

EPM/RT-90/13

(CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DE FONCTIONNEMENT)
D'UN SYSTEME DE GESTION CENTRALISE,
APPLIQUE A LA SECURITE INCENDIE

Par

Joseph(ABALEA, | Doct. Ing.

Projet dirigé par

Jules O'SHEA

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
ET DE GENIE INFORMATIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL

AOUT(1990)

CAZP9
UP 5
R90-13

87

Conseil

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que se soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'auteur.

Dépôt légal, 3e trimestre 1990
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

Pour ce procurer une copie de ce document, s'adresser au:

Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal
Ecole Polytechnique de Montréal
Case Postale 6079, Succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7
(514) 340-4473

Compter 0,10\$ par page (arrondir au dollar le plus près) et ajouter 3,00\$ (Canada) pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Régler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'Ecole Polytechnique de Montréal. Nous n'honoreronons que les commandes accompagnées d'un paiement, sauf s'il y a eu entente préalable dans le cas d'enseignements, de sociétés ou d'organismes canadiens.

TABLE DES MATIERES

1	1
1 QUELQUES ELEMENTS DE DISCIPLINE DE BASE EN RELATION AVEC L'INCENDIE	
1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA COMBUSTION	5
1.2 COMBUSTION STOECHIOMÉTRIQUE ET POUVOIRS CALORIFIQUES.	6
1.3 LES DIVERS TYPES DE COMBUSTION	7
1.3.1 COMBUSTION HOMOGENE	7
1.3.2 COMBUSTION HETEROGENE	10
1.3.3 LES COMBUSTIBLES SOLIDES COURANTS DANS LES INCENDIES - LA THERMODEGRADATION	11
1.3.4 THERMODEGRADATION DES MATERIAUX ORGANIQUES	11
1.3.5 THERMODEGRADATION D'UN MATERIAU LIGNO-CELLULOIQUE	12
1.3.6 THERMODEGRADATION D'UN MATERIAU POLYMERIQUE DE SYNTHESE	14
2 TRANSFERTS THERMIQUES	17
2.1 TRANSFERTS PAR RAYONNEMENT	17
2.2 TRANSFERT PAR CONVECTION OU TRANSFERT CONVECTIF	28
2.3 TRANSFERT THERMIQUE PAR CONDUCTION EN PHASE SOLIDE	30
2.3.1 DIFFUSION DE CHALEUR DANS LES SOLIDES INERTES	30
2.3.1.1 NOTIONS - CONDUCTIVITE - CAPACITE CALORIFIQUE VOLUMIQUE (INERTIE)	30
2.3.1.2 EQUATION DE LA CHALEUR - LA DIFFUSIVITE THERMIQUE	33
2.3.1.3 UNE FORME DE L'EQUATION DE LA CHALEUR	34
2.3.1.4 LA DIFFUSIVITE : UNE GRANDEUR QUI VARIE PEU	34
2.3.1.5 CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX LIMITES	34
2.3.1.6 LES METHODES NUMERIQUES AUX DIFFÉRENCES FINIES	35
2.3.1.7 PROBLEME DE LA PLAQUE SEMI-INFINIE AVEC FLUX ABSORBE CONSTANT	36
2.3.2 DIFFUSION DE LA CHALEUR AVEC EVAPORATION OU PYROLYSE	39
CHAPITRE III	42
3 AERAULIQUE	42
3.1 CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS	42
3.2 LES MODELES, LES REPRESENTATIONS, LES LOIS	45
3.3 VARIATIONS DE LA MASSE VOLUMIQUE DES GAZ ET FUMEES	45
3.4 CARACTERE TURBULENT DES ECOULEMENTS	46
3.5 L'INCENDIE ET LES CHAMPS DE PRESSION DANS LES BATIMENTS	47
3.6 ZONE NEUTRE	48
3.7 LES LOIS SPECIFIQUES DES DIVERS TYPES D'ECOULEMENT	48
3.8 PERTES DE CHARGES DANS LES CONDUITS ET ORIFICES - COEFFICIENT DE CHARGE	49
3.9 CAS DES INFILTRATIONS DANS LES INTERSTICES	51
3.10 ORIFICES SITUÉS DANS DES GRADIENTS DE PRESSION RELATIVE	52
3.10.1 Ouverture verticale (porte) entre deux volumes à température uniformes.(fig7)	52
3.10.2 Ecoulement en panache	54
3.10.3 Les panaches thermiques	55

3.10.4 Caractéristiques communes	55
3.10.4.1 Approche désenfumage	57
3.10.4.2 Approche structures	57
3.10.5 Les combustions pariétales sur parois verticales	58
3.10.6 Ecoulements en nappes stratifiées	58
3.10.6.1 Stabilité d'une nappe stratifiée :	60
3.10.6.2 Propagation d'un front de nappe sous un plafond	60
CHAPITRE IV	62
4 MODELES DE SIMULATION INCENDIE	62
4.1 MODELES DE SIMULATION DANS LES ENCEINTES	63
4.1.1 MODELES PROBABILISTES	63
4.1.2 MODELES DETERMINISTES	63
4.1.2.1 Les modèles dits de Zone	64
4.1.2.2 Les modèles Champs	64
4.2 REVUE DES PRINCIPAUX MODÈLES DE ZONE	65
4.2.1 ASET	65
4.2.2 BFSM	65
4.2.3 FAST	66
4.2.4 HARVARD	66
4.3 MODELES A USAGE PARTICULIER	67
4.3.1 ASCOS	67
4.3.2 DETACT-QS	67
4.4 LOGICIELS REPERTORIES	68
CHAPITRE V	71
5 INTRODUCTION A L'INTERFACE CLHOE POUR DETACT	71
5.1 APERCU GENERAL DU PROGRAMME	71
5.2 EXEMPLE	73
5.3 VERSION ACTUELLE	74
CHAPITRE VI	75
6 MODELISATION DU MOUVEMENT DE LA FUMEE ET DES EFFETS DU SYSTEME DE VENTILATION DANS LES FEUX DE PUITS DE MINE	75
6.1 RESUME	75
6.2 INTRODUCTION	75
6.2.1 INCENDIE DANS LES MINES	75
6.2.2 VENTILATION DES MINES	76
6.2.3 MODELISATION DE L'INTERACTION D'UN FEU DE MINE ET DE LA VENTILATION D'UNE MINE	78
6.3 CALCUL DES TRANSITIONS D'ETAT DE CONCENTRATION	81
6.4 PROGRAMME DE TRANSITION D'ETAT COMPLET	82
6.5 ANNEXE	82
6.5.1 TABLE 1	82
6.5.2 TABLE 2	83
CHAPITRE VII	85
7 INTRODUCTION A LA METHODOLOGIE PROTOTYPE POUR L'ANALYSE DES DANGERS	85
7.1 PROCEDURE LOGIQUE	87
7.1.1 ETAPE-1 DEFINITION DU CONTEXTE	89
7.1.2 ETAPE-2 DEFINITION DES SCENARIOS CONCERNES	89
7.1.3 ETAPE 3 CALCUL DU DANGER	90
7.2 FAST	92

7.2.1 THEORIE	92
7.2.2 LE FEU	92
7.2.3 LA PLUME	93
7.2.4 LES COUCHES	93
7.2.5 TRANSFERT DE CHALEUR	94
7.2.6 CONCENTRATION D'ESPECES	95
7.2.7 LIMITATION	95
7.3 EXITT	96
7.4 ETAPE 4 EVALUATION DES CONSEQUENCES	98
CAPITRE VIII	99
8 UN SYSTEME EXPERT HIERARCHIQUE POUR LA SIMULATION INCENDIE	99
8.1 DONNEES DU PROBLEME	99
8.2 DEFINITION DU SCENARIO	99
8.3 CHOIX DU LOGICIEL DE SIMULATION	100
8.4 SIMULATION	100
8.4.1 STRUCTURATION DES CONNAISSANCES	100
8.4.2 OBJETS	100
8.5 ARBRE D'INFERENCE	101
8.5.1 VALEUR DES OBJETS	103
8.5.2 REGLES	104
8.6 RESULTATS	106
8.7 CONCLUSION	107

PRESENTATION GENERALE

Dans le contexte général de la sécurité incendie, nous sommes confrontés à une multitude de problèmes faisant intervenir des considérations interdisciplinaires telles que la physique, la chimie, la biologie, la toxicologie et le comportement humain. Les chapitres I à III présenterons ces différents aspects

Aussi après avoir rappelé certains principes de bases liés à la physique du feu, nous présenterons les principaux modèles de simulations existants au chapitre IV. Ceux-ci ont surtout été développés aux USA, soit par l'université HARVARD pour le code HARVARD V ET VI [Mitler 81] soit par le NIST (NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY Gaithersburg USA) pour les modèles FIRST [Mitler 87], MLTFUEL [Tewarson 81], FAST [Jones 85], EXITT [Levine 85], TENAB [Malek 87], DETACT [Evans 85], ou soit par le Bureau des Mines pour MFIRE [Greuer 85], NAVFIRE de la société NAVWARE de Québec au Canada, FISBA du CSTB en France, JASMINE en Angleterre, DSLAYV en Suède,...

Enfin compte tenu du peu de convivialité des entrées/sorties des logiciels existants, nous présenterons une interface graphique améliorant le dialogue homme machine dans un cas de simulation de détection d'incendie. Ceci fera l'objet du chapitre V.

Ces différents modèles conviennent à des simulations soient générales (modèles mono-pièces) soient particulières (feux de mines, contrôle de fumée, etc). Le chapitre VI présente le modèle MFIRE.

L'étude d'une méthodologie prototype pour l'analyse des dangers liés au feu, HAZARD I [Bukowski 89], démontre la nécessité de disposer d'un outil d'élaboration de scénarios et de choix de modèles de simulation et est présentée au chapitre VII.

Dans ce rapport au chapitre VIII nous présenterons un système expert hiérarchisé formé d'un ensemble de systèmes experts. L'utilisateur, à l'aide de ce système expert, peut élaborer, connaissant une situation précise, un scénario de simulation incendie et choisir un modèle de simulation approprié.

CHAPITRE I

PHYSICO CHIMIE DE L'INCENDIE

L'incendie met en jeu des phénomènes complexes dont la prévision, par des méthodes scientifiques, relève en majeur partie de l'aérothermochimie, discipline relativement récente.

1 QUELQUES ELEMENTS DE DISCIPLINE DE BASE EN RELATION AVEC L'INCENDIE

1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA COMBUSTION

La combustion est une oxydation vive.

Sauf pour certains matériaux très particuliers (les poudres), la combustion nécessite deux participants: un matériau combustible très généralement organique dans les incendies des bâtiments donc formé en grande partie de carbone et d'hydrogène et contenant fréquemment quelques autres éléments tels que l'azote (laine, polyuréthane...) de l'oxygène (cellulose, résines polyesters...), du chlore (PVC)...

Un comburant, l'oxygène, présent dans l'air à 20.8 % en volume et/ou 23.33 % en masse mais également présent en proportion plus faible dans les "fumées" et gaz chauds qui circulent dans un bâtiment sinistré.

La composition des gaz d'incendie résulte du mélange des produits de combustion, parfois imparfaite, et d'un excès d'air, et reste dominée par la proportion d'azote.

La vapeur d'eau et le gaz carbonique s'y trouvent en général en proportions très voisines. L'oxyde de carbone (CO), toxique majeur, y apparaît généralement quand le taux d'oxygène résiduel tombe en dessous de 5 % en volume. Sa fraction volumique peut atteindre jusqu'à 5% dans certain cas.

La composition typique du produit de combustion dans un local pourrait être:

$$N_2 \quad 65\% ; \quad O_2 \quad 1\% ; \quad CO_2 \quad 14\% , \quad H_2 \quad 16\%$$

Ainsi que divers gaz résiduels 4 % (hydrocarbures, formol, acide acétique...).

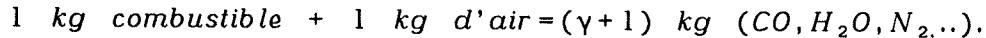
Les PVC, peuvent conduire de plus à la présence d'HCl en proportions notables, dans les scénarios de feux de câbles électriques (salles de câbles de grosses installations) ou quand les isolants à base de PVC sont mis en jeu.

Peuvent s'y ajouter également des taux de suies (carbone) notables de l'ordre de 0.1 à 0.5 % en masse (1 à 5 g par kg de gaz).

Ces suies jouent un rôle dominant dans le pouvoir émissif des gaz et constituent un danger supplémentaire pour l'inhalation accidentelle.

1.2 COMBUSTION STOECHIOMÉTRIQUE ET POUVOIRS CALORIFIQUES.

On peut symboliser cette réaction chimique par une équation globale traduisant en combustion complète :



le symbole " γ " désigne le rapport stoechiométrique et varie beaucoup avec la nature du combustible, ainsi que la quantité de chaleur libérée par la combustion.

Cette quantité de chaleur rapportée au kg de combustible est désignée par "pouvoir calorifique du matériau".

On distingue en fait deux pouvoirs calorifiques: l'un dit SUPERIEUR (PCS), quand l'eau libérée par la combustion est recondensée, et l'autre dit INFERIEUR (PCI) quand on la suppose restée à l'état de vapeur, ce qui est généralement le cas dans les incendies.

Les PCI (ou chaleur de combustion) sont assez variables. Voici quelques valeurs pour de bons combustibles,

Méthane	50 <i>kJ/grammes</i>
Cellulose	16 ¹
Bois	17 à 20

Le coefficient est également variable mais une propriété remarquable est que le rapport $3PCI/\gamma$ est peu variable à quelques exceptions près pour des produits peu courants dans les incendies.

En effet, dès 1917, THORNTON remarquait que le rapport de chaleur de combustion à la quantité d'oxygène consommée est sensiblement constant pour une grande variété de composé organique et voisin de $12,7 \text{ kJ/gO}_2$.

Récemment ce concept a été étendu par les chercheurs du NIST¹, aux matériaux polymériques pour lesquels la valeur moyenne du rapport est légèrement plus élevé que précédemment et voisine de $13,0 \text{ kJ/gO}_2$, alors que celle trouvée pour une série de combustibles d'origine naturelle est de $13,2 \text{ kJ/gO}_2$.

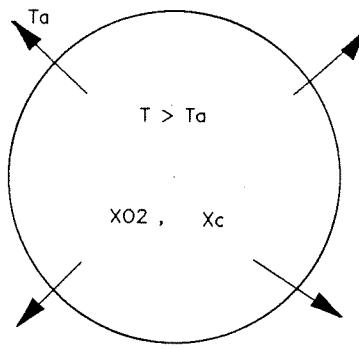
Ainsi la mesure du débit massique de consommation d'oxygène par la combustion doit permettre de calculer avec une précision convenable le débit calorifique lors d'un expérimentation.

1.3 LES DIVERS TYPES DE COMBUSTION

Si le combustible est en phase gazeuse, il donne lieu à des flammes, c'est la combustion homogène, s'il est en phase solide, c'est la combustion hétérogène. La phase liquide obtenue avec certains matériaux n'est que transitoire car la transformation liquide-gaz s'opère rapidement sous l'action d'un flux thermique.

