transformée par radiation est complètement négligée dans la suite des calculs CFD, c'est-à-dire qu'elle n'est pas transmise aux receveurs. Glynn et al. (1996) ont toutefois essayé d'améliorer ce modèle en augmentant la température de l'air dans les mailles touchant les parois d'après la quantité de chaleur retirée de la source incendie afin de reproduire, bien que sommairement, l'effet des échanges radiatifs entre l'incendie et les parois. Les effets radiatifs ne sont malgré tout pas prédits puisque de nombreux paramètres doivent être spécifiés.

Méthode de transfert radiatif aux parois

Cette méthode évalue les transferts de chaleur par radiation aux parois d'après la température des parois, la température des gaz dans les mailles juxtaposant les parois, la concentration en fumées dans ces mailles et l'émissivité de la fumée. Cette méthode peut être employée avec la méthode précédente.

Modèles des six flux

Cette méthode, qui ne peut être appliquée qu'aux maillages structurés, fait l'hypothèse que le flux radiatif est uniforme à travers les six faces de chacune des mailles de calcul. Cette hypothèse permet de simplifier les équations différentielles intégrales qui régissent les transferts radiatifs. Une solution de ces équations peut alors être obtenue par les mêmes méthodes numériques que celles employées pour résoudre les autres équations du modèle CFD pour le calcul des vitesses, températures et concentrations en produits toxiques.

La principale limitation de cette technique est qu'elle ne prend pas en compte les transferts radiatifs qui sont obliques au maillage structuré sur lequel elle est appliquée.

Modèles de transfert discret

Cette méthode suit un certain nombre représentatif de rayons de radiation à travers le domaine de calcul et résout une équation pour obtenir l'intensité de radiation le long de chacune de ces rayons. Ces rayons suivent des directions fixées a priori mais qui sont indépendantes du maillage pour le calcul des variables hydrodynamiques. En général, les rayons ne sont suivis qu'entre les parois : ils ne se réfléchissent pas contre les parois pour être suivis jusqu'à leur extinction. Le bilan entre la chaleur absorbée et perdue par radiation est estimée pour chaque maille hydrodynamique d'après le nombre de rayons traversant la maille et l'intensité le long de celles-ci. Le bilan ainsi évalué est inclus dans l'équation d'énergie pour obtenir la température des gaz dans la maille.

Les résultats dépendent de la direction des rayons fixés au préalable et du nombre de rayons considérés. Cette méthode représente néanmoins un compromis acceptable entre précision et temps de calcul. Elle peut toutefois être coûteuse pour les espaces à géométrie complexe et/ou ayant un grand volume à cause du grand nombre de rayons qu'il faut alors considérer.

Modèles de Monte Carlo

Cette technique émet un nombre de rayons dans des directions relativement arbitraires. Celles-ci sont suivies jusqu'à ce qu'elles atteignent un obstacle ou bien disparaissent du domaine de calcul. Là encore, la fiabilité des résultats dépendent du nombre de rayons suivis. La méthode est la plus coûteuse en temps de calcul mais c'est la plus flexible et la plus fiable : elle peut être appliquée à tout type de géométrie et tout type de maillage.

Les trois dernières méthodes nécessitent le calcul des pouvoirs émissifs et absorbants locaux qui dépendent de la composition des gaz. Le calcul de ces valeurs peut se faire selon différentes approches. La plus simple consiste à supposer que les fumées sont un gaz isotherme gris avec des coefficients d'absorption constants. Cette méthode donne de bons résultats pour des incendies de petite à moyenne puissance (Modak (1979)) mais est moins fiable pour de larges incendies (de Ris (1979)). Des modèles plus sophistiqués expriment les propriétés d'émission et d'absorption localement en fonction de la température et en fonction de la composition des gaz, en particulier des concentrations en CO, CO₂, CH₄, H₂O qui émettent des radiations à des longueurs d'onde spécifiques et de la concentration en fumées qui émettent des radiations de toutes longueurs d'onde. Ces modèles ne tiennent pas compte malgré tout des effets de la turbulence dont les tourbillons peuvent créer localement et sur de courtes durées de fortes émissions de chaleur par radiation.

4.3.2.6 MODELES DE TRANSPORT DES FUMEES

Les fumées sont constituées de gaz chauds toxiques et de particules de suie. La constitution des fumées, nature et quantité des produits émis, dépendent des matières combustibles et du mode de combustion.

Elles représentent un réel danger pour plusieurs raisons :

- L'émission de gaz toxiques, en particulier de CO, est la principale cause de mortalité d'un incendie (Lee et Mellins (2006));
- Les gaz irritent les yeux et peuvent donc gêner l'évacuation des personnes;
- Les fumées chaudes peuvent causer des brûlures ;
- Les fumées réduisent la visibilité rendant ainsi plus difficile l'évacuation ;

Le mouvement des fumées est en général suivi en résolvant une équation de transport pour un scalaire passif, c'est-à-dire en supposant que les fumées suivent le même trajet que les molécules d'air. Ce sera le cas pour les gaz et les particules de suie de petites tailles. On peut ainsi espérer capturer relativement bien le comportement des particules qui peuvent être inhalées, soit les particules de diamètre inférieur à 5-10 μ m. Pour les particules plus grosses, des modèles de suivi lagrangien ont été développés, comme par exemple le modèle proposé par Chow et Yin (2004). Ceux-ci prédisent les trajectoires individuelles des particules en résolvant une équation de transport lagrangienne pour chaque particule qui prend en compte notamment leur densité contrairement à l'approche de scalaire passif.

des particules, qui conviennent mieux pour les particules plus grosses ont été proposés, par exemple par Chow et Yin (2004). Ces modèles C'est la prédiction des quantités de fumées, et leur composition, qui est plus problématique.

Généralement, la production de fumées par un incendie est déduite de facteurs de conversion qui donnent la quantité d'un produit (CO2, H2O, CO, NO, etc...) en fonction de la chaleur dégagée par l'incendie. Cette approche peut être utilisée avec un modèle de source volumique de chaleur, auquel cas la quantité de produits générés est distribuée uniformément sur le volume représentant la source incendie ; ou avec un modèle de combustion auquel cas la quantité est répartie sur la surface définissant l'incendie et la répartition des fumées dans la flamme est calculée. Cette méthode repose sur la disponibilité de données permettant d'obtenir les facteurs de conversion et elle ne prend pas en compte les conditions de ventilation auxquelles sont soumises l'incendie et qui peuvent faire varier significativement la nature et la quantité de produits émis.

Des modèles plus complexes tentent de mieux décrire la nature et les quantités de produits de combustion, en prenant en compte les différentes réactions chimiques qui interviennent, de façon assez similaire aux modèles de combustion incluant la chimie de combustion. Haynes et Wagner (1981) présentent une revue de ces modèles.

<u>Toxicité</u>

L'évaluation de la dose de fumées qu'a reçue une personne dépend de nombreux facteurs : la concentration des fumées dans l'espace, le temps d'exposition de la

personne, le taux d'absorption par les organes de la personne. L'exposition d'une personne dépend donc non seulement de la concentration en fumées dans le bâtiment mais aussi du trajet qu'a suivi la personne et du temps qu'elle a mis à faire ce trajet.

Les concentrations en fumées et la température des gaz fournis par la CFD dans tout l'espace permet toutefois d'apprécier le danger et d'évaluer l'efficacité de moyen de prévention et/ou d'intervention : ventilation, confinement de certaines zones, etc...

<u>Visibilité</u>

Là aussi un grand nombre de facteurs influencent la visibilité : la concentration, la luminance et clarté des objets, les conditions de luminosité dans l'espace (éclairage électrique ou naturel, etc...) la distance entre l'individu et l'objet, ainsi que l'acuité visuelle de la personne.

Pour obtenir la visibilité à partir des prédictions CFD de concentration en fumées, idéalement il faut intégrer tous les effets cumulatifs le long des 'lignes de vision'.

Des données expérimentales sur la visibilité ont été collectées (Jagger (1991), Ouellette (1993)). Des corrélations ont été établies qui peuvent permettre de déduire la visibilité des valeurs de concentration.

Ces corrélations restent relativement simples : sont déduits des données expérimentales une transmitance locale et un coefficient d'extinction. Ce dernier dépend des propriétés des fumées et est donc susceptible de varier dans le temps et dans l'espace. Or, il est considéré constant dans les corrélations. La visibilité est obtenue en intégrant la transmitance sur le chemin entre la personne et l'objet. Cette approche est toutefois loin de prendre en compte tous les facteurs affectant la visibilité et elle n'a pas été validée.

4.3.2.7 CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites sont définies pour prendre en compte les évènements qui sont extérieurs au domaine ou se produisent à la frontière du domaine mais qui influencent ce qui se passe dedans.

Ainsi, les conditions aux limites pour le calcul d'un incendie incluent :

- Les écoulements d'air, gaz et fumées qui entrent ou sortent du domaine par les portes, fenêtres ou autres ouvertures. Il peut même être d'ailleurs important d'identifier toute fuite susceptible de modifier le comportement de l'incendie et d'influencer le mouvement des fumées au sein du bâtiment. Leur influence peut être particulièrement marquée pour un incendie sous-ventilé Sinai (1999);
- Les transferts de masse, quantité de mouvement et chaleur au niveau des parois. Pour spécifier les transferts de chaleur aux parois, en général, soit la température des parois, soit le flux de chaleur aux parois est fixé. Il est aussi parfois possible de fixer une température extérieure au domaine et un coefficient de transfert de chaleur du matériau qui constitue la paroi pour permettre une représentation plus réaliste. Les propriétés thermiques des matériaux ne sont toutefois pas toujours connues. Il est à noter que si un modèle moyenné de turbulence est utilisé, des lois de paroi sont appliquées

pour prendre en compte les effets de la turbulence près des parois qui ne sont pas résolus par le modèle.

 Les évènements qui se déclenchent à l'intérieur du domaine, tels l'incendie luimême (qui peut être défini comme on l'a vu précédemment par une source volumique de chaleur ou par une source surfacique de chaleur si un modèle de combustion est utilisé) ou bien un moyen de le supprimer (sprinklers) ou encore la présence de radiateurs.

4.3.2.8 METHODES NUMERIQUES

Les schémas numériques qui permettent de discrétiser les équations physiques sur le maillage peuvent avoir une influence sur les résultats. Ainsi, un schéma numérique de premier ordre⁴ cause ce qu'on appelle de la diffusion numérique, c'est-à-dire qu'il produit un effet artificiel similaire au phénomène physique de diffusion. Le mélange se trouve surestimé ce qui conduit à des distributions de température et de concentrations en fumées et gaz plus uniformes. Cet effet est d'autant plus important que la taille des mailles est grande. Des schémas numériques d'ordre plus élevé permettent d'éviter ce problème. Toutefois, ces schémas sont plus instables numériquement et il peut donc être difficile d'obtenir une solution. En général, plus l'ordre du schéma numérique est élevé, plus les résultats seront précis mais aussi plus le schéma sera instable numériquement ce qui peut rendre l'obtention d'une solution difficile. Certains outils CFD laissent le choix du schéma numérique à l'utilisateur, en général jusqu'à l'ordre 2.

Une discrétisation temporelle est aussi nécessaire si le problème est transitoire, ce qui est généralement le cas pour un incendie si l'on s'intéresse à la propagation de l'incendie et/ou souhaite évaluer le temps disponible pour évacuer les occupants. Il s'agit de fixer un pas de temps qui soit compatible avec le maillage et avec les modèles physiques choisis et permette de résoudre les mécanismes physiques auquel on s'intéresse.

Le système algébrique obtenu après discrétisations spatiale et temporelle est énorme et les équations sont fortement couplées. Des méthodes itératives sont alors utilisées pour obtenir une solution. Un nombre d'itérations pour résoudre les équations à chaque pas de temps doit être fixé ou alternativement, un critère indiquant la convergence de la solution doit être défini. Les paramètres qui peuvent être suivis pendant le calcul d'une solution pour juger de la convergence de la solution sont variables d'un outil CFD à un autre et il peut donc être plus ou moins facile de s'assurer de la convergence.

⁴ Ordre d'un schéma numérique : dans un modèle numérique, les paramètres sont calculés en un nombre limité de point (ex : centre des mailles). Pour la résolution numérique des équations, il est nécessaire de connaître les paramètres sur des points géométriques non calculés (ex : à la surface des mailles). L'estimation des paramètres est alors évaluée par une fonction d'interpolation géométrique discrétisée dont le degré constitue l'ordre du schéma numérique.

Réf. : INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné

4.3.2.9 LE TRAITEMENT DES RESULTATS

Un nombre très important de valeurs est obtenu par un calcul CFD puisqu'en général le maillage d'une seule pièce de taille standard contient plusieurs dizaines de milliers d'éléments et pour chacun de ces éléments sont obtenues dans le cas d'un incendie au moins les valeurs de température, les trois composantes de vitesse et la concentration des fumées. D'autres variables peuvent aussi être calculées en fonction des besoins et des modèle choisis : concentrations en CO, NO ou autres produits toxiques, énergie cinétique turbulente et sa dissipation, etc...

Un post-processeur permet de traiter ces données. Il permet au moins de visualiser les contours des variables et les vecteurs vitesses dans des plans. Il peut aussi éventuellement, selon le post-processeur, permettre d'identifier les enveloppes correspondant à une valeur donnée d'une variable, calculer le volume d'un nuage toxique, évaluer la valeur moyenne de concentration en fumées et de température dans un espace donné ; calculer la visibilité d'un occupant évoluant dans l'espace, extraire les valeurs de température des parois pour transmettre à un code d'analyse de résistance des structures.

Chaque outil CFD a en principe son propre post-processeur, qui est plus ou moins sophistiqué. Il existe aussi des post-processeurs 'indépendants' qui peuvent traiter les fichiers de résultats de nombreux codes CFD. Signalons parmi ceux-ci Tecplot et Fieldview.

4.3.3 LES PRINCIPAUX OUTILS EXISTANTS

Il existe des codes CFD dits généraux qui incluent un choix de modèles suffisant pour permettre l'application de ce code à une grande variété de problèmes : aérodynamisme des voitures et avions ; combustion des engins ; dispersion atmosphérique des polluants, incendies en milieux confinés et ouverts.

Des outils CFD ont aussi été développés plus spécifiquement pour l'application aux incendies.

Les outils existants sont présentés ci-dessous selon ces deux grandes catégories.

Cependant, ceci ne présage en rien de la capacité d'un code à modéliser un incendie : en effet, si un code incendie contient nécessairement des modèles physiques adaptés aux incendies, ceux-ci ne sont pas nécessairement plus nombreux ni plus sophistiqués que ceux inclus dans les codes CFD généraux. Réciproquement, un code incendie peut être appliqué potentiellement à d'autres problèmes bien que son domaine d'application restera sûrement plus limité qu'un code CFD général.

Un code incendie aura été validé pour des scénarios incendie. Un code général pourra l'avoir été, voire même de façon plus complète qu'un code incendie. Il est conseillé en tous les cas de vérifier les validations réalisées pour l'outil sélectionné et utilisé.

Nom	Pays d'origine	Référence	Commentaires		
Codes généra	ux				
CFX	Royaume-	CFX)	Utilisable pour les incendies et explosions		
	Uni		Code commercial		
FLUENT	Etats-Unis	Fluent)	Code commercial		
PHOENICS	Royaume- Uni	PHOENICS)	Code commercial		
STAR-CD	Royaume- Uni	Star-CD)	Code commercial		
Codes spécifie	ques pour les	incendies			
FDS	Etats-Unis	McGrattan et Forney (2000)	Basé sur les modèles de turbulence LES et DNS. Disponible gratuitement : http://www.bfrl.nist.gov/info/software.html		
FIRE	Australie	Novozhilov et al. (1997)	Inclut les sprays et peut en principe prédire le taux de combustion, voire l'extinction, de l'incendie par un couplage des phases solide (fuel) et liquide (spray).		
JASMINE	Royaume- Uni	Cox et Kumar (1986)	Développé à partir de PHOENICS pour prédire les conséquences d'un incendie.		
KAMELEON FireEx	Norvège	Vembe et al. (2000; Vembe et al. (2000)	. Couplé avec un code d'éléments finis pour le cacu de la réponse des structures à la chaleur de l'incendie.		
KOBRA-3D	Allemagne	Schneider)	Pour prédire la propagation des fumées et le transfert de chaleur dans des géométries complexes.		
MEFE	Portugal	Viegas (1999)	Pour une ou deux pièces. Inclut le temps de réponse des thermocouples.		
RMFIRE	Canada	Hadjisophocle ous et Yakan (1991)	Limité à deux dimensions. Incendie dans une pièce.		
SMARTFIRE	Royaume- Uni	Smartfire)	Code commercial		
SOFIE	Royaume- Uni/Suède	Rubini (1997)			
SOLVENT	Etats-Unis	Solvent)	Pour des incendies en tunnel.		
SPLASH	Royaume- Uni	Gardiner (1998)	Inclut l'interaction entre sprinklers et les fumées d'incendie.		
UNDSAFE	Etats- Unis/Japon	Yang et Chang (1977)	Applicable en milieu confiné ou ouvert.		

Tableau 3 : Outils CFD existants (d'après Olenick et Carpenter (2003))

4.3.4 VERIFICATION ET VALIDATION

Ces outils CFD ont été validés par leurs développeurs ou bien par des utilisateurs. Il est conseillé de se renseigner sur l'étendue de la validation d'un outil pour

déterminer s'il est approprié pour l'application que l'on souhaite en faire. On peut trouver cette information auprès des développeurs et dans la littérature.

Certaines études permettent de comparer différents outils CFD pour une même application, comme par exemple Grandison et al. (2001) qui comparent les outils SMARTFIRE, CFX et PHOENICS pour quatre scénarios incendie.

Les résultats ne dépendent toutefois pas seulement de l'outil utilisé mais aussi des choix qui sont faits par l'utilisateur. La Figure 35 donne l'exemple de l'influence de la taille du maillage.



Figure 35 : Illustration de l'influence de la taille du maillage (reproduit de McGrattan et al. (2003) avec la permission de IAFSS)

Le choix de la position des frontières du domaine de calcul est aussi important ainsi que la prescription des conditions aux limites à ces frontières et le choix des différents modèles physiques et numériques. Ainsi, des guides ont été réalisés et parmi ceux-ci signalons :

- ceux pour l'application de la CFD en général : ERCOFTAC (2000), AIAA (1998))
- ceux pour son application aux incendies :Kumar et Cox (2001), Gobeau et al. (2002).

Ce dernier est basé sur une étude comparative des résultats provenant de différentes approches pour trois scénarios incendie réels (Gobeau et Zhou (2002)) et pour quatre scénarios à petite échelle pour lesquelles des mesures de température ont permis de quantifier la performance des différentes approches (Ledin et al. (2004)).

Le tableau ci-dessous donne une liste non exhaustive de cas tests pour lesquels les prédictions CFD ont été comparées à des mesures.

Il est à noter qu'il existe des données expérimentales qui n'ont pas encore été utilisées pour valider des modèles mais qui sont suffisamment bien documentées

pour permettre de définir les paramètres d'entrée des modèles et de comparer les prédictions avec les mesures.