1.3.1 COMBUSTION HOMOGENE

Dans le cas où le combustible est gazeux, la réaction de combustion est dite homogène, combustible et comburant étant sous le même état ce qui en facilite le mélange et peut conduire à des réactions élevées. Afin de préciser les choses, imaginons une petite poche de gaz à T_a degrés, au sein d'une atmosphère homogène à température T_a et contenant x_{o_2} % d'oxygène et x_c % d'un gaz combustible C. (Figure 1)



$$\text{Pertes thermiques} = K(T - T_a)$$

Figure 1

La vitesse d'oxydation (combustion) est de la forme :

$$v_o = x_{o_2}^p \cdot x_c^q \cdot f(T, x_{o_2}, x_c, \dots)$$

Elle augmente très vite avec la température pour tendre vers une limite à haute température. Elle s'annule si l'un des facteurs x_{o_2} ou x_c est nul. Le bilan thermique de la poche s'écrit :

$$mC_p \frac{dT}{dt} = P_{ci} \cdot V_o - K(T - T_a)$$

avec C_p chaleur massique, m masse de gaz.

Si $P_{ci} * V_o > K(T - T_a)$ la température augmente et la réaction de combustion s'accélère jusqu'à épuisement de O₂ ou C, l'autoaccélération très violente qui se produit, et la montée brutale de température qui en résulte peuvent entraîner la propagation au reste du gaz : la combustion se poursuit, étant caractérisé par une vitesse dite VITESSE DE DEFLAGRATION.

Si $P_{ci} * V_o < K (T - T\alpha)$, la température baisse et la réaction de combustion s'arrête.

Il y a donc, pour une atmosphère donnée à une température donnée, un échauffement local minimum critique à fournir pour faire basculer un système d'un état où la combustion ne peut se maintenir à un état où elle démarre, s'autoamplifie et se propage.

Cet échauffement local peut être dû, soit à une étincelle, soit à un arc électrique, soit au contact avec une surface chaude (allumage par point chaud), soit à l'injection de gaz chauds (allumage par flamme pilote). Cette source d'inflammation porte la poche(dans un temps variable suivant la géométrie, la température et le coefficient de transfert thermique de cette source) à une température minimum qui est la température T_i d'inflammation du mélange.

Teneurs limites d'inflammabilité

Cependant la vitesse d'oxydation dépendant des teneurs X_{O_2} et X_c , l'inégalité ne peut être satisfaite que si le rapport $\frac{X_c}{X_{O_2}}$ est compris entre les limites qui sont les limites inférieures

d'inflammabilité et les limites supérieures d'inflammabilité.

Limites d'inflammabilité d'un mélange

Pour un type de mélange donné, par exemple N_2, O_2 et gaz combustible C, à une température donnée, l'inflammation ne peut se produire que dans un certain domaine de composition ainsi que représenté ci après:

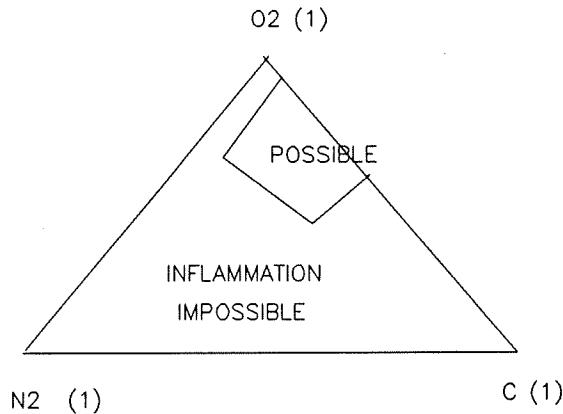


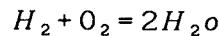
Figure 2

Il convient de noter dès maintenant que la température agit sur ces limites : si on l'augmente, la limite inférieure recule et la limite supérieure augmente, autrement dit, on élargit le domaine

d'inflammabilité. Ainsi, dans le cas de la limite inférieure de l'oxyde de carbone dans l'air Le Chatelier et Baudouard ont montré en 1898 que cette limite égale selon eux à 15.9 % à la température ordinaire, descend à 14.2 % vers 400°C et à 9.3 % vers 470°C.

Le risque augmente évidemment, et devient même maximum à partir du moment où le mélange atteint la température d'inflammation T_i . Véron indique que l'élargissement du domaine d'inflammabilité atteint 100%. Cela veut dire que l'inflammation spontanée peut se produire en toute proportion du mélange combustible.

Il y a bien entendu un optimum lorsque cette proportion est voisine des teneurs stoechiométriques. S'il n'y avait pas les gaz inertes comme l'azote, ou le CO_2 , le rapport serait, pour l'hydrogène, de 2/1 suivant la réaction :



En fait, les gaz inertes jouant un rôle diluant, la T_i minimum est obtenue pour des teneurs en combustible légèrement supérieures.

Voici d'ailleurs, à titre d'exemple, les limites d'inflammabilité de mélanges d'air à température ordinaire et de quelques espèces combustibles ainsi que les températures minimum d'inflammation.

espèce	concentration volumique %		Température T_i d'inflammation°C
	limite inférieure	limite supérieure	
Hydrogène	6	72	585
Propane	2,1	10,1	481
Acétone	3,0	11,0	561

Une fois obtenue en un point, l'inflammation se propage ensuite avec une vitesse dite de déflagration, variable selon les espèces, le rapport combustible/carburant avec un maximum pour la proportion stoechiométrique et la température du mélange. Le domaine de variation est large, de quelques dizaines de cm/sec à plusieurs centaines de m/sec dans le cas d'une réaction explosive. 1 à 5 m/sec sont des ordres de grandeur raisonnables dans les incendies courants.

Modification des limites d'inflammabilité par adjonction d'additifs

On peut modifier considérablement les limites d'inflammabilité en introduisant dans les flammes des inhibiteurs chimiques qui ralentissent la cinétique chimique.

L'effet est de maintenir la courbe de production des diagrammes précédents en dessous de la droite de pertes.

C'est le rôle de certains ignifugeants qui agissent par inhibition de flamme. Leur effet peut s'exercer dans une certaine plage de température T_a , mais inéluctablement, si T s'élève au delà T_a , ce mécanisme ne parviendra pas à empêcher l'inflammation. Il est important de savoir que même les combustibles ignifugés brûlent lors d'un violent incendie.

Combustion d'un solide finement divisé

La combustion d'un solide divisé en fines particules se rapproche, dans une certaine mesure, de la combustion en phase gazeuse. Il se produit en effet, à l'interface solide gaz qui est très grande, une réaction de combustion homogène.

Quant à la combustion hétérogène, elle développe de l'énergie rayonnante, sous forme d'ailleurs plus lumineuse que les gaz (incandescence). Les brûleurs à charbon pulvérisé sont basés sur ce principe. Dans les industries où des poussières combustibles sont produites au cours du processus de fabrication (industries alimentaires, industrie du bois, mines, etc..), l'inflammation des mélanges de poussières constitue un risque grave dont il importe de se prémunir.

Dans des transports pneumatiques notamment les mises à la terre sont prévues pour éviter des risques provenant de l'électricité statique. De la même façon que pour le gaz, il y a des risques d'explosion dits "coups de poussière" dont beaucoup de catastrophes minières sont la conséquence.

Par analogie, la combustion en phase liquide de matériaux finement divisés s'apparente aussi à la combustion en phase gazeuse. Elle constitue un risque que l'on rencontre dans les industries où l'on met en jeu des aérosols combustibles, par exemple dans les ateliers de peinture au pistolet, les industries de produits d'entretien, de vernis, etc.....Les gouttelettes liquides sont entourées d'une vapeur qui, mélangées à l'air, peuvent présenter de grands risques lorsqu'elles atteignent une concentration critique.

1.3.2 COMBUSTION HETEROGENE

Elle consiste en une oxydation directe de la couche de la surface du solide atteinte par l'oxygène. Sa vitesse est essentiellement contrôlée par la température et la diffusion de l'oxygène dans le combustible solide ; ainsi elle est beaucoup moins élevée que celle d'une combustion en phase gazeuse, sauf en régime de soufflage violent (ex. chaudière). Elle conduit essentiellement à la formation des oxydes de carbone. La chaleur de combustion produite au sein du résidu le porte à des températures telles qu'il en transfère une partie importante par rayonnement thermique, celui-ci s'accompagnant généralement de l'émission d'un rayonnement lumineux. Ce dernier phénomène est appelé incandescence.

1.3.3 LES COMBUSTIBLES SOLIDES COURANTS DANS LES INCENDIES - LA THERMODEGRADATION

Ce sont des matériaux polymériques complexes, le plus souvent organiques, qui ne manifestent pas leur aptitude à la combustion à température ordinaire. Ce n'est qu'en les portant au dessus d'une certaine température ordinaire, dite température d'allumage qu'ils peuvent brûler, ce, après avoir subi une transformation sous l'effet de la chaleur ou thermodégradation, ou encore pyrolyse.

Certaines résines phénoliques, sous forme de produits cellulaires, donnent lieu essentiellement à une combustion en phase solide : en effet, ce sont des produits de polycondensation à macromolécules réticulées dont la thermodégradation ne donne que peu de produits volatils.

A l'opposé, certains thermoplastiques, tel que le polystyrène, donnent par fusion une phase liquide qui engendre, par vaporisation du combustible gazeux, de sorte que la combustion se produit uniquement en phase gazeuse.

Entre ces deux extrêmes, un grand nombre de matériaux organiques, notamment, ceux qui sont à base de cellulose (bois et dérivés), donnent généralement lieu aux 2 types de combustion, en phase solide et gazeuse, l'ordre d'apparition des phénomènes ou leur simultanéité partielle étant fonction de la nature, donc des propriétés des matériaux et des conditions d'environnement.

1.3.4 THERMODEGRADATION DES MATERIAUX ORGANIQUES

Carbone et hydrogène sont les principaux éléments constitutifs des macromolécules des matériaux organiques ; l'azote entre également dans la composition de certains d'entre-eux (aminoplastes, polyuréthanes, polyamides, polyurées, poly-acrylonitrile).

Il résulte de cette composition de base hydrocarbonée que ces matériaux sont combustibles, c'est-à-dire susceptibles de brûler.

A noter également que de nombreux types de macromolécules, naturelles ou synthétiques, contiennent également de l'oxygène dans leur forme élémentaire :

Oxydes d'oléfines, alcool, acétate, acétals, ethers polyvinyliques, polyacryliques autres que le polyacrylonitrile, polyacétales, polycarbonates, cellulose et dérivés, résines phénoliques, aminoplaste polyuréthanes, polyamides, polyesters.

Cependant, les matériaux organiques, qui ne sont pas habituellement utilisés comme combustibles, doivent être mis sous forme convenable pour brûler. En effet, dans certaines macromolécules, carbone, hydrogène et éventuellement azote "cohabitent" sans problème avec l'oxygène ; ce n'est qu'en dégradant thermiquement ces grandes molécules constitutives que se manifeste leur combustibilité, c'est-à-dire leur aptitude à réagir avec l'oxygène libre : la rupture de liaisons covalentes conduit à des molécules plus petites parfois aux monomères. Certains produits de la dégradation sont gazeux à température ordinaire ou vaporisables, alors que d'autres peuvent

rester à l'état dense ; mais quelle que soit la phase considérée, on trouve toujours parmi les produits de dégradation des composés hydrocarbonés combustibles, qu'il s'agisse d'hydrocarbure aliphatique de bas poids moléculaires et de pouvoir calorifique élevé, d'hydrocarbures aromatiques ou polycycliques plus lourds ou de résidus solides riches en carbone, similaires à des cokes.

Soumis à un flux de chaleur, un matériau organique se comporte donc, en raison de son aptitude à la thermodégradation, comme un véritable générateur de combustibles.

On notera cependant que la sensibilité à la thermodégradation est beaucoup plus élevée pour un thermoplastique comparativement à un thermodurcissable qui résiste mieux grâce à la réticulation de ses macromolécules.

1.3.5 THERMODEGRADATION D'UN MATERIAU LIGNO-CELLULOIQUE

Placé dans une atmosphère dont la température augmente progressivement, un tel matériau commence par perdre de l'eau de sorte que sa température ne croît que lentement puis marque un palier de vaporisation, bien que l'on puisse distinguer des fractions liées différemment : eau incluse retenue par capillarité, eau absorbée, eau d'hydratation.

Cette teneur non négligeable en eau (8 à 18% en poids pour les bois d'œuvre) est une différence fondamentale par rapport aux matériaux organiques de synthèse.

Passé ce palier, la température du matériau augmente de nouveau et c'est alors que débute, vers 150°C, la dégradation irréversible du matériau qui s'accompagne dès 200°C de l'émission de vapeurs condensables et de gaz.

La fraction condensable comporte deux phases :

- L'une aqueuse appelée pyroligneuse et contenant notamment des acides carboxyliques (formique, acétique, propionique, butyrique,...) de l'alcool méthylique, du formaldéhyde, de l'acétone.
- L'autre est un goudron, constitué par des acides carboxyliques, des anhydrides, des acides résiniques, des résines neutres, des phénols.

Les vapeurs de pyroligneux se dégagent dès 200°C et leur émission cesse aux environs de 350°C.

Les vapeurs de goudron sont émises à plus haute température : elles apparaissent vers 300°C et leur émission cesse dans la plage 400 - 450°C, selon l'origine botanique.

Quant au débit de gaz, il passe par un maximum vers 350 - 400°C, mais à 1000°C par exemple, l'émission n'est pas complètement terminée. Ces gaz sont essentiellement l'anhydride carbonique CO_2 , le monoxyde de carbone CO, le méthane et en petites quantités d'autres hydrocarbures saturés et éthyléniques de bas poids moléculaires ainsi que des traces d'hydrogène (à 400°C), ce

dernier étant obtenu à débit maximal, par pyrolyse non oxydante, vers 700°C car le charbon de bois, bien que riche en carbone, contient encore de l'oxygène et de l'hydrogène, qu'il perd progressivement lorsque la température s'élève.

Voilà pour ce qui concerne les espèces chimiques résultant de la dégradation du bois donc des produits constitutifs (cellulose, lignine, hémicellulose).

Or, ceux-ci contiennent de l'oxygène et, même sous atmosphère inerte, l'analyse thermique différentielle permet de détecter au voisinage de 250°C un phénomène exothermique, c'est-à-dire une production interne de chaleur, laquelle contribue à l'échauffement du matériau.

Dans certaines conditions d'inertie thermique, de porosité et de masse, la chaleur libérée par cette réaction peut être suffisante pour que, à partir d'un amorçage local, elle puisse se propager de proche en proche au sein du matériau provoquant ainsi sa dégradation. Ce phénomène permet d'expliquer que certains feux de matériaux organiques d'origine végétale peuvent couver longuement, tels que les feux de balles de coton, avant de dégénérer en feu vif.

Du point de vue qualitatif, ce phénomène exothermique interne se traduit, à la surface d'un matériau ligno-cellulosique, par l'apparition d'auréoles concentriques qui entourent la partie la plus chaude laquelle grandit au fur et à mesure que l'onde thermique s'approche de la surface ; la première résulte de la condensation des goudrons, composés à point d'ébullition élevé ; la seconde auréole entourant la première est due à la condensation, à la température moins élevée, du pyroligneux, de sorte que la zone correspondante apparaît humide alors que la zone intermédiaire est enrichie en goudron.