Référence	Code CFD	Scénario		
Tunnels				
Wu et Bakar (2000)	Fluent	Expérience à petite échelle utilisant 5 géométries différentes pour la section du tunnel.		
Ledin et al. (2004)	CFX	Expérience à petite échelle réalisée par Oka et Atkinson (1995) avec différentes vitesses de ventilation et différentes puissances d'incendie.		
Hwang et Edwards (2005)	FDS	Expérience dans un petit tunnel réalisée par Hwang et Wargo (1986)		
		Expérience du 'Memorial tunnel' (Massachussetts Highway Department (1995)) – large tunnel.		
Grand espace vertical				
Chow (1999)	PHOENICS	Incendie de 17 kW dans une pièce donnant sur un atrium ventilé ; expérience réalisée par Poreh et al. (1998) à petite échelle (1/10).		
Yi et al. (2005)	FDS	Incendie dans un atrium à grande échelle avec trois configurations différentes de ventilation.		
		Mesures comparées aux prédictions : profiles de température, hauteur de la couche de fumées.		
Zhang et al. (2006)	Fluent	Incendie de 2,45 kW dans un escalier à petite échelle (1/10)		
		Mesures comparées aux prédictions : profiles de température.		
Une seule pièce – expé	erience de Steckle	er et al. (1982)		
McGrattan et al. (1998)	FDS	Incendie de 62,9 kW dans une pièce avec une porte ;		
Grandison et al. (2001)	PHOENICS, CFX, SMARTFIRE	experience realisee par Steckler et al. (1982). Mesures comparées aux prédictions : profiles verticaux de température et vitesse au niveau de la		
Yeoh et al. (2003)		porte.		
Sinai (2004)	CFX			
Ryder et al. (2004)	FDS			
Une seule pièce				
Grandison et al. (2001)	PHOENICS, CFX, SMARTFIRE	Incendie de 11 MW dans une pièce avec une grande porte ; expérience réalisée par Hostikka		
Zhang et al. (2002)	FDS	Incendies de 1,1 kW (au centre) et 5,4 kW (sur un côté) représentés par une plaque chaude dans une pièce avec une porte ; expérience réalisée à petite échelle (1/2).		
		Mesures comparées aux prédictions : profiles verticaux de température, vitesse, intensités des fluctuations de vitesse et de température, flux thermiques turbulents, tenseur des contraintes de		

		Reynolds.		
Deux pièces				
Yeoh et al. (2003)		Incendies de 55, 110 et 160 kW dans une pièce jointe à une seconde pièce par une porte; expérience réalisée par Nielsen (2000).		
		Mesures comparées aux prédictions : profiles verticaux de température dans la pièce où a lieu l'incendie et dans la pièce adjacente.		
Chow et Zou (2005)	FDS	Incendies de 86, 257, 342, 428, 514 and 600 kW dans une pièce jointe à une seconde pièce par une porte. La seconde pièce a une autre porte donnant sur l'extérieur. Quatre largeurs comprises entre 29 cm et 89 cm ont été utilisées pour la porte entre les deux pièces ; expérience réalisée par Tanaka et al. (1985) et Nakaya et al. (1986)		
		Mesures comparées aux prédictions : flux massiques et hauteurs du plan neutre au niveau de l'ouverture entre les deux portes.		
Multicompartiment				
Yeoh et al. (2003)		Série de pièces et couloirs sur deux étages reliés par un escalier. Incendie de 300 kW dans une pièce du rez-de-chaussée ; expérience réalisée par Luo et Beck (1994).		
		Mesures comparées aux prédictions : profiles verticaux de température dans la pièce où a lieu l'incendie, les pièces adjacentes et le couloir ; concentrations en CO et CO2		
Extinction des incendi	es par les sprinkle	ers, brouillards d'eau		
Novozhilov et al. (1997)		Sprinkler installé au niveau du toit, aspergeant une pile verticale de planches en pin en feu. Une ventilation de 0,5-0,7 m/s est présente. Plusieurs débits d'eau pour le sprinkler sont utilisés.		
		Mesures comparées aux prédictions : les temps nécessaires pour l'extinction de l'incendie.		
McGrattan et al. (1998)	FDS	Expériences à grande échelle avec des rideaux d'eau.		
Kim et Ryou (2003)	FDS	Incendies de plusieurs puissances au centre d'une pièce.		
		Mesures comparées aux prédictions : les temps nécessaires pour l'extinction de l'incendie, profiles de température.		
Sinai et al. (2004)	CFX			

Tableau 4 : Exemples de validation de modèles CFD pour l'application aux incendies en milieu confiné

4.4 LES MODELES MIXTES : ZONES-CFD

4.4.1 PRINCIPE

Une technique relativement récente consiste à combiner pour un même problème les deux méthodes précédentes : CFD et modèles à zones. Ceci permet de bénéficier des avantages respectifs des techniques (voir détails Section 5): en bref, un calcul précis avec la CFD et un calcul rapide avec le modèle à zone.

Ainsi, le modèle CFD est appliqué dans une région proche de l'incendie, là où il peut s'avérer difficile avec un modèle à zones de prédire l'interaction du panache thermique avec les éléments de la pièce : meubles, parois, plafond, etc... Le reste du domaine est modélisé par un modèle à zones qui permet un calcul rapide. Le choix des régions modélisé par l'une ou l'autre technique doit se faire en fonction du problème et de l'objectif de la simulation, en particulier en prenant en compte la précision nécessaire et souhaitée des prédictions.

La Figure 36 présente un exemple où la pièce dans laquelle l'incendie se produit est modélisée par CFD et la pièce voisine, dans laquelle on s'attend à ce que l'écoulement soit stratifié, par un modèle à deux zones.



Figure 36 : Modèle mixte zones-CFD (reproduit de Hua et al. (2005) avec la permission d'Elsevier)

4.4.2 VERIFICATION ET VALIDATION

Cette méthode est assez récente et a pour l'instant surtout été appliquée à la dispersion de contaminant dans les bâtiments en l'absence de sources de chaleur. Son application aux incendies reste plus limitée ainsi que sa validation.

4.4.3 EXEMPLES D'APPLICATION

L'INERIS a ainsi couplé le code commercial CFD PHOENICS avec son propre code à zones NewVendis dédié au calcul de ventilation et transport des fumées d'incendie en tunnels (Ruffin (2001)). Les résultats et le potentiel de cette technique étant prometteurs, un couplage de NewVendis avec le code CFD incendie FDS, distribué depuis gratuitement par le National Institute of Standards and Technology, est à l'étude.

Hua et al. (2005) ont appliqué la méthode CFD-zones, qu'ils appellent Hybrid Field And Zone Models (HFAZM), à deux scénarios incendie : la propagation de fumées au sein d'un étage et la propagation de fumées sur deux étages, chacun identique à l'étage étudié précédemment, et reliés par un escalier vertical. L'incendie se déclare dans une pièce et la fumée se propage le long des couloirs et escaliers, les autres pièces étant supposés hermétiquement fermées. Les résultats du modèle HFAZM sont ensuite comparés avec ceux obtenus par un modèle CFD, implémenté dans Fluent, et ceux obtenus avec un modèle à zones, CFAST. Par contre, les résultats n'ont pas été comparés à des mesures. Pour le premier scénario et la méthode HFAZM, la pièce où a lieu l'incendie est modélisée par CFD et le couloir par un modèle à huit zones (deux zones dans la direction verticale et quatre zones dans la direction horizontale). Il en va de même pour le deuxième scénario ; l'escalier vertical est modélisé par CFD et les couloirs de l'étage supérieur par un modèle à deux zones. Les prédictions de l'épaisseur de la couche chaude en fonction du temps sont comparées le long des couloirs. Les différences entre les modèles CFD et HFAZM se situent essentiellement aux endroits où est appliqué le modèle à zones dans le modèle HFAZM et principalement pendant la phase initiale transitoire. Ailleurs les résultats sont assez comparables. Les prédictions obtenues par le modèle à zones CFAST et le modèle HFAZM sont assez comparables une fois l'incendie développé mais pendant la période initiale transitoire, le modèle à zones prédit un développement plus rapide de la couche chaude. En terme de temps de calcul, pour le premier scénario, un calcul avec un modèle à zones prend 10 minutes, un calcul HFAZM 3.5 heures CPU et un calcul CFD 20 heures CPU⁵. Les temps de calcul nécessaires au modèle HFAZM dépendront bien sûr de la proportion volumique entre la région CFD et la région à zones. Il est toutefois moins coûteux qu'un calcul CFD et reste assez performant.

4.5 MODELES SPECIFIQUES POUR LA PRISE EN COMPTE DES RESEAUX DE VENTILATION

4.5.1 PRINCIPES

Les infrastructures disposant d'un système de ventilation mécanique utilisé dans le cadre de stratégies de désenfumage peuvent avoir un rôle important dans la dispersion des fumées qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la modélisation. Ces réseaux peuvent être parfois complexes à modéliser dans la mesure le nombre de paramètres qui intervient peut être important. Parmi ces paramètres, on peut en citer quelques uns tels que :

- le nombre, la forme et la longueur des conduites,
- les ventilateurs,
- la présence du trafic et les effets atmosphériques dans le cas des tunnels...

⁵ Heure CPU : temps de calcul du processeur

Réf. : INERIS-DRA-2006-46055-C70050 Incendies en milieu confiné

Il est donc nécessaire pour aboutir à une évaluation suffisamment précise sur le réseau de considérer le système dans sa globalité. L'usage de codes à zone ou de type CFD n'est donc pas envisageable pour obtenir des résultats en un temps et un coût raisonnable. L'approche unidimensionnelle est donc indispensable.

La modélisation du réseau de ventilation comporte deux parties :

- L'équilibrage du réseau de ventilation. Ce calcul consiste par équilibrage des pressions à déterminer l'ensemble des débits massiques circulant dans chaque branche du réseau.
- L'évaluation de la dispersion unidimensionnelle des fumées d'incendie sur le réseau. Cette partie de la modélisation porte sur la détermination des températures et des concentrations en toxiques liés à la dispersion des fumées chaudes dans le réseau.