Les phénomènes sont ailleurs identiques mais moins facilement discernables lorsqu'on soumet le matériau à un flux thermique externe.

Ce qui précède est relatif à la dégradation sous atmosphère inerte ; en présence de petites quantités d'oxygène, la modification majeure est l'apparition de réactions hétérogènes d'oxydation, à températures plus basses que celle à laquelle se manifeste l'effet exothermique interne. Selon l'origine botanique, l'épaisseur, la masse volumique, les deux effets exothermiques sont séparés ou confondus ; dans ce dernier cas tout se passe comme si le seuil de réaction exothermique interne était abaissé.

Certains auteurs attribuent ces phénomènes à l'oxydation directe des celluloses et hemicelluloses voire même de la lignine.

1.3.6 THERMODEGRADATION D'UN MATERIAU POLYMERIQUE DE SYNTHESE

Les familles de polymères étant nombreuses et les conditions de dégradation pouvant être variables, ces matériaux conduisent par pyrolyse à une multitude de composés de bas poids moléculaires, gazeux ou condensables, combustibles ou non, nocifs ou pas. Aussi, contrairement au cas du bois, nous n'indiquerons pas d'espèces chimiques susceptibles de se former.

Par contre, nous donnerons sommairement l'évolution physique d'un matériau thermoplastique en fonction de la température.

Lorsque celle-ci croît à partir de la normale, on peut observer cinq phases :

- Tout d'abord un simple échauffement s'accompagnant, pour le polymère, de peu de variations de ses propriétés physiques et ce jusqu'à sa température de transition vitreuse ;
- A partir de celle-ci et dans une plage relativement étroite les propriétés mécaniques et certaines propriétés thermiques évoluent rapidement car le polymère passe à l'état visqueux. Pour certains polymères non transformés cette température est inférieure à la normale, pour d'autres supérieures, à savoir par exemple :

- . 29°C pour le polyméthyl - 4 pentène - 1
 - . 50°C pour le polyméthacrylate de méthyle
 - . 75°C pour le polycaprolactame (nylon 6)
 - . 80°C pour le polychlorure de vinyle
 - . 100°C pour le polystyrène
 - . 149°C pour le polycarbonate (du diphenol A)

jusqu'à ce stade, il n'y a eu qu'évolution physique de la matière.

- La décomposition chimique quant à elle débute à la température à laquelle se rompent, dans les macromolécules, les liaisons covalentes les moins fortes, c'est-à-dire les moins stables thermiquement.

Cette dégradation est irréversible ; comme pour le bois, elle est influencée par la température et la présence éventuelle d'oxygène libre. Par contre, elle s'accompagne, selon le cas, d'un effet, soit exothermique (comme pour le bois), soit endothermique.

S'il y a production interne de chaleur, l'accroissement de température sera plus rapide, alors que dans le cas d'une dégradation endothermique, il sera ralenti en raison de la chaleur latente de rupture des liaisons les plus faibles.

Comme ce début de dégradation ne porte que sur un nombre limité de liaisons chimiques, il ne se manifeste, comparativement à la phase précédente, que par peu de changements ; il peut se traduire par exemple par une décoloration.

- Lorsque la température continue à croître, d'autres types de liaisons covalentes atteignent à leur tour leur point de rupture, de sorte que la masse polymérique change alors d'aspect. Mais la variété des macromolécules de synthèse est telle que l'on trouve des comportements très divers, allant de réarrangements moléculaires et d'une faible perte de poids, avec formation d'un produit possédant des propriétés différentes de celles du matériau de départ, à la perte totale de la structure physique initiale par dépolymérisation complète.
Par exemple, le poly acrylonitrile subit une transformation du premier type alors que le poly acétal et poly (méthacrylate de méthyle) se dépolymérisent.

Toutefois, les phases de dégradation (début) et de décomposition ne peuvent être observées séparément que si la rupture des liaisons les plus faibles se produit à une température nettement plus basse que celle à laquelle d'autres types de liaisons se brisent.

Si le polymère contient une variété de types de liaisons présentant un spectre de température de rupture voisines les unes des autres, les divers domaines de température qui leur correspondent se recoupent alors dégradation et décomposition ne sont pas distinguables.

Voici à titre d'exemple, quelques-uns de ces domaines (°C) :

. 170-300	Polyméthacrylate de méthyle
. 200-300	Polychlorure de vinyle
. 213-325	Polyacétate de vinyle
. 250-280	Polyacrylonitrile
. 270-355	Polypropylène oxyde
. 288-425	Polyisobutylène
. 300-325	Polybutyral de vinyle
. 300-400	Polystyrène
. 310-380	Polycaprolactame (nylon 6)
. 328-410	Polypropylène
. 335-450	Polyéthylène
372-480	Polyfluorure de vinyle
. 400-475	Polyfluorure de vinylidène
. 508-538	Polytétrafluoréthylène

La décomposition d'un polymère donne généralement deux phases : l'une dense, l'autre gazeuse.

- La phase dense peut être solide ou liquide.

Solide, elle sera constituée par un résidu enrichi en carbone, de type polymérique et possédant encore une certaine intégrité structurale. Une phase liquide, constituée par le monomère de départ, peut résulter de la dépolymérisation totale.

- La phase gazeuse quant à elle sera formée de molécules plus petites de bas poids moléculaires, résultant de la fragmentation des macromolécules par rupture de certaines liaisons covalentes. Etant donné la composition élémentaire des polymères, on trouve notamment dans cette phase des molécules hydrocarbonées, c'est-à-dire des espèces combustibles qui, au contact de l'air, forment des mélanges inflammables.

En résumé, la thermodégradabilité est une caractéristique commune à tous les matériaux organiques qui, portés à une température convenable, se comportent comme des générateurs de gaz et de vapeurs combustibles ou non, nocifs ou non, cette dégradation pouvant également laisser un résidu riche en carbone, combustible lui aussi.

La chaleur nécessaire pour aboutir aux produits directement combustibles est la chaleur de pyrolyse, qui joue un rôle important dans la vitesse de production des gaz combustibles.

La table suivante situe les ordres de grandeurs des chaleurs de pyrolyse ΔH_p

Matériau	$\Delta H_p \text{ kJ/kg}$
bois	3000
PE	2600
PS	2000
PMMA	1600

CHAPITRE II

2 TRANSFERTS THERMIQUES

On désigne ainsi le transfert de chaleur entre corps différents. Le transport de chaleur par les gaz en mouvement, ou transport convectif qui joue un rôle très important dans les incendies, ressort de l'aéraulique.

Les transferts thermiques dans les incendies présentent une complexité considérable dû à l'existence de hautes températures, de "gaz" non transparents, de vaporisations ou pyrolyses importantes et au caractère rapidement variable des évolutions.

On distingue communément trois modes de transfert thermique :

- Radiatif

C'est-à-dire à distance, sans support matériel de propagation à travers un élément transparent, le plus souvent un gaz.

- Convectif

Au contact d'un gaz et d'une paroi.

- Conductif

Par diffusion à l'intérieur des solides.

Dont nous allons successivement rappeler un certain nombre d'éléments en relation avec l'étude des incendies et leurs conséquences.

2.1 TRANSFERTS PAR RAYONNEMENT

Dans le domaine qui nous intéresse, le rayonnement thermique est essentiellement composé d'infrarouges (longueur d'onde de 0,79 à 314 μ), la lumière visible étant peu calorifique.

On ne parlera dans ce qui suit que de grandeurs globales ou totales, c'est-à-dire intégrées sur les spectres de rayonnement, dans la mesure où il est généralement inutile dans l'incendie de raisonner en fonction des grandeurs spectrales, sur lesquelles on ne dispose d'ailleurs que de très peu d'information.

Cela n'exclut pas que dans certains problèmes particuliers, les résultats puissent être influencés par la répartition spectrale de l'énergie incidente, pour les produits verriers bien sûr, mais aussi assez faiblement semble-t-il pour d'autres produits dans la phase initiale de leur exposition au rayonnement.

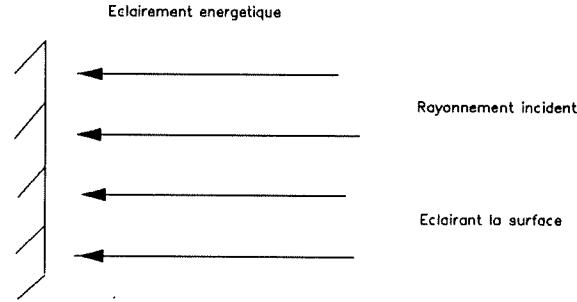
Réflexion, absorption, transmission du rayonnement thermique

Les lois classiques de la réflexion et de la transmission lumineuse s'appliquent. On distingue donc une partie réfléchie r%, une partie absorbée a% et éventuellement une partie transmise t% avec :

$$r + a + t = 100 \%$$

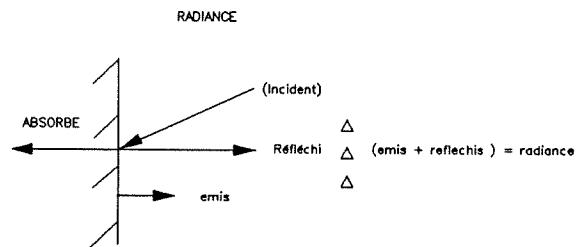
La valeur de r est d'autant plus élevée que le matériau est plus poli et brillant.

Eclairement énergétique



La grandeur E est définie comme la puissance rayonnante incidente rapportée à l'unité de surface : c'est une densité de flux thermique exprimée en kw/m^2 , ou w/cm^2

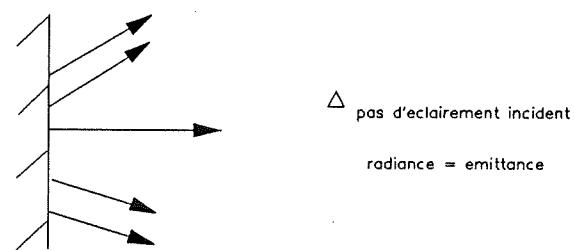
Radiance



Il s'agit cette fois de la puissance provenant de la surface, par addition de la réflexion sur cette surface d'un rayonnement provenant d'ailleurs et de l'émission propre de la surface.

C'est une densité de flux émergent exprimée aussi en kw/m^2 .

Emittance



En l'absence d'éclairage incident une surface solide émet par effet de corps chaud (noir ou gris) un rayonnement "e" par unité de surface : c'est par définition l'émittance de cette surface.

Brillance ou luminance (B)

La brillance d'une surface émettrice dans une direction donnée, qui est au départ une notion liée au récepteur, se définit comme la composante du flux rayonné, par unité de surface de la source, comptée selon la direction considérée, dans un angle solide unité.

$$B = \frac{de}{ds \cos\theta d\theta}$$

En général, B varie avec l'inclinaison.

Toutefois, pour un corps mat, B est constant.

En d'autres termes, loi de Lambert ou du Cosinus, pour un corps mat l'énergie rayonnée par unité de surface dans une direction quelconque est proportionnelle au cosinus de l'angle formé par cette direction avec la normale à la surface du corps.

Il en résulte en intégrant

$$e \text{ (émittance)} = \pi B$$

- Corps noir

Les corps parfaitement absorbants sont dénommés corps noirs par référence à ce que l'on perçoit dans le domaine de la lumière visible.

Ce sont aussi les émetteurs les plus efficaces. Leur émittance est donnée par la loi de STEPHAN²

$$e_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4$$

souvent écrite

$$e_0 = \sigma T^4, e_0 \text{ en } W/m^2, T \text{ en } ^\circ K$$

Les valeurs les plus usuelles apparaissent au tableau de la page suivante.

² L'émittance monochromatique est donnée par la loi de PLANCK

t°C	eoT W/cm ²
100	0,11
200	0,28
300	0,61
400	1,16
500	2,02
600	3,29
700	5,08
800	7,51
900	10,73
1000	14,88

(1) L'émittance monochromatique est donnée par la loi de PLANCK

Pour les corps, non réfléchissants, on a

Radiance = émittance

Les corps noirs sont en réalité une limite dont on s'approche dans un certain nombre de cas, soit réalisés spécialement pour permettre des étalonnages d'appareils de mesure du rayonnement soit correspondant à des cas réels d'incendie comme celui du rayonnement par la fenêtre d'un local entièrement embrasé

On s'en approche aussi dans des fours en régime quasi-permanent.

- Corps gris

Un corps gris est un corps dont l'émittance est indépendante de la longueur d'onde.

Ces corps sont caractérisés par :

.une émissivité (infrarouge) ϵ

.un pouvoir absorbant $\alpha = \epsilon$ (équilibre)

.un pouvoir réflecteur $ro = 1 - \alpha$

Pour de tels corps, la radiance R s'exprime en fonction de l'éclairement E et de l'émittance eo du corps noir à la même température que celle du corps gris par la loi simple :

$$R = \underline{\epsilon} \underline{e_0} \underline{\text{emittance}} + \underline{(1-\epsilon)} \underline{\text{reflexion}}$$

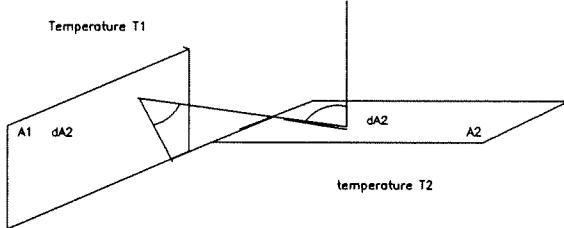
En l'absence d'éclairement externe E la radiance est égale à l'émittance du corps gris.

$$e = \epsilon \sigma T^4$$

Les corps gris sont des corps intermédiaires entre les corps noirs, parfaitement absorbants, et les corps blancs, parfaitement réfléchissants. C'est une catégorie certes idéalisée, mais d'application pratique fréquente, car dans le domaine de l'infrarouge qui nous intéresse, la plupart des corps, même s'ils apparaissent colorés à la vue, se comportent sensiblement comme des corps gris. S'ils ne le font pas initialement, les suies et un début de pyrolyse se chargeront de les faire entrer dans cette catégorie.

Les aspects géométriques. Facteurs de formes. Relation de réciprocité

Prenons un cas particulier assez simple.



L'échange d'énergie entre deux surfaces isothermes A_1 et A_2 s'analyse par voies différentielles en introduisant les surfaces élémentaires dA_1 et dA_2 . Celles-ci sont éloignées d'une distance r ; leurs normales font avec leur segment de liaison des angles θ_1 et θ_2 .

L'efficacité d'émission de dA_1 vers dA_2 diminue comme $\cos \theta_1$ quand θ_1 augmente.

De même l'inclinaison du rayon incident sur dA_2 réduit l'éclairement de cette surface proportionnellement à $\cos \theta_2$.

Enfin, l'énergie émise par une source ponctuelle se répartissant de manière sphérique en s'éloignant de la source, la densité énergétique (l'éclairement potentiel) décroît comme $\frac{1}{r^2}$.

Finalement, l'échange directe entre les deux surfaces A_1 et A_2 s'écrit :

$$dW_{1,2} = \frac{1}{\pi} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{r^2} (e_1 - e_2)$$

avec $e_1 = \sigma t_1^4$ $e_2 = \sigma T_2^4$

et

$$\overset{\circ}{W}_{1,2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{r^2} (e_1 - e_2)$$

le terme intégral qui a une signification purement géométrique est homogène à une aire. On l'appelle aire d'échange direct entre A_1 et A_2 nous la noterons A_{12} .

On introduit les facteurs de forme F_{12} et F_{21} comme suit

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} = A_{12} (= A_{21})$$

Ceci découle directement de la symétrie de l'intégrale ci-dessus. Cette relation dite de réciprocité peut faciliter certains calculs.

Ces facteurs de formes ont une propriété particulière quand on considère toutes les formes qu'une surface A_1 peut voir (y compris A_1 elle même si elle n'est pas plane), les différents facteurs F_{1i} sont tels que

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + \dots + F_{1i} + \dots = 1$$

Le facteur F_{1i} indique en fait quelle est la proportion du "champ de vision" de A_1 occupée par la surface A_i .

Les facteurs de forme pour diverses configurations font l'objet de publication dans la littérature spécialisée. On peut procéder aussi par maquettisation.

Pour deux surfaces élémentaires dA_1 et dA_2 , on peut écrire:

$$dF_{1,2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \cos \theta_1 d\omega_1$$

où

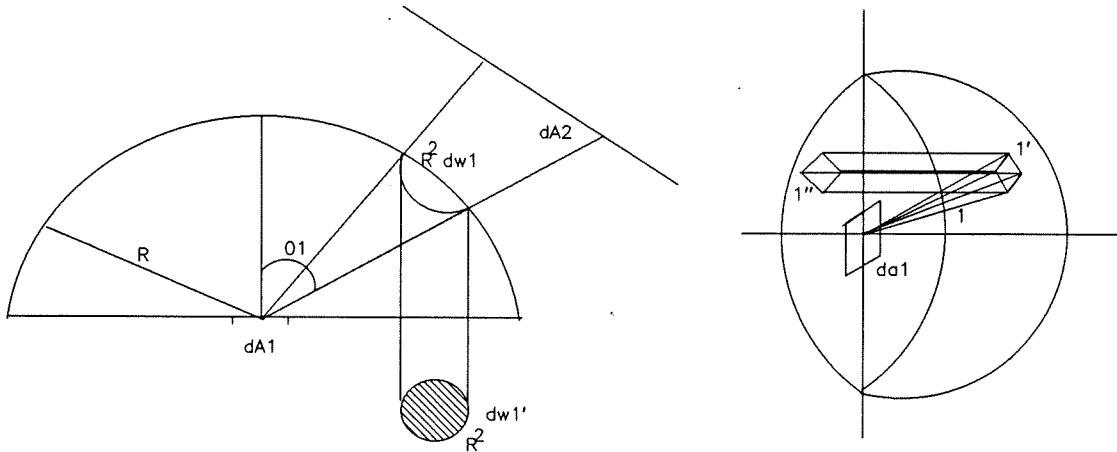
$$d\omega_1 = \frac{(\cos \theta_2 dA_2)}{r^2}$$

est l'angle solide élémentaire centré sur dA_1 , et déterminé par une petite surface dA_2 de dA_2 .

L'expression sous le signe \int n'est autre que la projection du plan dA_2 de cet angle solide soit $d\omega'_1$.

Il en résulte que si l'on considère une hémisphère de centre dA_1 , de rayon R, un élément dA_1 de dA_2 se projette sur la sphère suivant une surface $R^2 d\omega_1$ et $R^2 d\omega_1$ se projette sur le plan de dA_1 , suivant $R^2 d\omega'_1$.

Le grand cercle de la sphère ayant pour surface πR^2 , le facteur $dF_{dA_1-dA_2}$ n'est autre que le rapport des surfaces $\frac{R^2 d\omega_1}{\pi R^2}$ et pour une surface finie A_2 , il suffit d'additionner les projections : on prend la projection ω_1' de A_2 sur la sphère puis la projection ω_1 de ω_1 sur le plan de dA_1 . Un dispositif optique simple permet d'y parvenir.



Une $1/2$ sphère en verre translucide est éclairée par une source ponctuelle dA_1 .

La surface 1, intérieure à la $1/2$ sphère se projette en $1'$ sur la paroi. En photographiant suivant la perpendiculaire à dA_1 on obtient la surface $1''$. Il suffit de faire le rapport de cette surface avec celle du grand cercle pour avoir le coefficient recherché.

Bilan d'échange direct entre corps noirs

Considérons le bilan d'échange au niveau de la surface A_1

par exemple : il résulte de tous les échanges avec toutes les autres surfaces a_i donc :

$$\overset{\circ}{W}_1 = \sum \overset{\circ}{W}_{1,i}$$

$$\overset{\circ}{W}_1 = \sum A_1 F_{1,i} (e_1 - e_2)$$

$$\overset{\circ}{W}_1 = A_1 (e_1 - \sum F_{1,i} e_i)$$

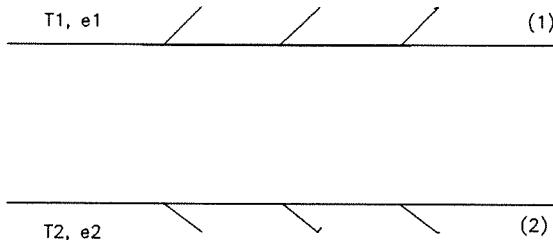
Le terme $A_1 e_1$ est l'émission propre à A_1 ; $\sum F_{1,i} e_i$ représente l'éclairement global dû au rayonnement des autres surfaces.

Echanges totaux entre corps gris

Il s'agit encore d'une approche idéale, mais plus réaliste où les corps gris sont cette fois susceptibles de réfléchir partiellement les rayonnements.

Nous n'allons que l'esquisser ici, car elle conduit à des calculs très compliqués en général.

Prenons un cas limite classique.



Deux plans gris parallèles infinis ; leur distance n'a pas d'influence car le champ de rayonnement est uniforme entre les plaques.

L'échange d'énergie entre les deux plans est de façon évidente la différence entre les radiances de chacune des surfaces.

Or avec les notations déjà utilisées :

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \epsilon_1 + e_1 + (1 - \epsilon_1)r_2 \\
 \text{émission} &\quad \text{fraction réfléchie de ce} \\
 \text{propre de (1)} &\quad \text{qui vient de (2)} \\
 \text{et } R_2 &= \epsilon_2 + (1 - \epsilon_2)R_1 \\
 \text{avec } e_1 &= \sigma T_1^4 \text{ et } e_2 = \sigma T_2^4
 \end{aligned}$$

Résolvant en R_1 et R_2 on obtient:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\epsilon_1 e_1 + \epsilon_2 (1 - \epsilon_1) e_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} \\
 R_2 &= \frac{\epsilon_1 e_1 + \epsilon_1 (1 - \epsilon_1) e_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} \\
 R_1 - R_2 &= W_{12}^\circ = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (e_1 - e_2)}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} = \frac{e_1 - e_2}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}
 \end{aligned}$$

par rapport à un échange entre corps noirs apparaît le facteur:

$$\epsilon_r = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2}$$

Si l'un des corps est noir, par exemple si $\epsilon_2 = 1$, $\epsilon_r = \epsilon_1 \epsilon_2 = \epsilon_1$ la formule $\epsilon_r = \epsilon_1 \epsilon_2$ est une approximation assez raisonnable compte tenu des imprécisions sur ϵ_1 et ϵ_2 .

La généralisation à un ensemble complet de surfaces A_i est réalisable mais complexe. Elle s'appuie sur le système d'équations linéaires en R_i et W_i

$$R_i = \epsilon_i e_i + (1 - \epsilon_i) \sum_j F_{ij} R_j$$

$$W_i = R_i - \sum_j F_{ij} R_j$$
E

Une résolution numérique informatique est alors pratiquement inévitable.

Propriétés radiatives des flammes et fumées

Elles contiennent à la fois des gaz proprement dits, CO^2 et vapeur d'eau notamment, puis des particules en suspension, les gouttelettes et des suies, en proportions variables selon les cas.

L'émission des gaz proprement dits se fait dans des bandes de longueur d'onde caractéristiques. L'émission des suies est un rayonnement continu de type corps noir.

L'émission totale est fonction du nombre de molécules ou de particules dans l'unité de volume, ce qui fait que contrairement aux solides, elle dépend de l'épaisseur des flammes ou de la couche de fumée et de son étendue.

Le problème est complexe. Pour l'incendie, on peut le simplifier en assimilant les flammes et les fumées à des gaz gris obéissant à une loi de transmission du type :

$$I = I_0 e^{-KI}$$

Où I = flux transmis

I_0 = flux incident

I = épaisseur de la couche de fumée ou épaisseur moyenne des flammes en mètres.

K en m^{-1} est un coefficient d'absorption spécifique variable selon le taux de particules en suspension principalement. Typiquement, ce coefficient varie entre 0,5 et 2 m^{-1} dans une flamme ou dans une fumée de densité moyenne (0,8 pour une flamme de bûcher de bois).

Il peut atteindre exceptionnellement 5 m^{-1} dans des fumées très chargées en suies (valeurs correspondant au proche infrarouge).

La partie absorbée I_a déduite par différence :

$$I_a = I_0 (1 - e^{-Kl}) = \alpha I_0$$

$$\text{donc } \alpha = 1 - e^{-Kl}$$

Emission par un gaz gris

Tout comme pour les solides gris, l'émission d'un gaz gris est égale à son absorptivité α donc

$$\epsilon = 1 - e^{-Kl}$$

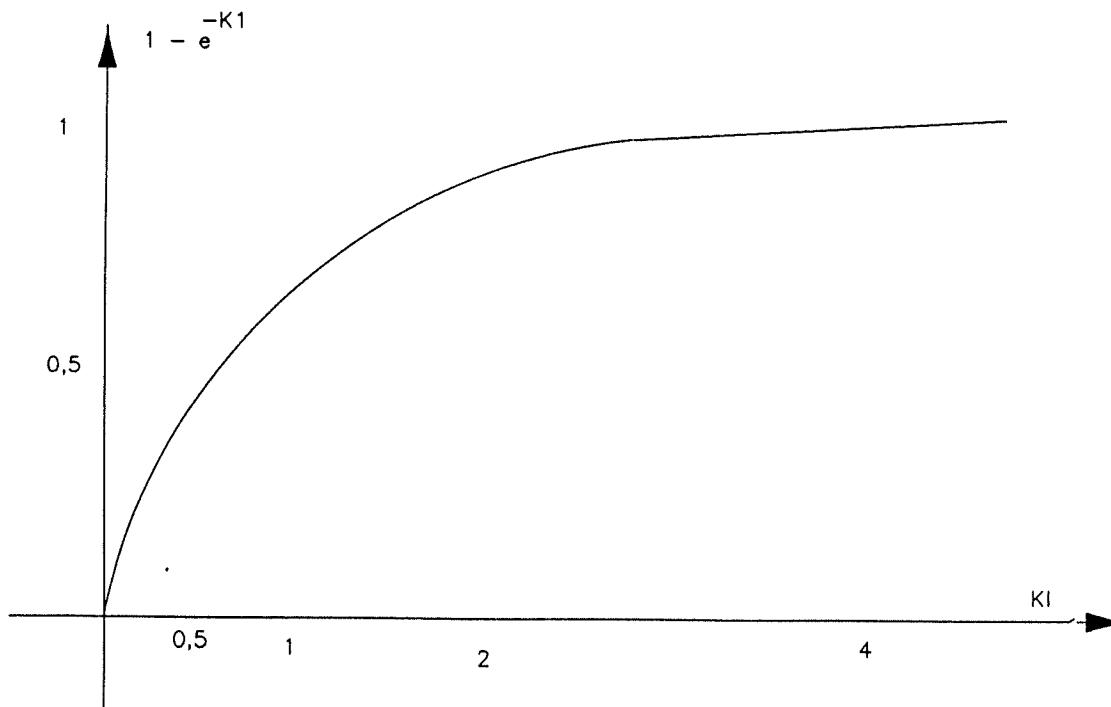
et par conséquent

$$\epsilon = \sigma (1 - e^{-Kl}) T_c^4 T_c$$

Tg température de Kelvin

Le graphique ci-joint donne les valeurs de $1 - e^{-Kl}$ en fonction de Kl

Pour $K = 2$ et une longueur de parcours de l'ordre de 3 m (dimensions d'une pièce), on obtient pratiquement $\epsilon = 1$. C'est à dire que pour les parois d'un local embrasé, la masse de fumées très chaudes se comporte donc à peu près comme un corps noir (période de feu violent).

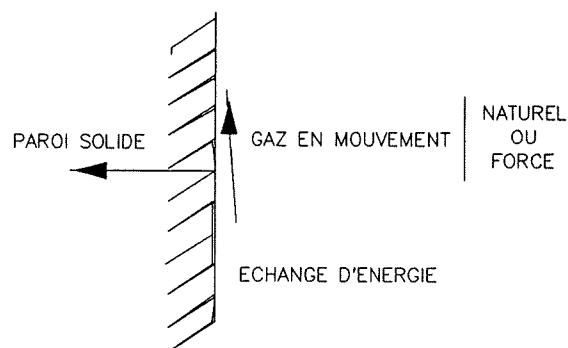


APPLICATION AUX DISTANCES D'ISOLEMENT ENTRE BATIMENTS

Ce qui vient d'être dit a une application directe en sécurité incendie. On peut à partir de cela calculer les flux énergétiques reçus par un bâtiment- cible sous l'effet du rayonnement émis par un bâtiment totalement ou partiellement embrasé en tenant compte en outre du rayonnement des flammes hors couvertures, notamment en cas de revêtement combustible. Cette prise en compte peut être forfaitaire dans la mesure où le rayonnement par les ouvertures est normalement le plus important.

2.2 TRANSFERT PAR CONVECTION OU TRANSFERT CONVECTIF

Traditionnellement, les thermiciens désignent par transfert convectif le phénomène suivant :



Répétons qu'il y a lieu d'éviter la confusion avec le transfert convectif de chaleur lié au déplacement d'un fluide.

Il s'agit en fait d'une conduction thermique à travers une couche limite gazeuse laminaire.

Cette couche est d'autant plus mince, donc moins "isolante" que le mouvement du gaz est plus rapide. La question est complexe, les facteurs qui interviennent sont nombreux (états de surface, températures, vitesse et nature du fluide, viscosité, angles d'incidence) et pour ce qui nous préoccupe, il est suffisant de rester empirique.

Le flux d'énergie transféré du gaz à la paroi peut en pratique être mis sous la forme :

$$\phi = h'(T_p - T_c)^n \quad T_p : \text{température de la paroi}$$

T_c : température du gaz à quelques centimètres de la paroi

h' : coefficient

n : exposant.