4.5.2 METHODE

4.5.2.1 EQUILIBRAGE DU RESEAU

Un réseau de ventilation peut être décrit comme un ensemble de B branches et de N nœuds, une branche étant un élément de conduite reliant deux nœuds successifs du réseau (cf. Figure 37). Le réseau peut être alors décrit par un ensemble de mailles indépendantes correspondant à un contour fermé de branches. Le maillage est réalisé grâce à la construction d'un arbre orienté par la méthode de Kruskal ou de Sollin (Industrie Minérale, 1976).



Figure 37 : décomposition du réseau de ventilation pour le calcul d'équilibrage

L'équilibrage du réseau est basé sur la résolution :

- des équations de Bernoulli. Ces équations sont retranscrites sur les B-(N-1) mailles indépendantes sachant que sur le contour d'une maille la somme des pressions calculées doit être égale à zéro. Les équations de Bernoulli prises en compte incluent les termes aéro-moteurs et / ou aéro-dissipateurs,
- la conservation de la masse sur l'ensemble du réseau. Cette condition équivaut à écrire que sur chaque nœud du réseau, la somme des débits massiques des branches connectées au nœud est égale à zéro.

Cet ensemble d'équations peut être résolu par la méthode de Hardy-Cross qui est une méthode itérative basée sur l'application d'un terme correctif sur le débit contributif d'une maille lorsque la fermeture des pressions n'est pas atteinte sur la maille (Industrie Minérale, 1976).

4.5.2.2 EVALUATION DE LA DISPERSION DES FUMEES SUR LE RESEAU

Dans le cas d'un modèle unidimensionnel de calcul d'aérage, l'évaluation de la dispersion des fumées repose sur la résolution des équations de conservation de masse et d'énergie. Les équations de conservation de la quantité de mouvement ne sont pas résolues lorsqu'un calcul d'équilibrage du réseau a été réalisé au préalable. En effet, les vitesses de diffusion correspondent dans ce cas à celle déduites des débits calculés par le calcul d'équilibrage.

4.6 COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE MODELE

4.6.1 DOMAINES D'APPLICATION

Application	Modèle à zones	Modèles CFD	
Taux de propagation de l'incendie	 Utilisent des modèles empiriques : Jets de gaz et feux de nappe ventilés relativement bien modélisés ; 	Différents modèles existent : du modèle de source volumique aux modèles de combustion plus ou moins sophistiqués. Si pour les combustibles gazeux, les modèles disponibles sont assez performants, les modèles pour la combustion de solides et liquides reposent sur des	
	 Fuels solides : des courbes existent pour certains fuels mais peuvent être difficiles à extrapoler ; 		
	 Modèle de propagation de flamme pour des matériaux thermiquement minces existent mais sont assez limités ; 	relations empiriques qui peuvent être difficiles à extrapoler.	
Génération de produits toxiques	Repose sur des relations empiriques qui sont peu	Souvent limitée à des modèles de combustion simplifiés. Des concepts nouveaux tenant en compte les réactions chimiques de combustion sont prometteurs, en particulier pour la prédiction de CO pour des incendies ventilés.	
	En particulier les émissions de CO établies d'après des expériences à petite échelle et de corrélations simples ne sont pas très bien prédites.		
Visibilité à travers les fumées	Basé sur des corrélations empiriques : la relation entre la densité optique et la visibilité est assez fiable mais les données	La fiabilité de la prédiction de la visibilité par la CFD dépend de la bonne définition de la production de fumées.	
	empiriques disponibles sur les caractéristiques des fumées dépend du régime de combustion. Il est difficile de transcrire des	Quelques modèles ont été développés pour déduire la production de fumées des réactions chimiques se produisant	

	données obtenues à petite échelle à l'échelle réelle.	mais souvent, elle est prescrite d'après des relations empiriques.		
Elévation de température	A condition de pouvoir définir des zones où la température est relativement homogène, ces modèles peuvent calculer la température moyenne de chaque zone pour des configurations géométriques relativement simples et pas trop grandes. Une application typique est un bâtiment résidentiel ou de bureaux constitués de petites pièces régulières.	Donnent des prédictions convenables à condition de choisr correctement les modèles physiques et numériques. Les prédictions tendent à être meilleures loin de la source incendie, là où les gradients de température sont moins importants.		
Mouvement des fumées	Dans des espaces simples. Ne convient pas trop à l'interaction du panache avec des obstacles tels que des parois. La présence d'un effet de cheminée ou une faible stratification rend les hypothèses non vérifiées à moins qu'une adaptation du modèle ait été faite.	Donnent des prédictions convenables à condition de choisr correctement les modèles physiques et numériques et ce pour tout type de géométrie. Reste toutefois limité comme pour la visibilité à la bonne prédiction de la génération de fumées par l'incendie.		
Flux radiatifs	OK pour prendre en compte l'effet radiatif de la couche supérieure d'air chaud.	Des modèles de radiation (Discrete Transfer ou Monte Carlo) permettent de décrire assez bien les phénomènes radiatifs y compris pour des géométries complexes.		

Tableau 5 : Domaines d'application des modèles (d'après Grant et Lea (2001))

4.6.2 COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES

Scénario	Référence	Modèle à zones	Modèle CFD	Commentaires
Incendie d'un coussin dans une pièce meublée.	Spearpoint et al. (1999)	FAST	IFS (basé sur FDS)	Comparaison avec mesures de température.
Incendie dans un atrium – 3 géométries différentes pour un même volume de 2.000 m ³	Cui et Chow (2005)	FIRST	CC-EXACT	Pas de validation. Résultats semblables à condition de prendre certaines relations empiriques pour

						décrire le panache thermique.
Incendie dans un atrium – 3 configurations différentes de ventilation	Yi et (2005)	al.	•	Modèle développé par les auteurs CFAST	FDS	Comparaison avec mesures de température.

5. LA SECURITE INCENDIE EN MILIEU CONFINE

L'analyse de stratégies sécurité incendie fait appel à la notion de milieu confiné, bien ventilé ou peu ventilé, et pas uniquement à la notion de milieu souterrain. Certaines données sont ainsi afférentes aux domaines de la sécurité incendie des tunnels, des établissements recevant du public (ERP), des immeubles de grande hauteur (IGH), des parkings souterrains et aussi de moyens de transport tels que l'avion, le train ou le métropolitain. On peut penser que l'on a à chaque fois la nécessité de développer une analyse des dangers (combustibles, sources d'inflammation, développement d'un feu potentiel en fonction du confinement et de la ventilation, évaluation des effets thermiques et toxiques de l'incendie, ...), la nécessité de proposer des moyens de prévention d'une part et de protection d'autre part pour minimiser la probabilité d'occurrence d'un sinistre et maîtriser les conséquences potentielles. Enfin un dernier dénominateur commun aux activités citées plus haut, et c'est le principal objectif retenu ici, est la nécessité de tout mettre en œuvre pour éviter d'avoir des victimes lors de l'incendie lorsque celui se déclare.

L'incendie ne doit pas mettre en cause la vie du personnel et, dans la mesure du possible, il ne doit pas remettre en cause la pérennité de l'entreprise. Au delà du problème abordé, centré surtout sur le personnel, il est clair que dans tous les cas le "coût" de l'incendie doit être minimisé :

- en optimisant la prévention : rechercher les systèmes fiables et économiques assurant les fonctions de prévention préconisées,
- en baissant le coût d'un éventuel sinistre par une conception adaptée.

Une stratégie de sécurité incendie peut se concevoir selon la chaîne simplifiée décrite par la Figure 38 :



Figure 38 : conceptualisation de la stratégie de sécurité incendie

5.1 L'ANALYSE DES DANGERS

Elle est au cœur de la maîtrise du risque incendie en milieu confiné. En effet, chaque type d'installation est soumis à ses propres dangers par rapport à l'incendie. Il est donc nécessaire pour définir les actions de prévention et de protection à adopter d'évaluer correctement les paramètres important dans le dimensionnement des moyens et des équipements de sécurité.

L'analyse des dangers porte dans le cadre des incendies en milieu confiné sur :

- l'analyse des données constructives de l'installation et des contraintes d'environnement. En effet, pour un même danger, le risque associé peut être minimisé ou amplifié de part la conception de l'installation et du lieu où elle se situe. A titre d'exemple, dans les mines souterraines se pose le problème de la remontée à la surface et des moyens disponibles pour le faire,
- la quantification des matières combustibles du point de vue de la charge calorifique et des produits qui les composent. L'objet de cette quantification est de déterminer les puissances d'incendie et les quantités de toxique susceptibles d'être mises en jeu,
- l'analyse des activités et des contraintes d'exploitation qui peuvent être à l'origine de l'occurrence d'un incendie (identification des causes). Pour une exploitation souterraine, on identifie par exemple la fréquence et la localisation des engins. Pour les tunnels routiers, la densité de trafic est également un critère à prendre en compte dans cette analyse.
- l'identification des cibles qui peuvent être atteintes par l'incendie. Ce travail permet de quantifier à priori l'impact de l'incendie sur les personnes et / ou les structures,
- l'évaluation des conséquences qui, dans la plupart des cas, fait appel à des modélisations pour évaluer finement l'impact d'un incendie dimensionnant sur les cibles,
- l'analyse des barrières de sécurité prévues pour la maîtrise du risque identifié et quantifié. Les barrières doivent être en mesure de réduire le risque pour le rendre acceptable soit en terme de fréquence ou soit en terme de gravité,
- si le risque n'est pas acceptable sur la base des barrières de sécurité prévues, la proposition de nouveaux moyens de prévention et / ou de protection pouvant aller jusqu'à proposer des critères de dimensionnement.

Cette démarche générale peut être dans certains cas itérative en particulier pour des installations spécifiques pour lesquelles le risque n'est pas facilement quantifiable et où il est donc difficile de prévoir dès la conception les mesures de sécurité à adopter. Dans ce cas, elle s'inscrit dans une démarche dite d'ingénierie de la sécurité de l'incendie (ISI). Au contraire, pour des installations classiques, le raisonnement est davantage prescriptif. Dans ce cas, les mesures de sécurité à mettre en œuvre s'inscrivent le plus souvent dans un cadre réglementaire. S'il s'agit alors de vérifier que le risque incendie est maîtrisé. Dans tous les cas, l'analyse des incendies en milieu confiné doit permettre de justifier :

- les moyens de prévention,

- les moyens de détection qui permettent d'enclencher précocement les moyens de protection et les actions nécessaires à l'évacuation des personnes,
- les moyens de protection et de lutte pour minimiser les conséquences.

5.2 LA PREVENTION

La prévention des incendies en milieu confiné porte principalement sur :

- la limitation ou la séparation des charges combustibles. Par exemple, dans le cas des entrepôts, la séparation des charges est réalisée par décomposition de l'installation en cellules de stockage. Il est également recommandé de séparer les produits pouvant réagir chimiquement entre eux.
- la réduction ou la maîtrise des sources d'inflammation possibles. Cette mesure s'applique en particulier aux installations électrique : disjoncteur simple ou différentiel, systèmes d'extinction automatique dans les armoires électriques...Des mesures organisationnelles sont également prises telles que l'interdiction de fumer, l'habilitation du personnel amené à travailler par points chauds...

5.3 LA DETECTION

La détection peut faire appel à la surveillance humaine et conduire par exemple au déclenchement de l'alarme en manuel (commande manuelle, bris de glace, déclencheur coup de poing) mais on a de plus en plus recours aux installations automatiques qui complètent ou remplacent en partie la surveillance humaine et qui présentent le gros avantage de la "permanence". On notera que dans des sinistres récents comme l'aéroport de Düsseldorf (ANPI Magazine (1996)) et le Tunnel sous la Manche (La voix du nord (1996)), l'homme a vu le feu ou les fumées avant la détection automatique. Par ailleurs, dans des milieux de travail difficiles (chaleur, humidité, poussières, bruit, ...) la solution détection automatique peut être difficile à mettre en œuvre et la détection par l'homme reste particulièrement essentielle. Dans ce qui suit nous ne parlerons plus que de détection automatique sont à gérer de front et qu'il est primordial de prévoir pour chacune d'elles, entre autres, le bon relais de transmission pour les actions à engager pour l'extinction, le désenfumage, l'alarme et l'évacuation.

5.3.1 LES DETECTEURS

Concernant les installations automatiques, elles comprennent les détecteurs, appareils qui sont sensibles à un phénomène physique ou chimique et capables de déclencher une alarme-feu d'une part et des tableaux de signalisation qui reçoivent les signaux des détecteurs et les transforment en un avertissement lumineux et/ou sonore ou en un signal de fonction qui peut actionner un système d'extinction automatique ou un changement de régime de ventilation, ... Ainsi dans le domaine des établissements recevant du public (ERP), les immeubles de grande hauteur (IGH), des tunnels, des moyens de transports, des bâtiments

industriels, ... sont installés quatre principaux types d'appareils pour la détection automatique :

- des détecteurs de fumées (gaz, aérosols, particules) avec chambre d'ionisation,
- des détecteurs de fumées avec cellules photo-électriques,
- des détecteurs de chaleur,
- des détecteurs de rayons infrarouges ou ultraviolets.

Les capteurs peuvent être ponctuels ou linéaires.

Ces quatre types répondent à l'un des effets de l'incendie : chaleur, rayonnement et produits de combustion.

5.3.2 LES PRINCIPES DE FIABILITE D'UN SYSTEME DE DETECTION.

Bien que les dispositifs de détection incendie soient considérés comme des automatismes, ils n'ont pas pour autant atteint le haut degré de fiabilité généralement exigé de ces derniers. La pratique montre qu'il existe un lien généralement insuffisant entre le choix d'une technique de détection et son application, dans une installation, une fois montée (CNPP,1993-1996). Alors que la démarche du constructeur relève surtout de la technologie, celle de l'utilisateur doit être le fruit d'une étude fonctionnelle et pragmatique (étude des dangers). Ainsi on rappellera le respect nécessaire des principes suivants :

- a) un détecteur doit posséder la qualité essentielle de fiabilité : il doit remplir son rôle de façon durable, sans aléas, erreurs ou défaillances dans les conditions d'utilisation définies par son constructeur. Il doit posséder les caractéristiques de la sûreté : fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.
- b) la fiabilité d'un détecteur est inséparable du milieu dans lequel il opère. Ce principe est d'une importance capitale en matière de détection incendie. Son oubli ou son ignorance lors de l'étude d'un projet d'installation sont souvent cause de fausses alarmes. Il conditionne le choix des détecteurs, leur emplacement, leur nombre.
- c) la fiabilité d'un système de détection est conditionnée par le moins fiable de ses éléments (ou de ceux auxquels il est relié : câbles, etc ...).
- d) le défaut d'un élément du dispositif ne doit pas entraîner le défaut d'autres éléments (il est impératif par exemple que la défaillance d'un détecteur n'entraîne pas celle de l'ensemble de l'installation). On parle alors de sécurité positive lorsque la défaillance du détecteur se traduit par la mise en protection préventive de l'installation.

5.4 LA PROTECTION

5.4.1 LA PROTECTION PASSIVE

Les mesures de protection passive n'ont par pour vocation d'éteindre l'incendie, l'objectif principal étant de limiter sa propagation au sein même de l'installation. Parmi les moyens de protection passive, on peut signaler :

- Le compartimentage,
- Le cantonnement.

5.4.2 LA PROTECTION ACTIVE

Son rôle est soit d'éteindre l'incendie ou de limiter son développement. Les moyens disponibles sont :

- les extincteurs,
- les robinets d'incendie armés (RIA),
- les systèmes d'aspersion (sprinkler ou brouillard d'eau).

5.4.3 LA VENTILATION

Son rôle est de garantir des espaces sains pour l'évacuation et l'intervention des secours en contrôlant la dispersion des fumées. Deux types de systèmes sont rencontrés :

- Les systèmes d'extraction des fumées (ex. : ventilation transversale en tunnel),
- Les systèmes de soufflage permettant de canaliser les fumées vers un lieu exempt de personnel (ex. : ventilation longitudinale en tunnel).

5.5 ALERTE / EVACUATION ET ACTION DES SECOURS

Dès qu'un incendie a lieu en milieu confiné (milieux souterrains mais aussi habitations, IGH, ERP, ...), les personnes présentes ou exerçant une activité dans le lieu affecté par le sinistre sont concernées par l'évacuation. L'incendie étant un événement accidentel, inhabituel, ces personnes doivent être prises en charge pendant cette phase. Cette prise en charge sera bâtie selon l'activité et selon les personnes visées.

5.5.1 EVACUATION, ACTION PRIORITAIRE

Dans les milieux confinés l'évacuation est bien souvent prioritaire au regard de l'extinction :

- en milieu bâtimentaire par exemple type ERP : une partie du personnel aide à l'évacuation des personnes "de passage", l'extinction du sinistre en voie de développement étant dévolue à des secours extérieurs.
- en milieu industriel confiné (souterrain par exemple) : l'évacuation concerne une grande partie du personnel alors que l'extinction est dévolue à une partie spécialisée, ciblée, du personnel.

Cette présentation, schématique, met en évidence que la réflexion sur l'évacuation doit tenir compte de deux flux humains, l'un concernant les personnes à mettre à l'abri des effets de l'incendie et l'autre concernant les personnes chargées de combattre le sinistre et d'assurer éventuellement le sauvetage de personnes en difficulté.

5.5.2 LA REUSSITE DE L'EVACUATION

Elle repose sur :

- la qualité de l'alarme
- la qualité du chemin d'évacuation et l'organisation de l'évacuation
- la qualité du refuge.

Qualité de l'alarme

L'alarme doit être perçue par toutes les personnes en danger ou susceptibles de l'être rapidement : on se rappellera que dans certaines situations industrielles le signal lumineux, le signal sonore ... peuvent ne pas être perçus !

L'alarme perçue doit être correctement interprétée, décodée par tous : avertissements écrits, oraux, formations, exercices sont conseillés ou nécessaires selon les situations.

Quand l'alarme est perçue et décodée par une personne, celle-ci doit savoir ce qu'elle doit faire : souvent, en activité bâtimentaire, le personnel, formé, prend en charge les gens de passage ; il est indispensable en activité industrielle que chacun sache les opérations élémentaires qu'il a à exécuter, dans la mesure du possible, avant de quitter son poste de travail.

Qualité du chemin d'évacuation et organisation de l'évacuation

Le chemin d'évacuation doit permettre aux personnes de rejoindre un refuge sûr (un endroit sain où elles ne subiront plus les effets de l'incendie, ni en terme de température, ni en terme de fumées) dans les meilleures conditions. Tant en situation bâtimentaire qu'en situation industrielle ces lieux doivent être prévus et aménagés en conséquence et le chemin d'accès également. Parmi les outils privilégiés pour assurer la qualité du chemin d'évacuation au regard des dangers de l'incendie on citera le désenfumage et le balisage (éclairage de sécurité, panneaux réfléchissants, ...) :

- le désenfumage assuré par le système de ventilation a pour objet le contrôle des fumées :
- en assurant le balayage de l'espace, en protégeant par de l'air frais et en extrayant les fumées,
- en établissant une hiérarchie des pressions entre "local" sinistré et "locaux" adjacents de façon à réaliser un équilibre s'opposant à la propagation des fumées,
- Le balisage a pour objet d'indiquer la route à suivre : signaux lumineux, réfléchissant, sonores, ou cordage-guide. Rappelons qu'un sinistre important conduit souvent à des pannes électriques.

Ces dispositions doivent être mises en œuvre avec soin et avec des matériels appropriés (installations de désenfumage résistantes au feu, alimentations électriques de ces dispositifs de sécurité protégées, ...).