On observe en pratique :

En convection naturelle où le gaz se meut spontanément par suite des variations de masse volumique du gaz dues aux gradients de température

h est à peu près constant si $n = 1,25$ à $1,3$ (loi en $\Delta T^{\frac{5}{4}}$)

en convection forcée $n = 1$

Pour simplifier, compte tenu de la faible variation de la combinaison, $h'(T_p - T_c)^{0.25}$, on prend dans les deux cas une loi linéaire :

$$\Phi = h(T_p - T_c)$$

On peut retenir comme valeurs typiques

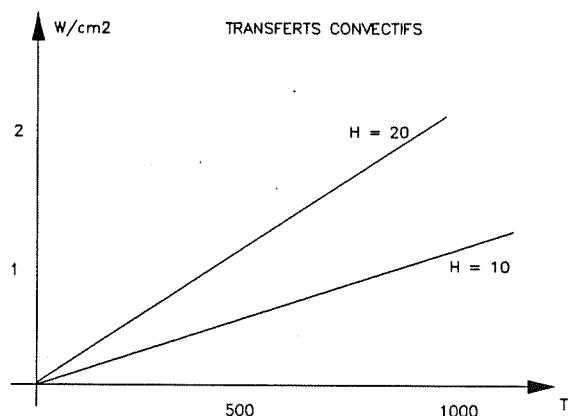
. $h = 10 \text{ w/m}^2/\text{°}$ en dehors des impacts de flamme et hors période de feu agité.

. h de 20 à 30 dans les autres conditions.

Afin de faciliter les comparaisons entre transferts thermiques par rayonnement et par convection, le graphique ci-joint donne la valeur du flux transféré pour $h = 10$ et $h = 20$ en fonction de la différence de température entre gaz et paroi.

Lorsque la température croît, les transferts radiatifs ont tendance à devenir prépondérants. Cela est évident lorsque la différence de température est relativement importante, mais même pour les écarts modestes, cette tendance existe. Toutefois, il ne faut pas généraliser cette conclusion. Elle ne vaut que pour des couches de gaz ou de flammes suffisamment épaisses.

Il est clair qu'avec une petite flamme au contact, l'inflammation en paroi résulte principalement du transfert convectif.



Il est également intéressant de comparer avec le transport convectif. Les gaz en mouvement emportent la chaleur sensible. Un débit m de gaz entré à température ambiante T_a dans un local incendié et ressortant à la température de feu T_f emporte une énergie :

$$\dot{E} = \dot{m} C_p (T_f - T_a) \text{ avec } C_p = 1 \text{ kJ/kg/C}$$

Prenant pour m la valeur limite

$$\dot{m} = 0.5 A \sqrt{H} \text{ kg/s (voir Aéraulique)}$$

et avec $T_f - T_a = 1000^\circ C$, on constate qu'une porte standard ($1,6m^2$) peut évacuer par transport convectif une puissance : $E = 1,1 \text{ Megawatt}$.

La même porte, corps noir à $1000^\circ C$, émet une puissance rayonnante :

$$E_{ray} = 5,6 \cdot 10^{-8} [(1273)^4 - (293)^4] * 1,6 m^2 = 0,235 \text{ Megawatt}$$

Le transport convectif est donc le mode prépondérant de propagation de l'énergie hors du local ; c'est donc un facteur primordial du risque d'extension du feu.

2.3 TRANSFERT THERMIQUE PAR CONDUCTION EN PHASE SOLIDE

La conduction de la chaleur dans les solides est un phénomène diffusionnel. De très nombreux ouvrages ont été publiés sur ce sujet ; il a connu des développements théoriques très considérables qu'il n'y a pas lieu d'aborder ici.

Dans l'incendie, d'une part, il n'est pas possible de raisonner en régime permanent. d'autre part, il y a lieu de tenir compte autant que nécessaire des variations des caractéristiques des matériaux et de leurs changements d'état en fonction de la température.

Cependant, ce dernier problème est très complexe et ne pourra qu'être succinctement évoqué.

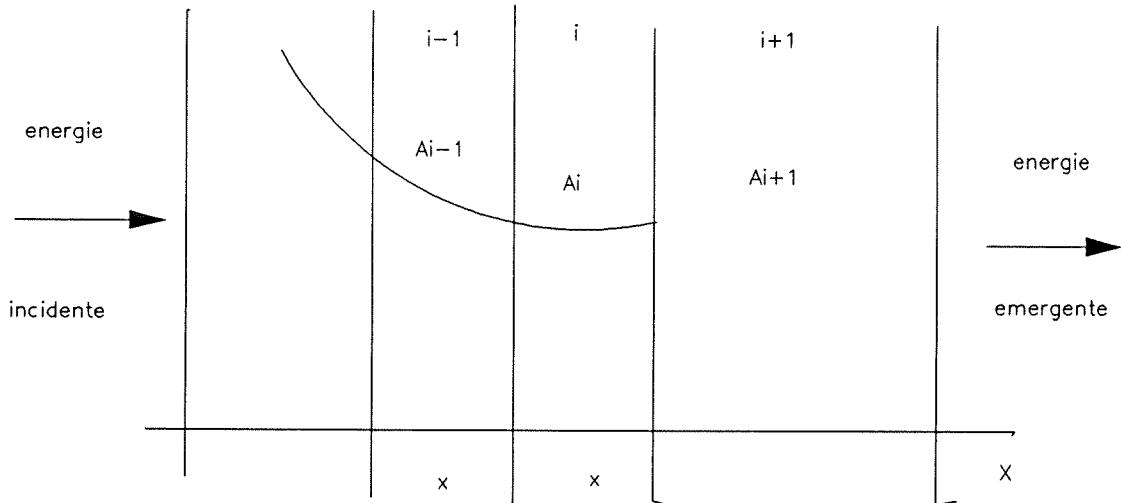
2.3.1 DIFFUSION DE CHALEUR DANS LES SOLIDES INERTES

Il s'agit ici typiquement des matériaux utilisés dans la construction et contenant très peu d'humidité. C'est un cas limite, qui fournit néanmoins des éléments d'application générale.

2.3.1.1 NOTIONS - CONDUCTIVITE - CAPACITE CALORIFIQUE VOLUMIQUE (INERTIE)

Ce sont les deux notions de base en matière de conduction.

Plaçons-nous au sein d'une plaque solide conformément au schéma suivant :



a) Conductivité

L'énergie incidente échauffe progressivement le solide dans lequel s'établit un champ de température (supposé monodimensionnel ici).

La tranche $i-1$ étant plus chaude que la tranche i , la chaleur diffuse de $i-1$ vers i , puis $i+1$ etc...

On caractérise la facilité de diffusion par un paramètre λ appelé conductivité thermique et défini par :

$$\Phi_x = -\lambda \lim_{\delta x \rightarrow 0} \left(T_i - \frac{T_{i-1}}{\Delta x} \right) = \lambda \frac{\delta T}{\delta x}$$

Φ_x est une densité de flux thermique définie comme aux paragraphes précédents. Il se mesure en

w/m^2

w/m^2 .

$\frac{\delta T}{\delta x}$ est ici le gradient monodimensionnel de température. Le signe $-$ est introduit pour des raisons de cohérence de signe

(Φ est compté > 0 selon les $x > 0$)

λ est donc mesuré en $w/m/\circ K$.

Les ordres de grandeur de λ varient considérablement comme le montre la table suivante.

Conductivités thermiques de quelques matériaux à température ordinaire

Matériaux	$\lambda w/m/\circ K$
Cuivre	380
Aciers	50 à 70
Pierres	1 à 3,5
Bétons lourds	1 à 1,8
Bétons légers	0,5 à 1,5
Bétons cellulaires	0,12 à 0,30
Plâtres	0,3 à 0,5
Bois lourds	0,3
Panneaux de particules	0,10 à 0,20
Plastiques massifs	0,5 à 1,5
Feutre de verre	0,04
Plastiques alvéolaires	0,03 à 0,5

La conductivité d'un corps est en général une fonction à variation lente de la température. Entre 20°C et 1000°C, il est cependant pas rare d'observer des variations de 50% voire 100%. Il n'existe aucune règle générale permettant de prévoir ces variations ; elles doivent être obtenues par voie expérimentale.

La conductivité varie avec la densité dans une même famille de produits.

Comme règle grossière, on peut prendre au sein d'une même famille (famille des bétons lourds ; famille des bétons légers etc....),

$$\frac{\lambda}{\rho} = \text{constante.}$$

b) La capacité calorifique volumique

Retenant notre schéma, analysons ce qui se passe au cours du temps.

En général, le flux entrant dans la tranche i , en provenance de la tranche $i-1$, appelleons le Φ_x^{i-1} , et le flux Φ_x^i quittant i pour aller en $i+1$, sont différents ; Leur différence $\Phi_x^{i-1} - \Phi_x^i$ représente un excédent d'entrée d'énergie dans la tranche i qui voit ainsi sa température évoluer.

Pendant un court intervalle de temps δT , cette évolution δT_i de T_i est liée au solde excédentaire d'échange par la formule :

$$V_i \rho c \Delta T_i = \underline{\Phi_x^{i-1} \text{flux net}} - \underline{\Phi_x^i \text{ energie excédentaire}}$$

V_i étant le volume de la tranche soit pour une surface de 1 m² : $V_i = 1 \times X^* \times X^*$ est la masse volumique du solide (Kg/m³)

E

$(V_i \rho c)$ est donc la masse de la tranche de 1 m²

m² de surface)

"c" est la chaleur massique du solide (joule/Kg/K)

Soit aussi

$$\rho c \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = \frac{\Phi_x^{i-1} - \Phi_x^i}{\Delta x}$$

Par passage à δx et δt très petits :

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = - \frac{\delta \Phi_x}{\delta x}$$

Ces dernières équations mettent en évidence l'influence du produit ρc qui représente la capacité calorifique volumique du solide. Plus ce produit ρc est grand et plus le solide est lent à s'échauffer dans un gradient de température donné et vice-versa.

UNE REGLE IMPORTANTE

Pour la majorité des matériaux minéraux

$$C \sim (900 \text{ à } 1000) J/kg/C$$

Pour les matériaux organiques de synthèse, les valeurs de C se dispersent un peu plus. En règle générale, les valeurs se situent entre 20% et 50% au-dessus de la précédente et pour les matériaux cellulaires, elle décroît légèrement quand la masse volumique apparente décroît.

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR NUMERIQUES

Matériaux	pc
Cuivre	$8,7 \cdot 10^6 J/m^3/$
Acier	$7,8 \cdot 10^6 J/m^3/$
Béton	$2,0 \cdot 10^6 J/m^3/$
Bois (550 kg/m ³)	$0,6 \cdot 10^6 J/m^3/$
Polystyrène expansé (15 kg/m ³)	$0,021 \cdot 10^6 J/m^3/$

On retrouve à nouveau des disparités considérables entre les métaux et les isolants légers.

2.3.1.2 EQUATION DE LA CHALEUR - LA DIFFUSIVITE THERMIQUE

Reprenons la dernière équation que nous avons obtenue et introduisons la définition :

$$\Phi = -\lambda \frac{\delta T}{\delta x}$$

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right)$$

Cette équation porte le nom "d'équation de la chaleur" (monodimensionnelle)

Si λ varie relativement peu (10 à 20 sur 1000°C par exemple), on peut prendre la forme approchée bien connue :

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right)$$

Le groupe $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ porte le nom de "diffusivité thermique" cette grandeur est mesurée en m²/s.

2.3.1.3 UNE FORME DE L'EQUATION DE LA CHALEUR

Dérivons membre à membre par rapport à x l'équation obtenue au paragraphe précédent.

$$\rho c \frac{\delta^2 T}{\delta x \delta t} = \frac{\delta^2}{\delta x^2} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right)$$

soit aussi

$$\rho \frac{c}{\lambda} \frac{\delta}{\delta t} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) = \frac{\delta^2}{\delta x^2} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right)$$

et par conséquent avec

$$\Phi = -\lambda \frac{\delta T}{\delta x}$$

$$\frac{\delta \Phi}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2}$$

Le flux thermique vérifie donc la même équation formelle. Cette propriété est souvent utile dans la recherche de solutions à un problème de transfert thermique.

2.3.1.4 LA DIFFUSIVITE : UNE GRANDEUR QUI VARIE PEU

Les valeurs de λ et ρc données aux paragraphes précédents et la règle de $\frac{\lambda}{\rho c}$ constante par famille conduisent à une règle assez grossière mais intéressante.

Pour les métaux : $\alpha = (1 \text{ à } 4) 10^{-5} m^2/s$

Pour les autres matériaux : $\alpha = (0,5 \text{ à } 1,5) 10^{-6} m^2/s$

2.3.1.5 CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX LIMITES

Pour qu'un problème de conduction soit défini, il faut que ces conditions soient connues ou données.

Les conditions initiales qui résultent de l'état normal du bâtiment ont généralement peu d'importance dans l'incendie. Il n'en est pas de même pour les conditions aux limites.

Les deux surfaces de contact du mur avec l'atmosphère peuvent être soumises à des conditions "ambiantes" très variables dans leur nature et leur évolution dans le temps.

Par exemple :

Le flux thermique en $x = 0$ peut être défini par un échange "linéaire" proportionnel à la différence entre la température de surface et la température ambiante.

$$\phi_{(x=0)} = h_a (T_a - T_{(x=0)})$$

Il en est de même en $x = l$, de l'autre côté

$$\phi_{(x-l)} = h_a (T_{(x-l)} - T_{\text{extérieure}})$$

C'est le modèle généralement utilisé dans les problèmes de chauffage des locaux.

Ces mêmes flux peuvent se compliquer par suite de forts écarts de température faisant jouer les lois en T^4 du rayonnement : c'est le cas des incendies.

$$\phi_{(x=0)} = h_a (T_F - T_{(0)}) + \epsilon_r \sigma (T_F^4 - T_{(0)}^4)$$

On trouve dans les ouvrages spécialisés, les solutions mathématiques d'un grand nombre de problèmes avec contraintes aux limites linéaires.

Par contre, les problèmes mettant en jeu de fortes non linéarités en T^4 n'ont pas été résolus analytiquement ni avec l'hypothèse T_F constant et encore moins avec T_F variable rapidement comme on l'observe dans les incendies.

La résolution spécifique précise ce type de problème passe nécessairement par des méthodes numériques que le développement du calcul automatique a rendu presque banale à présent. Il s'agit de méthodes aux différences finies ou, plus sophistiquées, aux éléments finis. Donnons brièvement le principe des premières.

2.3.1.6 LES METHODES NUMERIQUES AUX DIFFÉRENCES FINIES

Elles s'appuient, dans leur principe, sur les équations des paragraphes précédents.

$$\Phi_x^{t-1} = -\lambda \frac{(T_t - T_{t-1})}{\Delta x}$$

$$\Phi_x^t = -\lambda \frac{(T_{t+1} - T_t)}{\Delta x}$$

$$\rho c \Delta x \{T_t(t + \Delta t) - T_t(t)\} = \{\Phi_x^{t-1} - \Phi_x^t\} \Delta t$$

soit

$$T_t(t + \Delta t) - T_t(t) = -\left(\frac{\lambda \Delta t}{\rho c \Delta x^2}\right) (2T_t - T_{t+1} - T_{t-1})$$

et ceci en chaque tranche intérieure.

A la surface, par exemple, on écrit que le flux pénétrant dans le solide, est partiellement transmis, et échauffe la première tranche.

$$\Phi_{\text{échange}} = h \{T_F - T_1(t)\} + \epsilon_r \sigma (T_F^4 - T_1^4) \rightarrow | \rightarrow \Phi_{\text{transmis}} = -\lambda \left(\frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right)$$

Accumulation : $\rho c \Delta x \{T_1(t + \Delta t) - T_1(t)\}$

donc

$$\rho c \Delta x \{T_1(t + \Delta t) - T_1(t)\} = \Phi_{échange} - \left\{ -\lambda \frac{T_2(t) - T_1(t)}{\Delta x} \right\}$$

On écrit ainsi N équations pour N tranches, liant les $T_i(t + \Delta t)$ aux $T_i(t)$; la connaissance des seconds permet le calcul des premiers et l'on résoud ainsi pas à pas dans le temps et dans l'espace.

L'application de ce genre de technique en sécurité incendie est encore réduite. Le D.T.U. feu béton, est en France, le seul exemple officiel.

Le développement "exponentiel" de la micro-informatique permet de présager une utilisation de plus en plus courante de ces méthodes qui peuvent pratiquement faire face à toutes les situations et ceci pour des coûts de plus en plus réduits.

2.3.1.7 PROBLEME DE LA PLAQUE SEMI-INFINIE AVEC FLUX ABSORBE CONSTANT

Il s'agit d'un problème accessible au calcul direct, suffisamment proche de certains problèmes réels pour que l'on puisse s'en servir pour certaines estimations approchées.

Par exemple, on constate, par analyse des résultats expérimentaux, que le flux thermique absorbé par une paroi soumise à un incendie qui démarre brutalement avec forte puissance se situe aux environs de 2 à 3 w/cm².

Analysons quelques éléments de la solution du problème suivant :

$$\frac{\delta \Phi}{\Delta t} = \alpha \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2}$$

$$\Phi = 0 \text{ pour } t \leq 0 \text{ quelque soit } x$$

$$\Phi_{(x=0)} = \Phi_0 \text{ pour } t > 0$$

On montre que la solution de ce problème s'écrit :

$$\Phi = \Phi_0 erfc \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right)$$

avec les définitions

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

(c'est l'intégrale de la courbe de Gauss)

et $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erfc}(x)$

On voit apparaître dans cette expression le groupe $\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$. Son carré $\frac{x^2}{4\alpha t}$ porte le nom de nombre de Fourier local.

Utilisons l'autre forme de l'équation de la chaleur

$$\rho c \frac{\delta T}{\delta t} - \frac{\delta(\Phi)}{\delta x}$$

En $x = 0$, nous avons dès lors

$$\rho c \frac{\delta T_{(x=0)}}{\delta t} = -\phi_0 \left\{ \frac{\delta}{\delta x} \left(\text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right) \right\}_{x=0}$$

On montre assez facilement que ceci a conduit à :

$$\rho c \frac{\delta T_{(x=0)}}{\delta t} = -\phi_0 \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\alpha t}}$$

et donc par intégration par rapport à t :

$$T_{(x=0)} = T_{initial} + \Phi_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{t^{1/2}}{\sqrt{\lambda \rho c}}$$

Enfin par combinaison des équations précédentes, on obtient

$$\Delta T = \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda \rho c}} \Phi_0 i \text{erfc} u \quad (u = \frac{x}{2\sqrt{\alpha c}})$$

qui fournit en un temps donné, la répartition de l'accroissement des températures dans l'épaisseur dans la plaque semi-infinie

E

$i \text{erfc} u$

à l'allure ci-contre

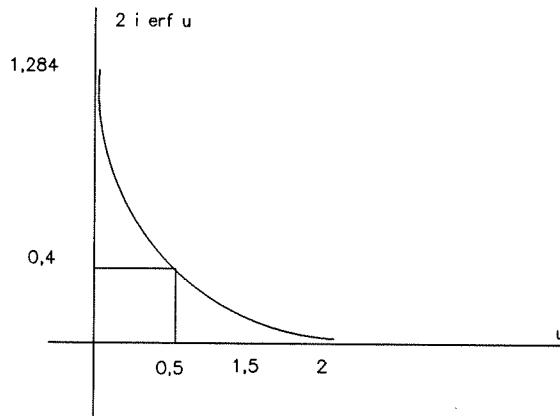
Il apparaît donc les résultats intéressants suivants :

1. L'échauffement superficiel est proportionnel à Φ_0

2 La montée en température est en $t^{1/2}$ (parabole couchée).

C'est une loi assez proche de celle retenue pour la courbe de température des fours d'essai en résistance au feu .

3 L'échauffement est inversement proportionnel à la grandeur $\sqrt{\lambda \rho c}$ qui joue donc un rôle important.



Le groupe $\lambda \rho c$ est le quatrième paramètre intéressant dans les problèmes d'incendie. Il porte les noms d'effusivité thermique ou inertie thermique selon les auteurs.

Il peut varier énormément d'un matériau à un autre, contrairement à α .

Cuivre	$3,1 \cdot 10^9$
Béton	$3,6 \cdot 10^6$
Béton cellulaire	$5,6 \cdot 10^4$
Plastique cellulaire et	$6,5 \cdot 10^1$
Fibre isolante	

Ceci a comme principale conséquence qualitative que, dans des conditions semblables, les matériaux à caractère isolant et léger ont des temps de montée en température sous le flux thermique d'un feu de 100 à 1000 fois plus brefs que ceux des bétons ou matériaux semblables. Nous reviendrons sur ce point au sujet de l'inflammation des matériaux combustibles.

Inversement, si nous écrivons notre équation finale sous la forme

$$\frac{(T - T_{initial})}{t^{1/2}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\lambda \rho c} = \Phi_0$$

et si nous imaginons que $T - T_{initial}$ suit sensiblement une loi en $t^{1/2}$ par suite d'une exposition artificiellement créée pour ce faire (essais de résistance au feu), le flux absorbé Φ_0 est proportionnel à $\sqrt{\lambda \rho c}$.

2.3.2 DIFFUSION DE LA CHALEUR AVEC EVAPORATION OU PYROLYSE

En réalité au cours d'un incendie, les matériaux exposés contiennent généralement une masse d'eau assez importante par unité de volume. Seuls peut-être les plastiques "massifs" échappent à cette règle.

Les bétons et les bois contiennent de l'ordre de 70 Kg d'eau/m³ de matériau massif.

Le plâtre en contient de deux à trois fois plus.

Cette eau s'évapore vers 100°C si le matériau est suffisamment poreux, et un peu au-dessus s'il s'agit d'un béton très compact par exemple. Ceci représente une inertie thermique additionnelle tout à fait considérable.

Un phénomène semblable se produit avec la dégradation thermique des matériaux combustibles. Le phénomène s'apparente à une vaporisation dans certain cas (thermoplastiques) et à une pyrolyse laissant un résidu charbonneux dans d'autres (bois, certaines mousses rigides..)

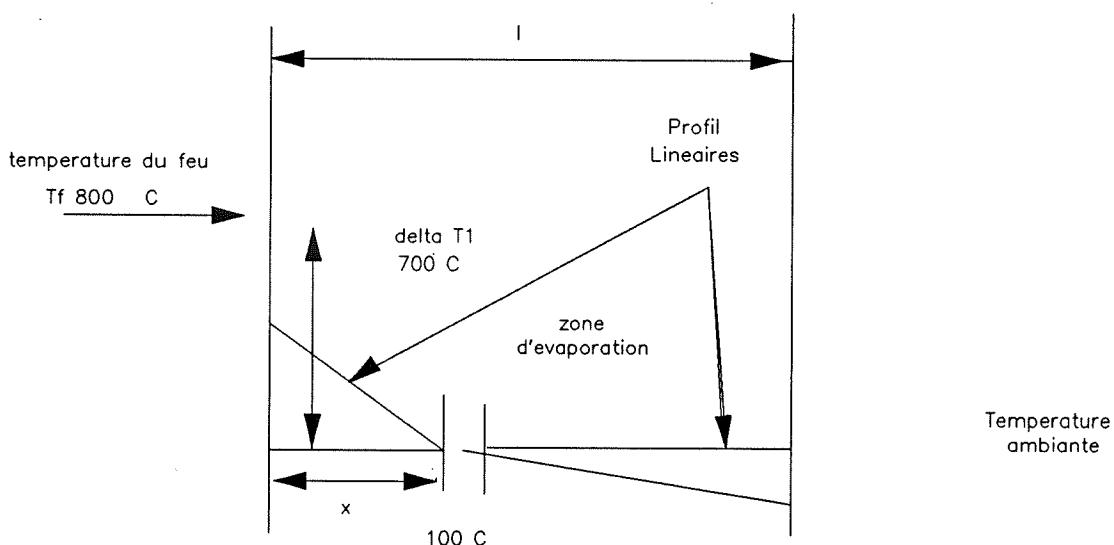
A nouveau, ces transformations chimiques sont endothermiques en général et ralentissent donc les échauffements.

L'analyse fine des phénomènes est très compliquée, mais un modèle très élémentaire appliqué au cas d'une paroi en béton permettra de comprendre le mécanisme un peu mieux.

Travaillons avec les hypothèses suivantes :

. L'eau s'évapore à 100°C sans surpression ni évaporation préalable (C'est une hypothèse retenue dans le D.T.U. feu béton)

. Le champ de température peut être caricaturé conformément au schéma suivant : E



Le bilan thermique du mur conduit alors à une équation liant la vitesse de propagation du front à 100°C à la profondeur x de ce front et aux paramètres thermiques ρc et λ du mur, h_a , h_f , taux d'humidité u (en kg/m³).

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta T_1 \frac{\lambda h_f}{\lambda + x h_f} - \Delta T_2 \frac{\lambda h_a}{\lambda + (1-x) h_a}}{\rho c \left[\frac{\Delta T_1}{2} \left(\frac{2xh_f}{\lambda + x h_f} - \frac{x^2 h_f^2}{(\lambda + x h_f)^2} \right) - \Delta T_2 \left(\frac{2(1-x)h_a}{\lambda + (1-x)h_a} - \frac{(1-x)^2 h_a^2}{(\lambda + (1-x)h_a)^2} \right) + \frac{2500u}{\rho c} \right]} \quad E$$

Cette équation conduit aux courbes de la page suivante avec les paramètres :

$$\lambda = 1 \text{ w/m/}$$

$$h_f = 40 \text{ w/m}^2 /$$

$$h_a = 10 \text{ w/m}^2 /$$

$$l = 0,07 \text{ m} = 7 \text{ cm}$$

$$u = 70 \text{ kg/m}^3 \text{ béton}$$

$$\rho c = 2,210^6 \text{ J/m /}$$

La vitesse de déplacement du front décroît donc très vite avec la profondeur.

Son inverse, $\frac{dt}{dx}$ donne le temps de séjour à une profondeur donnée.

Enfin l'intégration $\int_0^x \frac{dt}{dx}$ donne le délai d'amenée du front, à la profondeur x, après le début de l'exposition aux gaz à 800°C (supposés constants ici pour simplifier).

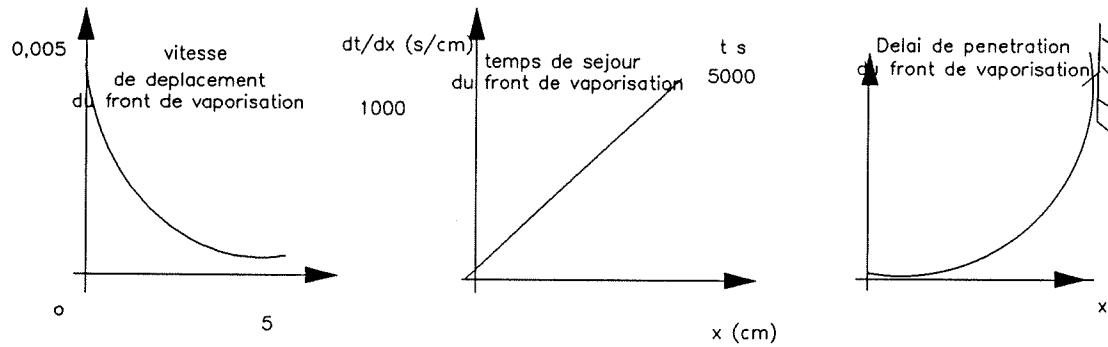
Le terme dû à l'évaporation proprement dite intervient pour environ 20 à 25 % dans la valeur de $\frac{dt}{dx}$ et donc pour la même proportion dans le délai de pénétration qu'il augmente ainsi de plus d'un quart d'heure sur une durée de l'ordre de l'heure.

La même analyse pour les matériaux à fort taux de gypse conduit à doubler du délai approximativement.

Les résultats expérimentaux ci-après sont cohérents avec cette analyse. Des modèles sophistiqués ont été établis (3) en vue notamment d'expliquer les éclatements du béton soumis à des sollicitations thermiques élevées. Les études sur lesquelles ils sont basés font apparaître des phénomènes complexes, où la perméabilité du béton varie fortement avec la température notamment.

3 (1) Voir Zdenek Basant & Werapol Thonguthai
"Pore pressure in heated concrete Walls - Theoretical prediction"
Magazine of Concrete Research - Juin 1979.

Cette variation n'est pas suffisante. Cependant, pour éviter la naissance de pressions suffisamment élevées pour être la cause des éclatements. Le gradient de pression tend à faire déplacer la vapeur vers la face exposée, le gradient de température vers l'autre face.



CHAPITRE III

3 AERAULIQUE

De nombreux aspects de l'évolution physique des incendies sont directement liés aux mouvements des fluides, gaz ou aérosols, qui alimentent la combustion, l'entretiennent, la propagent en développant des flammes à fort rayonnement thermique, puis répandent les produits de combustion dans le bâtiment.

3.1 CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS

Les écoulements au cours de l'incendie peuvent être classés d'une part en fonction des contraintes géométriques sur les mouvements du fluide (effets dits de frontière) et d'autre part en fonction de la nature des forces motrices dominantes :

Contraintes géométriques

Trois classes de contraintes suffisent pour décrire les principaux cas :

- . Le fluide peut être guidé totalement par passage forcé dans un conduit, dans une gaine ou à travers un orifice qui peut être une porte plus ou moins ouverte, une fenêtre, une bouche de ventilation, une interstice au niveau d'une huisserie, d'un joint etc.... Ces situations s'apparentent très directement à l'aéraulique courante.
- . Il peut n'être que partiellement guidé par certaines parois (fig.1) page suivante.
- circulation en nappe stratifiée, qui représente de nombreuses analogies avec les écoulements en canaux ouverts ou sur des surfaces horizontales ;
- circulation en couche limite en particulier dans les flammes produites par la combustion de parois solides verticales.
- . Enfin, le fluide peut se mouvoir librement sur une certaine distance. Les mouvements peuvent être extrêmement complexes mais, dans certaines conditions, si l'atmosphère est calme dans son ensemble, on observe le développement de colonnes ascendantes, en général, dont les caractéristiques sont très proches des panaches qui, par temps calme, surmontent les cheminées industrielles.