Un plan préalable d'évacuation doit être établi et expliqué au personnel. On soulignera ici que des exercices d'évacuation périodiques sont indispensables pour acquérir un certain nombre de réflexes, pour se familiariser aussi avec les chemins d'évacuation qui peuvent être tout à fait différents des itinéraires quotidiens et pour assurer une évacuation mieux gérée. Un éparpillement du personnel à la suite d'une alarme ne peut conduire qu'à une situation confuse et dangereuse pour un certain nombre de personnes et ce dans des conditions qui seront particulièrement délicates pour l'organisation du sauvetage qui ne manquera pas d'être mis en œuvre pour rechercher les manquants. Il est important dans une évacuation que l'on puisse "se compter".

Le comportement humain prend une grande importance en situation accidentelle. Les différents signaux et leur perception, qui évoluent tout au long du sinistre, influencent beaucoup les comportements. L'individu pris dans un incendie change rapidement de stratégie en fonction de ce qu'il voit, sent ou entend et de son schéma individuel d'interprétation. Aussi faut-il "l'éduquer".

Zones protégées (refuges sûrs)

Les zones protégées peuvent être de plusieurs types. Ainsi au regard des installations souterraines on peut lister :

- le retour à l'air libre
- un local (ou une galerie) ventilé, isolé de la zone sinistrée (par exemple tunnels bitubes)
- un local pressurisé à l'air frais et isolé thermiquement (type niches pressurisables) qui peut exister par endroits sur le site et servir de refuge provisoire en attendant l'arrivée de secours ou le retour à la normale de l'installation. De tels dispositifs, mis au point dans les Houillères sont de plus en plus souvent installés en tunnels routiers.

On rappellera que l'évacuation est a priori une opération pénible et qu'il y a lieu, chaque fois que possible, de minimiser le trajet qui conduit à la zone protégée.

Equipement de protection individuelle

Certains équipements, tels les mini-Apeva, (APEVA : Appareil d'Evacuation Autonome. Il s'agit d'un appareil respiratoire qui produit de l'oxygène et permet donc de s'isoler totalement de l'atmosphère polluée), remplissent une fonction complémentaire au regard des fumées d'incendie dans l'optimisation de l'évacuation. Dans d'autres cas on pourra utiliser aussi les masques avec cartouches filtrantes. On soulignera que de tels équipements peuvent pallier certaines insuffisances du désenfumage par exemple.

5.5.3 LES SECOURS

Le plus souvent, dans les activités industrielles confinées, les moyens de secours (moyens d'intervention et de lutte contre le feu et moyens de sauvetage des personnes) font également partie des dispositifs de sécurité incendie stratégiques. Tout le personnel doit être formé sur les dangers propres à chaque installation, sur les moyens de détection, d'évacuation, voire de première lutte.

Afin de pouvoir faire face aux risques d'incendie susceptibles de se produire, il est nécessaire de mettre en place des équipes spécifiques au site. En effet, les moyens de secours "classiques" (Sécurité Civile, Sapeurs-Pompiers) ne sont pas adaptés à ce type d'intervention où la connaissance du milieu est capitale.

Ces équipes, constituées de membres du personnel, devront :

- disposer du matériel d'extinction, d'intervention (appareils respiratoires, tenues adéquates, ...),
- connaître les principaux réseaux (ventilation, électricité, ...) et la localisation des organes de commande de ceux-ci,
- disposer des appareils de communication adaptés aux opérations en milieu souterrain et dédiés uniquement à cette fonction,
- recevoir les formations correspondantes, en particulier pour ce qui concerne la connaissance des phénomènes d'inflammation, d'explosion, de la toxicité des produits et des fumées,
- suivre des séances d'entraînement périodiques.

En plus de l'intervention, de la lutte contre l'incendie, il est dévolu aux équipes d'intervention un rôle de sauvetage. Là encore ces équipes doivent être largement pourvues de personnel et de matériel de secours tels ceux propres aux catastrophes minières. Plus particulièrement le personnel est recruté parmi les agents chevronnés, connaissant parfaitement non seulement les dangers de l'environnement souterrain, mais aussi la topographie et les moyens d'accès de la de l'infrastructure. Ils doivent être munis de tous les équipements indispensables pour pénétrer dans les zones sinistrées avec un maximum de sécurité et d'efficacité.

6. BIBLIOGRAPHIE

AIAA (1998). <u>Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid</u> <u>Dynamics Simulations</u>, Ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA G-077-1998.

Alpert, R. L. (2002). Ceiling jet flows. <u>SFPE Handbook of Fire Protection</u> <u>Engineering</u>, National Fire Protection Association.

ANPI Magazine, n° 131, juin 1996, "Incendie à l'aéroport de Düsseldorf"

Astapenko, V. M., Koshmarov, Y. A., Molchadskii, I. S. et Shevlyakov, A. N. (1988). <u>Thermogasdynamics of fires in rooms [in Russian]</u>. Moscow, Russia, Stroiizdat.

Babrauskas, V. (1979). COMPF2 - A Program for Calculating Post-Flashover Fire Temperatures. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), USA, NBS Tech Note 991.

Babrauskas, V. (1980). "Estimating room flashover potential." <u>Fire Technology</u> **16**(2): 94-104.

Babrauskas, V. (2002). Heat release rates. <u>SFPE Handbook Fire Protection of</u> <u>Engineering</u>. USA, National Fire Protection Association.

Bodart, X. et Curtat, M. (1987). <u>CIFI computer code: air and smoke movement</u> <u>during a fire in a building with ventilation ducts networks equipment</u>. CIB W14 Workshop on Fire Modelling, Berlin, Germany.

Borghi, R. et Destriau, M. (1998). <u>Combustion and flames, chemical and physical</u> <u>principles</u>, TECHNIP.

Cadorin, J.-F. (2003). "Compartment fire models for structural engineering". Liège University, Luxemburg, PhD.

Ansys CFX, http://www.ansys.com

Chan, M. K., Ballinger, M. Y., Owczarski, P. C. et Sutter, S. L. (1982). User's Manual for FIRIN 1: A Computer Code to Characterize Accidental Fire and Radioactive Source Terms in Nuclear Fuel Cycle Facilities. Battelle Pacific Northwest National Laboratory, USA, Report NUREG/CR-3037 (PNL-4532).

Charters, D. V., Gray, W. A. et McIntosh, A. C. (1994). "A computer model to assess fire hazards in tunnels (FASIT)." <u>Fire Technology</u> **30**(134-154).

Chow, W. K. (1996). "Simulation of tunnel fires using a zone model." <u>Tunnelling</u> and <u>Underground Space Technology</u> **11**(2): 221-236.

Chow, W. K. (1999). "Numerical simulations on balcony spill plume." <u>Fire and</u> <u>Materials</u> **23**: 91-99.

Chow, W. K., Yi, L., Shi, C. L., Li, Y. Z. et Huo, R. (2006). "Mass flow rates across layer interface in a two-layer zone model in an atrium with mechanical exhaust system." <u>Building and Environment</u> **41**(9): 1198-1202.

Chow, W. K. et Yin, R. (2004). "A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics." <u>Building and Environment</u> **39**(6): 611-620.

Chow, W. K. et Zou, G. W. (2005). "Correlation equations on fire-induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulation." <u>Building and</u> <u>Environment</u> **40**(7): 897-906.

CNPP, Traité pratique de Sécurité-Incendies, 1993-1996.

Cooper, L. Y. et Forney, G. P. (1990). The Consolidated Compartment Fire Model (CCFM) computer code application CCFM vents - Part I: physical basis. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4342. http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire90/PDF/f90003.pdf

Cooper, L. Y. et Stroup, D. W. (1982). Calculating Available Safe Egress Time (ASET) - A computer program and user's guide. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), NBSIR 82-2578.

Cox, G. (1995). Combustion fundamentals of fire, Academic Press.

Cox, G. et Kumar, S. (1986). "Field modelling of fire in forced ventilated enclosures." <u>Combustion Science and Technology</u> **52**(7).

CTICM (1999). <u>Introductory report of a compartment fire simulation using a two-</u> <u>zone model</u>. France, Ed. Centre Technique Industriel de la Construction Métallique.

Cui, E. et Chow, W. K. (2005). "Simulation on indoor aerodynamics induced by an atrium fire." <u>Building and Environment</u> **40**(9): 1194-1206.

Curtat, M. R. (1987). <u>NAT (NATural fire conditions)</u>. CIB W14 Workshop on fire modelling, Berlin, Allemagne.

de Ris, J. (1979). <u>Fire radiation - a review</u>. 17th International Symposium on combustion,, Pittsburgh, USA, The Combustion Institute. 1003-1015.

Deibjerg, T., Husted, B. P., Bygbjerg, H. et Westerman, D. (2003). ARGOS user's guide: a step by step guide to fire simulation. Danish Institute of Fire Technology. <u>http://www.dift.dk/files/Billeder/produscts/software/Documentation/Argos_Users_Guide.pdf</u>

Dietenberger, M. A. (1989). Validated furniture firemodel with FAST (HEMFAST). National Institute of Standards and Technology, NISTGCR-89-564.

Dietenberger, M. A. (1991). Technical Reference and User's Guide for FAST/FFM Version 3. National Instituteof Standards and Technology, USA, NIST-GCR-91-589.

Drysdale, D. D. (1998). Steady burning of liquids. <u>An introduction to fire dynamics</u>. Wiley. England, Wiley.

ERCOFTAC (2000). <u>Best practices guideline for industrial Computational Fluid</u> <u>Dynamics</u>, Ed. ERCOFTAC. 1st Edition. Fluent, <u>www.fluent.com/</u>

FACE AU RISQUE BACKDRAFT ET FLASH-OVER n° 325, 1996.