La combustion d'un objet en début d'incendie donne généralement lieu à ce genre d'écoulement. De même les panaches de fumée et les flammes jailissent par une fenêtre peuvent être rattachés à ce groupe.

Forces motrices

Dans les incendies, les forces qui font mouvoir les gaz sont dues à trois types de causes. Ce sont principalement :

- Les forces de gravitation qui, dû aux différences de masse volumique des gaz aux différents points du bâtiment, induisent des forces de poussée d'Archimède (Fig.2).

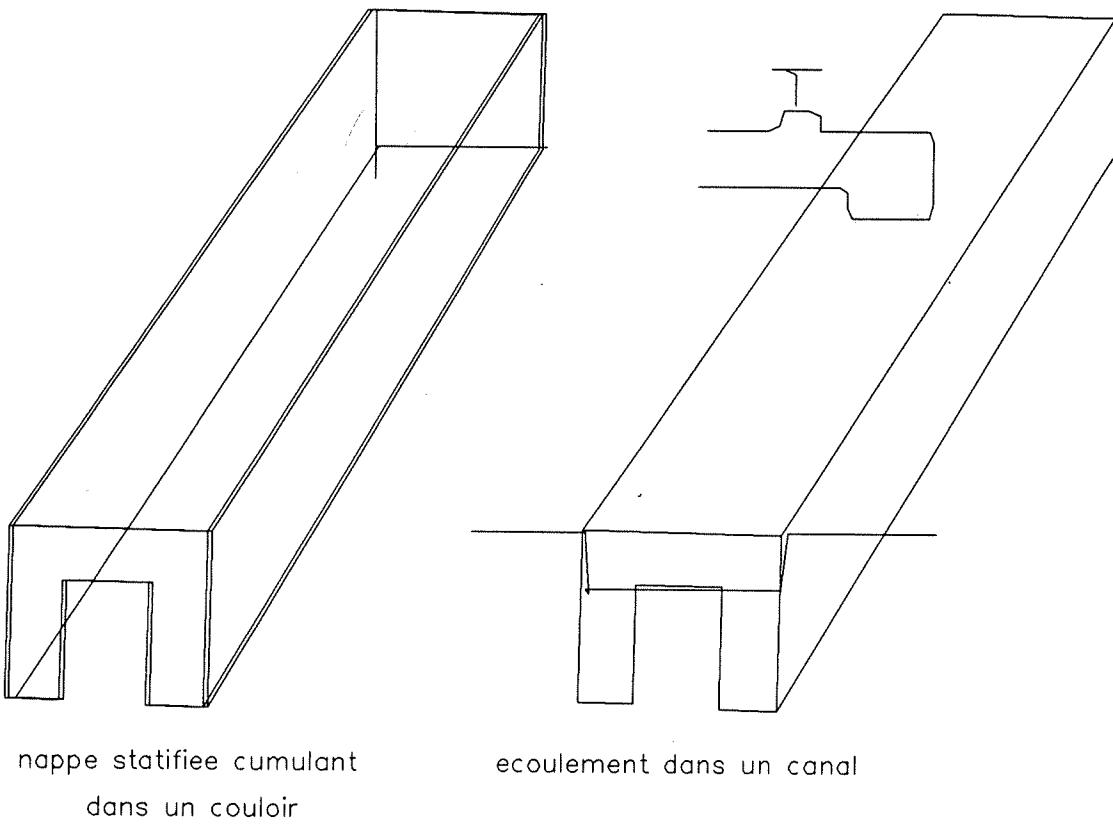


figure 1A

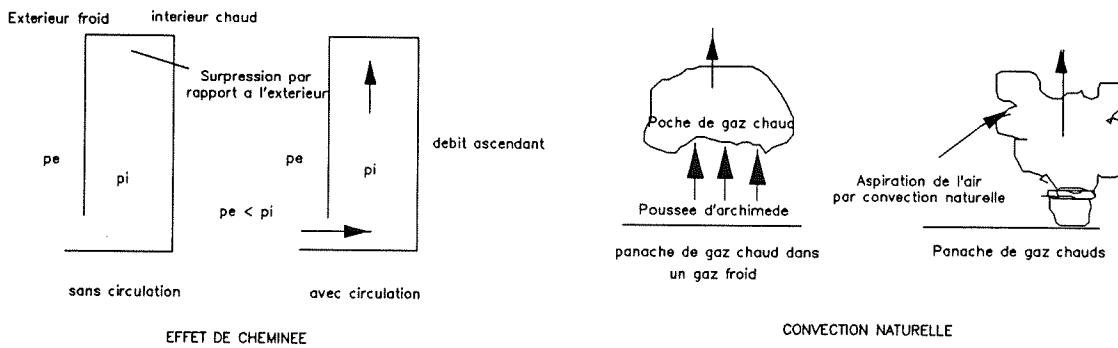
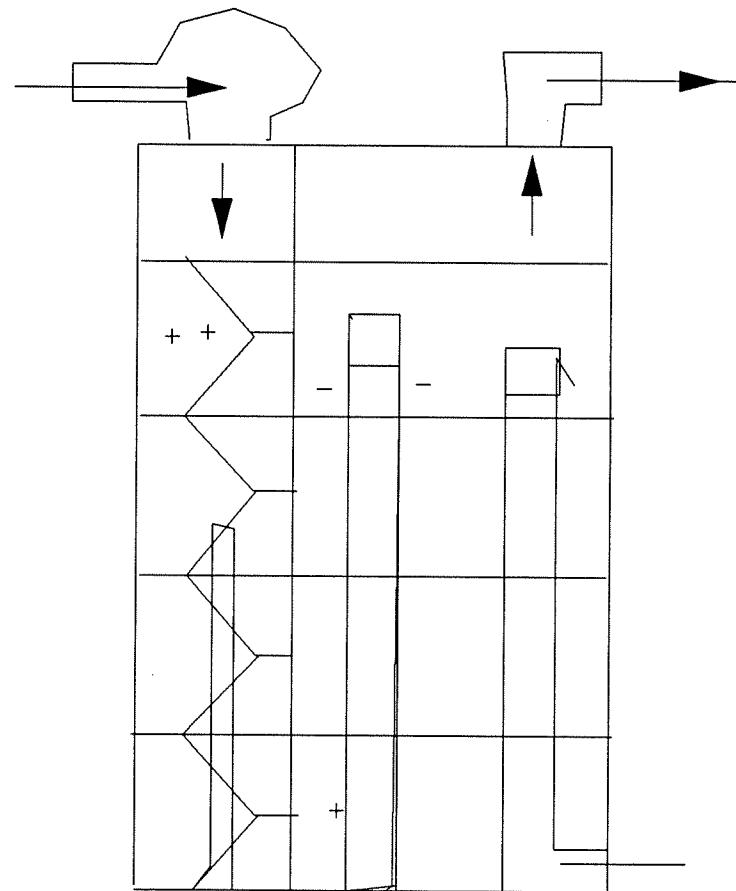


FIGURE 2

- Les dépressions ou surpressions introduites par les ventilateurs de ventilation mécanique ou de désenfumage (fig.3)



Depression et surpression
cree par la ventilation mecanique

FIGURE 3

- Les différences de pression que peut faire apparaître le vent entre les différentes parties de l'enveloppe extérieure du bâtiment.

A ces causes majeures, s'ajoutent dans certaines conditions des explosions (croissance très brusque de la température dans un local) et des surpressions très localisées que peut créer la dilatation empêchée des gaz en échauffement très rapide.

3.2 LES MODELES, LES REPRESENTATIONS, LES LOIS

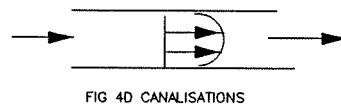
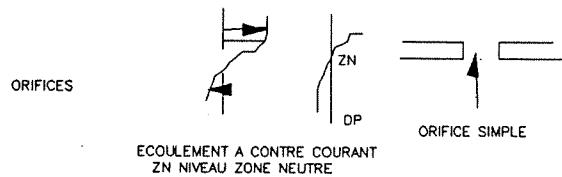
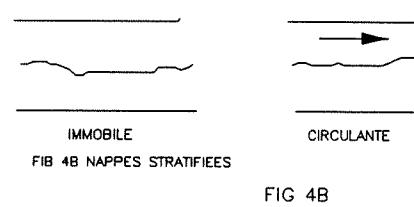
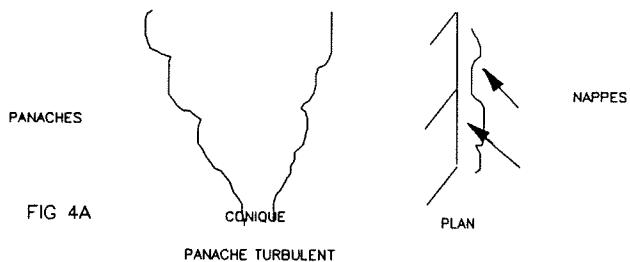
L'analyse des différents écoulements de gaz induits par un incendie et par les moyens de contrôle mis en oeuvre, est faite au moyen de représentations simplifiées issues d'une analyse systématique de l'ensemble.

Le problème d'ensemble se subdivise en problèmes élémentaires qui sont résolus en utilisant des modèles simples.

Les lois de ces modèles sont ensuite combinées pour décrire l'ensemble du phénomène ; à ce niveau le développement des méthodes de calcul automatique est un auxiliaire précieux.

Les modèles élémentaires peuvent être classés dans quatre groupes (fig. 4a à d) ;

- . groupe des écoulements en panache,
- . groupe des nappes stratifiées,
- . groupe des écoulements à travers des orifices, qui se sépare en deux sous-groupes,
- . groupe des écoulements en canalisation.



Les lois qui décrivent ces différents écoulements se différencient sur certains points mais présentent par contre quelques caractéristiques communes.

3.3 VARIATIONS DE LA MASSE VOLUMIQUE DES GAZ ET FUMEES

En pratique, les masses volumiques des fluides, gaz ou aérosols, suivent avec une bonne approximation, les lois des gaz parfaits isobares ; la masse volumique locale ρ est liée à la température absolue du gaz T par :

$$\rho T = \text{constante} (\text{ kg } m^{-3} K)$$

Cette relation simple remplace avantageusement l'équation d'état complète du fluide.

En fait, comme les gaz d'incendie sont issus de combustion dans l'air, où l'azote reste à peu près inerte, et qu'ils sont ensuite dilués par de l'air, il est même possible de prendre comme valeur de la constante celle relative à l'air à la pression atmosphérique locale P_0 . Si cette dernière est exprimée en millibar :

$$\rho T = 0,3485 P_0 \text{ kg m}^{-3} K$$

Il est clair que les phénomènes ne peuvent généralement pas être décrits par ce qu'il est convenu d'appeler la mécanique des fluides incompressibles où l'on suppose la masse volumique ρ constante.

3.4 CARACTERE TURBULENT DES ECOULEMENTS

L'écoulement d'un fluide est parfois très fortement influencé par les forces de frottement internes qui s'y manifestent. Ces forces de cisaillements sont d'une part liées à ce que l'on appelle la viscosité du fluide et d'autre part à la structure fine de l'écoulement.

La viscosité est représentée par l'un ou l'autre des deux coefficients de viscosité :

. Coefficient de viscosité dynamique η ($1 \text{ kg/m/s} = 1 \text{ déca poise}$)

. Coefficient de viscosité cinématique : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ ($\text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ stockes}$)

Vers 20°C, on peut admettre pour les fumées et gaz d'incendies :

$$\eta_{20^\circ C} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

et

$$\nu_{20^\circ C} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

ainsi que les lois approchées

$$\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{293} \right)^{0.8} \text{ T en kelvin}$$

$$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{293} \right)^{1.8}$$

Les écoulements, dans une configuration géométrique donnée, présentent des caractéristiques très différentes selon les valeurs respectives de deux facteurs qui sont :

Le flux de quantité de mouvement convecté ρu^2

Les forces moyennes de cisaillement $\nu \frac{u}{L}$

où u est une caractéristique de l'écoulement et L une dimension caractéristique.

le quotient sans dimension :

$$R_e = \frac{\rho u^2 L}{\nu} = \rho u \frac{L}{\eta} = u \frac{L}{\nu}$$

introduit par Reynolds permet de différencier les écoulement guidé qui nous concernent (conduits, orifices).

Dans ces configurations, la transition laminaire/turbulent se situe dans le domaine des valeurs 2000 à 10000. Au-delà de $R_e = 10000$ l'écoulement est nettement turbulent.

Les valeurs de L, diamètre de conduit ou dimension moyenne d'une ouverture, sont généralement supérieures à 0,2 m pour des vitesses de passage moyenne de l'ordre de 3m/s à la température ambiante, ceci conduit à majorer le nombre de R_e selon :

$$r_e \geq 0,810^8 T^{-1,3} \text{ pour } T = 1000 \text{ K } r_e \geq 10^4$$

Dans les écoulements verticaux libres, la vitesse moyenne du fluide dépend beaucoup de la hauteur ainsi que de la dimension caractéristique de l'écoulement. Il est alors parfois plus aisés de caractériser l'écoulement au moyen d'un autre nombre connu sous le nom de "nombre de Grashof" :

$$Gr = \frac{\rho g L^3 \Delta \rho}{\eta^2}$$

L est la hauteur d'écoulement considéré,

ρ est la masse volumique du fluide qui s'écoule,

$\Delta \rho$ l'écart de masse volumique avec le fluide ambiant où se développe l'écoulement, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

On admet que l'écoulement est turbulent si ce nombre est supérieur à 10^9 ; avec des ordres de grandeur réalisables en utilisant les formules précédentes pour ν , on obtient :

Pour des flammes (900°) : $Gr = 1,510^9 L^3$

Pour des fumées diluées (50°C): $Gr = 710^9 L^3$

L'hypothèse d'écoulement turbulent est donc valable pour des parcours verticaux supérieurs à 0,5m en général. Sur le plan qui intéresse l'incendie, il y a assez peu d'intérêt pratique à prendre en considération le détail des situations où les conditions précédentes ne sont pas remplies.

3.5 L'INCENDIE ET LES CHAMPS DE PRESSION DANS LES BATIMENTS

Il existe donc dans les bâtiments des champs de pression à l'état normal dûs aux forces de poussées d'Archimède, à la VMC, au vent.

D'une part, et en dehors d'éventuels ventilateurs de désenfumage, l'incendie est susceptible de les modifier profondément dès lors que certains volumes sont envahis par des gaz chauds : le tableau ci-après donne les variations par mètre de hauteur de la pression due au tirage thermique selon l'élévation de température des gaz chauds :

θ Gaz chauds°C	$\frac{\Delta P}{\Delta Z}$	Pascal
30		1.08
100		2.95
500		6.9

D'autre part, des faibles différences de pression sont suffisantes pour induire des débits de gaz importants.

Avec $\Delta P = 10$ Pa, le débit massique d'air à 20°C à travers un orifice de 1 m² est de 3,4 Kg/sec (N 2,85 m³/s) ce qui correspond à une vitesse de 4m/s dans la veine contractée.