Friedman, R. (1992). "An international survey of computer models for fire and smoke." Journal of Fire Protection Engineering **4**(3): 81-92.

Gardiner, A. J. (1998). "The mathematical modelling of the interaction between sprinkler sprays and the thermally buoyant layers of gases from fires". South Bank Polytechnic, United-Kingdom, PhD.

Gautier, B., Pages, O. et Thibert, E. (1999). <u>MAGIC: Global modelling of fire into</u> <u>compartments</u>. 8th Interflam Conference, Edinburgh, Scotland. **2**.

Glynn, D. R., Eckford, D. C. et Pope, C. W. (1996). "Smoke concentrations and air temperatures generated by a fire on a train in a tunnel." <u>Phoenics Journal</u> **9**(1).

Gobeau, N., Ledin, H. S. et Lea, C. J. (2002). Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics. Health and Safety Laboratory, United Kingdom, HSL/2002/29. http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2002/hsl02-29.pdf

Gobeau, N. et Zhou, X. X. (2002). Evaluation of CFD to predict smoke movement in complex enclosed spaces -Application to three real scenarios: an underground station, an offshore accommodation module and a building under construction. Health and Safety Executive, United Kingdom, Research Report 255.

Grandison, A. J., Galea, E. R. et Patel, M. K. (2001). Fire modelling standards / benchmark - Report on Phase 1 Simulations. University of Greenwich, UK, Report 01/IM/72.

Grant, G. et Lea, C. J. (2001). A review of the modelling of fire in buildings and structures. Health and Safety Laboratory, United-Kingdom, CM/01/01.

Hadjisophocleous, G. V. et Yakan, A. (1991). Computer modelling of compartment fires. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, Internal Report No 613.

Hagglund, B. (1983). A Room Fire Simulation Model. Department of Defense, Stockholm, Sweden, FAO Report 620501-D6.

Harada, K., Nii, D., Tanaka, T. et Yamada, S. (2000). <u>Revision of zone fire model</u> <u>BRI2 for new evaluation system</u>. 15th Joint Panel meeting of the US/Japan Government Cooperative Program on Natural Resources (UJNR). San Antonio, National Institute of Standards and Technology. **2**: 381-388.

Haynes, B. S. et Wagner, H. G. (1981). "Soot formation." <u>Progress in Energy and</u> <u>Combustion Science</u> **7**: 229-273.

Haynes, E. K. (1994). "Development of WPI/FIRE 3.0: A Multiroom Model". Worcester Polytechnic Institute, USA, Master thesis.

Heins, T. (1991). "Simulation model for the safety assessment of spreading smoke from fires in extended enclosures". Technical University Braunschweig, Dissertation.

Hekestad, G. (2002). Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment. <u>SFPE</u> <u>Handbook of Fire Protection Engineering</u>, National Fire Protection Association: 2.1-2.17.

Ho, V., Siu, N. et Apostolakis, G. (1988). "COMPBRN III - A fire hazard model for risk analysis." <u>Fire Safety Journal</u> **13**(2-3).

Hua, J., Wang, J. et Kumar, K. (2005). "Development of a hybrid field and zone model for fire smoke propagation simulation in buildings." <u>Fire Safety Journal</u> **40**(2): 99-119.

Hwang, C. C. et Edwards, J. C. (2005). "The critical ventilation velocity in tunnel fires--a computer simulation." <u>Fire Safety Journal</u> **40**(3): 213-244.

Hwang, C. C. et Wargo, J. D. (1986). "Experimental study of thermally generated reverse stratified layers in a fire tunnel." <u>Combustion and Flame</u> **66**: 171-180.

Industrie minérale - Mine 2-76, "Aérage", 1962

Jagger, S. F. (1991). A Note on Combustion Product Generation. Health and Safety Laboratory, UK, HSL report IR/L/FR/91/09.

Janssens, M. L. (2000). <u>An introduction to mathematical fire modelling</u>, Technomic Publishing Company Inc.

Karlsson, B. et Quintiere, J. G. (2000). Energy release rates. <u>Enclosure fire</u> <u>dynamics</u>. C. Press, CRC Press.

Karlsson, B. et Quintiere, J. G. (2000). Fire plumes and flame heights. <u>Enclosure fire dynamics</u>. C. Press, CRC Press.

Karlsson, B. et Quintiere, J. G. (2000). Pressure profiles and vent flows for wellventilated enclosures. <u>Enclosure fire dynamics</u>, CRC Press.

Kim, S. C. et Ryou, H. S. (2003). "An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure." <u>Building and Environment</u> **38**(11): 1309-1316.

Kumar, S. et Cox, G. (2001). <u>Some guidance on "correct" use of CFD models for</u> <u>fire applications with examples</u>. 9th International Interflam Conference. **2**: 823-834.

Kurioka, H., Oka, Y., Satoh, H. et Sugawa, O. (2003). "Fire properrties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels." <u>Fire Safety Journal</u> **38**: 319-340.

La Voix du Nord, 15 et 16 décembre 1996, "Tunnel : ce qui s'est passé le 18 novembre"

Ledin, H. S., Allen, J. A., Ivings, M. J. et Bettis, R. J. (2004). Evaluation of CFD modelling of smoke movement in complex enclosed spaces - productuion of small-scale experimental data and assessment of CFD. Health and Safety Laboratory, UK, Report CM/04/07.

Lee, A. S. et Mellins, R. B. (2006). "Lung injury from smoke inhalation." <u>Paediatric</u> <u>Respiratory Reviews</u> **7**(2): 123-128.

Leschziner, M. A. (1992). <u>Turbulence Modelling Challenges Posed by Complex</u> <u>Flows</u>. Roomvent - 2nd International Conference on Air Distribution in Rooms, Aalborg, Denmark. **1**: 31-58.

Luo, M. et Beck, V. (1994). "Fire environment in a multi-room building." <u>Fire Safety</u> Journal **23**: 413-438.

MacArthur, C. D. (1982). Dayton Aircraft Fire Cabin Model, Version 3. U.S. Dept. of Transportation, Atlantic City, USA, DOT/FAA. CT-81/69-I.

Magnusson, S. E. et Thelandersson, S. (1970). Temperature-Time Curves of Complete Process of Fire Development, Theoretical Study of Wood Fuel Fires in Enclosed Spaces. Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, APS CI 65.

Markatos, N. C., Malin, M. R. et Cox, G. (1982). "Mathematical modelling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures." <u>International Journal of Heat and Mass Transfer</u> **25**(1): 63-75.

Massachussetts Highway Department (1995). Memorial tunnel fire ventilation test program. Boston, MA, USA.

Matsushita, T., Fukai, H. et Terai, T. (1985). <u>Calculation of Smoke Movement in</u> <u>Building in Case of Fire</u>. 1st International Symposium on Fire Safety Science.

McCaffrey, B. J. (1979). Purely buoyant diffusion flames: some experimental results. National Bureau of Standards, NBSIR 79-1910.

McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G. et Harkleroad, M. F. (1981). "Estimating room fire temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations." <u>Fire</u> <u>Technology</u> **17**(2): 98-119.

McGrattan, K., Floyd, J., Forney, G. et Baum, H. R. (2003). <u>Improved Radiation</u> <u>and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model</u>. Fire Safety Science - 7th International Symposium. 827-838.

McGrattan, K. B., Baum, H. R. et Rehm, R. G. (1998). "Large eddy simulations of smoke movement." <u>Fire Safety Journal</u> **30**(2): 161-178.

McGrattan, K. B. et Forney, G. P. (2000). Fire Dynamics Simulator - User's Manual. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6469.

McGrattan, K. B., Hamins, A. et Stroup, D. W. (1998). Sprinkler, smoke & heat vent, draft curtain interaction - large scale experiments and model development. National Institute of Standards and Technology, USA, NISTIR 6196-1.

Meland, O. et Skaret, E. (1987). User's manual for RVENT. SINTEF, Trondheim, Norway, STF25 A91034.

Milke, J. A. et Mowrer, F. W. (1993). A Design Algorithm for Smoke Management Systems in Atria and Covered Malls. University of Maryland, USA, Report FP 93-04.

Mitler, H. E. et Rockett, J. A. (1987). User's guide to FIRST, a comprehensive single room fire model. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology, NBSIR 87-3595.

Modak, A. T. (1979). "Radiation from Products of Combustion." <u>Fire Research</u> 1: 339-361.

Mowrer, F. W. et Stroup, D. W. (1998). Features, limitations and uncertainties in enclosure fire hazard analysis - preliminary review. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6152.

Nakamura, K. et Tanaka, T. (1988). <u>Predicting capability of a multiroom fire model</u>. Second International Symposium on Fire Safety Science.

Nakaya, I., Tanaka, T. et Yoshida, M. (1986). "Doorway flow induced by a propane fire." <u>Fire Safety Journal</u> **10**: 185-195.

NDRI (1986). <u>A user's guide to DSLAYV: simulating fires in natural and forced</u> ventilated enclosures. Sweden, Ed. National Defense Research Institute.

Nicholas, B. D. et Gregory, W. S. (1986). FIRAC user's manual: a computer code to simulate fire accidents in nuclear facilities. Los Alamos National Laboratory, NUREG/CR-4561 (LA-10678-M).

Nielsen, C. (2000). An analysis of pre-flashover fire experiments with field modelling comparison. University of Canterbury, New-Zealand, Fire Engineering Research Report 2000/10.

http://www.civil.canterbury.ac.nz/fire/pdfreports/CNielsen.pdf

Novozhilov, V., Harvie, D. J. E., Green, A. R. et Kent, J. H. (1997). "A Computational Fluid Dynamics model of fire burning rate and extinction by water sprinkler." <u>Combustion Science and Technology</u> **123**(1-6): 227-245.

Novozhilov, V., Harvie, D. J. E., Kent, J. H., Apte, V. B. et Pearson, D. (1997). "A computational fluid dynamics study of wood fire extinguishment by water sprinkler." <u>Fire Safety Journal</u> **29**(4): 259-282.

Offenhauser, F., Barth, U. et Schnatz, G. (1991). "CFIRE-X: Simulation of Extinguishing Methods Concerning Room Fires." VFDB **1**.

Oka, Y. et Atkinson, G. T. (1995). "Control of smoke flow in tunnel fires." <u>Fire</u> <u>Safety Journal</u> **25**(4): 305-322.

Olenick, S. M. et Carpenter, D. J. (2003). "An updated international survey of computer models for fire and smoke." <u>Journal of Fire Protection Engineering</u> **13**: 87-110.

Ouellette, M. J. (1993). "Visibility of exit signs." <u>Progressive Architecture</u> **74**(7): 39-42.

Pape, R., Waterman, T. et Eichler, T. V. (1981). Development of a Fire in a Room from Ignition to Full Room Involvement - RFIRES. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), USA, NBS-GCR 81-301.

Peacock, R. D., Reneke, P. A., Jones, W. W., Bukowski, R. W. et Forney, G. P. (2000). A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport. National Institute of Standards and Technology, USA, NIST Special Publication 921.

PHOENICS, http://www.cham.co.uk

Pope, S. B. (2004). "Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows." <u>New Journal of Physics</u> **6**(35): 1-24.

Poreh, M., Morgan, H. P., Marshall, N. R. et Harrison, R. (1998). "Entrainment by Two-Dimensional Spill Plumes." <u>Fire Safety Journal</u> **30**(1): 1-19.

Portier, R. W., Peacock, R. D. et Reneke, P. A. (1999). FASTLite: Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 899.

Quintiere, J. G. et McCaffrey, B. (1980). The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), USA, NBSIR 80-2054.

Rockett, J. A. (1990). Using the HAVARD/National Institute of Standards and Technology Mark VI Fire simulation. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4464.

Rodi, W. (1979). <u>Influence of buoyancy and rotation on equations for the turbulent</u> <u>length scale</u>. 2nd Symposium Turbulent Shear Flows, London, united Kingdom.

Rubini, P. A. (1997). <u>SOFIE - Simulation of Fires in Enclosures</u>. 5th International Symposium on Fire Safety Science.

Ruffin, E. (2001). Mise au point d'un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains. INERIS, France.

Ryder, N. L., Sutula, J. A., Schemel, C. F., Hamer, A. J. et Brunt, V. V. (2004). "Consequence modeling using the fire dynamics simulator." <u>Journal of Hazardous</u> <u>Materials</u> **115**(1-3): 149-154.

Rylands, S. et McIntosh, A. C. (2000). <u>FAS3D: fire hazard prediction in buildings</u> <u>using multi-zone modelling</u>. Third International Symposium on Fire and Explosion Hazards, Windermere, UK.

Satterfield, D. B. et Barnett, J. R. (1990). User's guide to WPI-HARVARD Version 2 (WPI-2) - a compartment fire model. Worcester Polytechnic Institute Center for Fire Safety Studies, Worcester, USA.

Sauer, J. M. et Smith, E. E. (1983). "Mathematical model of a ventilation-controlled compartment fire." Journal of Fire Sciences 1: 235-254.

Schneider, U., Lebeda, C. et Max, U. (1997). <u>An Evaluation and Applicability Study</u> for Use of Different Fire Codes in NPP Fire Design. 6th Post-SMiRT Conference, Lyon, France.

Schneider, V. WinKobra 4.6 - User's guide. Intefrierte Sicherheits Technik GmbH, Germany.

SFPE (2002). <u>The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering</u>, Ed. National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers. Third Edition.

Sheppard, D. T. (2004). Fire dynamics. <u>Analysis and interpretation of fire scene</u> evidence. J. R. Almiral and K. G. Furton, CRC Press.

Shestopal, V. O. (1993). "Computer program for an uninhibited smoke plume and associated software." <u>Fire Technology</u> **29**(3): 246-267.

Sinai, Y. L. (1999). "Comments on the role of leakages in field modelling of underventilated compartment fires." <u>Fire Safety Journal</u> **33**(1): 11-20.

Sinai, Y. L. (2004). <u>Field modelling of a Steckler experiment: an example of the</u> <u>relationship between level of modelling and accuracy</u>. 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, University of Ulster, Northern Ireland. 665-674.

Sinai, Y. L., Staples, C., Stopford, P. et Hooper, A. (2004). <u>Progress on CFD</u> <u>modeling of fire suppression by water mist</u>. 10th International Conference Interflam, Edinbugh, UK, Interscience communications, London, UK. **1**: 703-708. SMARTFIRE, <u>http://fseg.gre.ac.uk/smartfire/</u>

Solvent, <u>http://www.tunnelfire.com</u>

Spalding, D. B. (1971). "Concentration fluctuations in a round turbulent free jet." <u>Chemical Engineering Science</u> **26**: 95-107.

Spearpoint, M., Mowrer, F. W. et McGrattan, K. (1999). <u>Simulation of a</u> <u>compartment flashover fire using hand calculations, zone models and a field</u> <u>model</u>. Third International Conference on Fire Research and Engineering, Chicago, USA, Society of Fire Protection Engineers. 3-14.

Star-CD, http://www.cd-adapco.com/

Steckler, K. D., Quintiere, J. G. et Rinkinen, W. J. (1982). Flow induced by a fire in a compartment. National Institute of Standards and Technology, Washington D.C., USA, NBSIR 82-2520. <u>http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire82/PDF/f82001.pdf</u>

Takeda, H. et Yung, D. (1992). "Simplified fire growth models for risk-cost assessment in apartment buildings." <u>Journal of Fire Protection Engineering</u> **4**(2).

Tanaka, T., Nakaya, I. et Yoshida, M. (1985). <u>Full scale experiments for</u> <u>determining the burning conditions to be applied to toxicity tests.</u> First international symposium on fire safety science. 129-138.

Thomas, P. H. (1981). "Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms." <u>Fire and Materials</u> **5**(3): 103-111.

Thomas, P. H., Hinkley, P. L., Theobald, C. R. et Simms, D. L. (1963). Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical

Paper No7, London, England, HMSO.

Tucker, P. et Mosquera, A. (2000). Introduction to Grid & Mesh Generation for CFD. NAFEMS, United Kingdom, Reference R0079.

Vembe, B. E., Rian, K. E., Holen, J. K., Lilleheie, N. I., Grimsmo, B. et Magnussen, B. F. (2000). Kameleon FireEx 2000 User Manual. ComputIT (Computational Industry Technologies AS), R0122.

Vembe, B. E., Rian, K. E., Holen, J. K., Lilleheie, N. I., Grimsmo, B. et Myhrvold, T. (2000). Kameleon FireEx 2000 Theory Manual. ComputIT (Computational Industry Technologies AS), R0123.

Viegas, J. C. G. (1999). "Fire Safety in Buildings, Mathematical Modelling of Fire and Experimental Validation [in Portuguese]". Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal, PhD.

Viollet, P. L., Benque, J. P. et Goussebaile, J. (1983). "Two-dimensional numerical modelling of nonisothermal flows for unsteady thermal-hydraulic analysis." <u>Nuclear science and engineering</u> **84**: 350-372.

Wade, C. A. (2004). BRANZFIRE Technical Reference Guide. BRANZ, New Zealand, Study Report 92 (revised 2004). http://www.branz.co.nz/branzltd/pdfs/techref.pdf

Wade, C. A. (2004). A user's guide to BRANZFIRE 2004. BRANZ, New Zealand. http://www.branz.co.nz/branzltd/pdfs/userguide.pdf

Walton, W. D. (1985). ASET-B: A room fire program for personal computers. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), NBSIR 85-3144-1.

Walton, W. D. et Thomas, P. H. (2002). Estimating temperatures in compartment fires. <u>SFPE handbook of Fire Protection Engineering</u>, National Fire Protection Association.

Wickstrom, U. et Goransson, U. (1990). <u>Flame Spread Predictions in</u> <u>Room/Corner Test Based on the Cone Calorimeter</u>. Interflam Conference.

Williams, F. E. (1985). Combustion theory, Addison-Wesley.

Wu, Y. et Bakar, M. Z. A. (2000). "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity." <u>Fire Safety</u> <u>Journal</u> **35**(4): 363-390.

Xiaojun, C., Lizhong, Y., Zhihua, D. et Weicheng, F. (2005). "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room." <u>Fire Safety Journal</u> **40**(3): 267-281.

Yang, K. T. et Chang, L. C. (1977). UNDSAFE-1: a computer code for buoyant flow in an enclosure. National Bureau of Standards (now National Institute of Standards and Technology), United-States.
Yeoh, G. H., Yuen, R. K. K., Chueng, S. C. P. et Kwok, W. K. (2003). "On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires." <u>Building and Environment</u> **38**(6): 771-785.

Yi, L., Chow, W. K., Li, Y. Z. et Huo, R. (2005). "A simple two-layer zone model on mechanical exhaust in an atrium." <u>Building and Environment</u> **40**(7): 869-880.

Zhang, J. Y., Ji, J., Huo, R., Yuan, H. Y. et Yang, R. (2006). "A comparison of simulation and experiment on stack effect in long vertical shaft." <u>Journal of Fire</u> <u>Sciences</u> **24**: 121-135.

Zhang, W., Hamer, A., Klassen, M., Carpenter, D. et Roby, R. (2002). "Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation." <u>Fire Safety Journal</u> **37**(8): 721-752.

Zukoski, E. et Kubota, T. (1980). "Two-Layer Modeling of Smoke Movement in Building Fires." <u>Fire and Materials</u> **4**.

Zukoski, E. E., Kubota, T. et Cetegen, B. M. (1980). "Entrainment in fire plumes." <u>Fire Safety Journal</u> **3**: 107-121.





Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc technologique Alata BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : http://www.ineris.fr