Par ailleurs, ces champs de pression à l'état normal, gouvernent la circulation des fumées froides et peuvent donc être importants à considérer dans les débuts d'incendie du point de vue de la détection. Il faut bien voir cependant qu'un champ de pression est un résultat "dynamique" lié à l'état des communications entre volumes du bâtiment (pertes de charges). Il est donc éminemment variable, non seulement en fonction des conditions climatiques extérieures, vent et température, des ventilateurs en fonctionnement, mais aussi en fonction de l'état d'ouverture des portes et fenêtres etc...

3.6 ZONE NEUTRE

Pour toute communication entre deux volumes et pour un champ de pression donné, il existe une hauteur Z_n , ou zone neutre, où les pressions sont égales ($\delta P = 0$). Cette zone neutre peut être soit en dehors de la communication, les gaz circulent alors dans un seul sens, soit dans la hauteur de la communication, il y a alors double échange de masses gazeuses.

Les différences de pression peuvent s'écrire :

$$\Delta P_a = \Delta \rho g (Z - Z_n)$$

3.7 LES LOIS SPECIFIQUES DES DIVERS TYPES D'ECOULEMENT

Les différents types d'écoulement ont été modélisés avec des degrés de précision assez peu homogènes.

Les écoulements forcés en conduits et à travers des orifices sont les mieux connus ; les écoulements à contre courant avec zone neutre qui se rattachent aux écoulements à travers des orifices ont été moins étudiés mais leur modélisation a atteint un niveau de précision généralement suffisant pour les applications en sécurité incendie.

Les écoulements en panaches ont été très étudiés dans des conditions qui s'éloignent un peu de celles de l'incendie et de grosses incertitudes subsistent quant à la valeur d'un coefficient dont le rôle est fondamental en pratique, que l'on qualifie de coefficient d' entraînement.

Les écoulements en nappes stratifiées ne posent pas de problèmes majeurs quant aux phénomènes stationnaires mais la propagation du front de la nappe est encore assez mal cernée en général.

Nous développerons donc que très succinctement ce qui concerne les écoulements forcés dans les conduits et au travers des orifices en pression constante.

Ces écoulements, turbulents, sont décrits dans tous les ouvrages de mécanique des fluides et d'aédraulique. Un résumé très complet comportant un grand nombre de données numériques pratiques sont rassemblés dans l'ouvrage ⁴

3.8 PERTES DE CHARGES DANS LES CONDUITS ET ORIFICES - COEFFICIENT DE CHARGE

Perte de charge singulière

Pour une conduite (un orifice) de section A une modification de parcours : coude, piquage, embouchure, grille, etc... introduit une chute de pression

$$\Delta P = \xi \frac{1}{2} \rho u_m^2$$

ρ : masse volumique du fluide (incompressible)

u_m : vitesse moyenne définie par

$$u_m = \frac{m}{\rho A} \left(\frac{\text{débit en volume}}{\text{section}} \right)$$

ξ : coefficient de perte de charge tabulé en fonction des configurations

Perte de charge linéique

Diamètre hydraulique d'un conduit

$$D_H = \frac{4 * A}{P}$$

⁴ I.E IDEL'CIK (Mémento des pertes de charges - Ed. Eyrolles 1969 Paris).

Perte de charge pour une longeur L de conduit rectiligne

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D_H} \frac{1}{2} \rho u_m^2$$

A:section droite P:périmètre

λ : coefficient de perte linéique.

Ce coefficient qui varie normalement avec le débit est en fait indépendant de ce dernier au-delà d'une certaine valeur (régime pleinement turbulent)

Dans les problèmes de désenfumage, c'est toujours cette valeur limite indépendante du débit qui est utile.

Ordres de grandeurs

Conduit "lisse" (tole) $\lambda \approx 0,005$

Conduit "rugueux" Brique $\lambda \approx 0,05$

Le symbole ξ_L est en fait le coefficient de perte de charge du ξ du tronçon rectiligne.

Perte de charge du conduit : on fait la somme des coefficients de perte de charge

$$\xi_{total} = \xi_L + \sum_i \xi_{si}$$

Perte de charge et coefficient de décharge d'un orifice

L'équation de décharge :

$$m = C A \sqrt{2\rho \Delta P}$$

peut s'écrire

$$\Delta P = \frac{m^2}{C^2 A^2} \frac{1}{2\rho}$$

or par définition

$$u_m = \frac{m}{\rho A}$$

donc

$$\Delta P = \frac{1}{C_2} \frac{1}{2} \rho u_m^2$$

Ce qui fait apparaître l'équivalence entre $\frac{1}{C_2}$ et le coefficient ξ de l'orifice.

Pour un orifice : $\xi = \frac{1}{c^2}$

Alternativement, pour un conduit de coefficient de perte de charge ξ_{total} la variation de pression ΔP s'écrit

$$\Delta P = \xi_{total} \frac{1}{2} \rho u_m^2$$

soit avec $\frac{m}{\rho} A = u_m$

$$m = \frac{1}{\sqrt{\xi_{total}}} A \sqrt{2\rho \Delta P}$$

$\frac{1}{\sqrt{\xi_t}}$ joue le rôle d'un coefficient de décharge.

Orifice équivalent à un conduit $C = \frac{1}{\sqrt{\xi_t}}$

Le groupe $\frac{A}{\sqrt{\xi_{total}}}$ porte le nom d'ouverture aéraulique du conduit : c'est l'aire d'un orifice parfait équivalent.

3.9 CAS DES INFILTRATIONS DANS LES INTERSTICES

Ce qui précède ne peut être utilisé si l'écoulement à travers l'orifice ne peut plus être considéré comme turbulent et si l'orifice n'a pas des parois très minces.

Les infiltrations autour des portes ou dans les fissures sont dans cette catégorie.

La dimension transversale de l'écoulement (épaisseur de l'interstice) est alors négligeable devant la longueur du parcours à effectuer. Le nombre de Reynolds est alors généralement inférieur à 2000 et l'écoulement est laminaire. Dans ce cas le débit est proportionnel à la différence de pression et inversement proportionnel au trajet parcouru.

On retient dès lors la loi de perte de charge de débit

$$Q_v = K * \Delta P$$

ou

$$Q_m = K \rho \Delta P$$

K est déterminé expérimentalement en général.

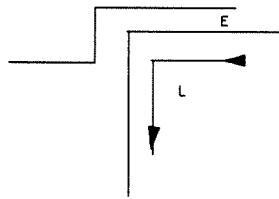


FIG 6 ECOULEMENT DANS UN INTERSTICE

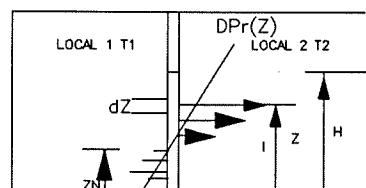
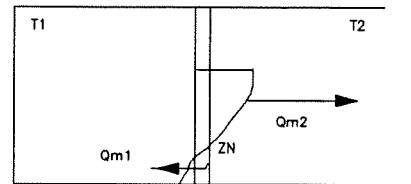
T₁ > T₂ la porte est la seule ouverture du local 1

FIG 7 ECOULEMENT STRATIFIÉ DANS UNE PORTE

3.10 ORIFICES SITUÉS DANS DES GRADIENTS DE PRESSION RELATIVE

Le cas général est très compliqué. L'approche d'un cas simple est présenté ici.

3.10.1 Ouverture verticale (porte) entre deux volumes à température uniformes.(fig7)

La pression relative entre les deux volumes est donnée dans ce cas par :

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1)g(Z - ZN) \quad (\rho_2 > \rho_1)$$

L'application du théorème de bernoulli à la cote Z sur une tranche de hauteur dZ conduit au profil de vitesse représenté, donné par :

$$|W(Z)| = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_i}}$$

Donc pour Z < ZN

$$|W(Z)| = \sqrt{\frac{2(\rho_2 - \rho_1)g}{\rho_2}} * \sqrt{(ZN - Z)}$$

$$|W(Z)| = \sqrt{\frac{2(\rho_2 - \rho_1)g}{\rho_1}} * \sqrt{(Z - ZN)}$$

Dans ces expressions, par intégration selon la verticale, on déduit les débits massiques Qm1 et Qm2 :

$$Qm1 = \frac{2}{3} C \sqrt{2\rho_2 (\rho_2 - \rho_1)g} LZN^{\frac{3}{2}}$$

$$Qm2 = \frac{2}{3} C \sqrt{2\rho_1 (\rho_2 - \rho_1)g} L(h - ZN)^{\frac{3}{2}}$$

C : coefficient de décharge (C = 0,65 à 0,7

L : largeur de la porte (ou fenêtre)

Ces relations ne sont valables que si les conditions : 0 < ZN < h sont remplies.

La méthode peut être généralisée aux différents cas ZN < 0 ; ZN > h, etc...

Dans l'exemple choisi où

T₁ > T₂ (d'où ρ₂ > ρ₁ les gaz chauds quitte le local 1.

La hauteur de la zone neutre dépend de l'existence d'autres ouvertures dans le local 1 et des champs de pression de l'ensemble autour de ces locaux dans le bâtiment.

Une relation utile pour situer les ordres de grandeur, est obtenue en supposant que la porte considérée est la seule ouverture du local 1. Dans ce cas $Qm_1 = Qm_2$ si aucune source de gaz n'existe dans le local ; ceci conduit à l'expression :

$$ZN = \frac{h}{1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{3}}} = \frac{h}{1 + \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

et fournit pour le débit d'échange $Qm = Qm_1 = Qm_2$

$$Qm = CL h^{\frac{3}{2}} \rho_2 g^{\frac{1}{2}} \frac{\left(1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{3}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

La figure 8 montre que dans les conditions d'un incendie développé dans le local 1 les valeurs de ZN et Qm sont en fait peu sensibles à la valeur T_1 de la température dans le local sinistré. Prenant $T_2 = 293 K (20^\circ C)$, ceci conduit à une estimation de Qm par :

$$Qm = 1800 L h^{\frac{3}{2}} = 1800 A \sqrt{h} kg/h$$

ou

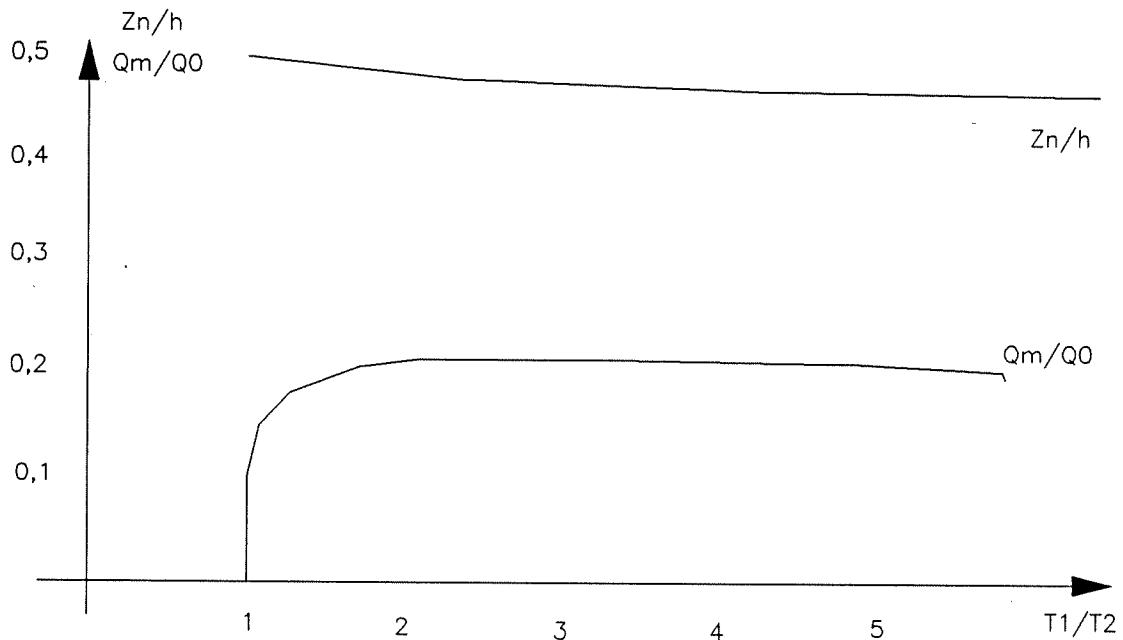
$$Qm = 0,5 A \sqrt{h} kg/S$$

A : Surface de l'ouverture

Si l'on applique ce qui a été dit en I-1-2 de la présente partie concernant la chaleur de combustion par gr d' O_2 , on voit que la puissance du foyer est au maximum d'environ $1,54 A \sqrt{H}$ mégawatt, les puissances effectives sont un peu inférieures.

Notons aussi que cela correspond bien à la règle expérimentale de KAWAGOUE et SEKINE qui pour les feux de bûchers donne un taux de combustion de $5,5 A \sqrt{H} kg$ de bois par minute.

Le débit volumique de fumée et gaz chauds émis par le local 1 est donné par :



$$Q_v + \frac{Qm}{\rho_1}$$

avec une valeur typique $T_1 = 800^\circ C = 1073^\circ K$, on obtient

$$Q_v = 1,5 A\sqrt{h} m^3/s$$

Exemple : $L = 1 \text{ m}$ $h = 2 \text{ m}$ $q_v = 4,2 m^3$ à $800^\circ C$

En 10 s, un volume de gaz chaud équivalent au volume moyen d'une pièce d'habitation est émis hors du local.

Ces gaz emportent une quantité d'énergie donnée par une première approximation

$$W = Q_m (T_1 - T_2) KW = 800 Q_m$$

Dans l'exemple choisi, la puissance calorifique convectée est un peu supérieure à un mégawatt ; cette situation, ventilation et puissance convectée, correspond sensiblement à 2 Mw qui est une valeur typique d'un feu violent dans une pièce d'habitation (feu "développé").

3.10.2 Ecoulement en panache

Ces écoulements verticaux non guidés ont été beaucoup étudiés dans des conditions qui s'éloignent un peu de celles de l'incendie en particulier par les ordres de grandeur des variations de masse

volumique. La diffusion des panaches polluants dans l'atmosphère, ainsi que dans les couches superficielles des océans et des lacs met en jeu des phénomènes que l'on retrouve à plus petite échelle au cours des incendies, dans les mouvements de fumées.

Certains travaux dans le domaine de la combustion sont orientés vers les propriétés des flammes de diffusion verticales où les phénomènes de mélanges turbulents à la périphérie de la flamme jouent un rôle dominant. La majorité des combustions vives dans les incendies se font au sein de telles flammes de diffusion turbulentes.

Certains détails des théories correspondantes peuvent être trouvés dans les publications bi-annuelles relatives aux Symposiums du Combustion Institute et, en ce qui concerne les panaches sans phénomènes de combustions que l'on désigne en général par le tenu de panaches thermiques dans l'ouvrage de BRIAN, SPALDING et AFGAN (5).

Seules les grandes lignes de l'interprétation de ces phénomènes, quelques lois approximatives et des ordres de grandeur figurent ici.

3.10.3 Les panaches thermiques

Ces panaches se développent verticalement à partir d'une source dont le périmètre est à priori quelconque.

Les phénomènes dominants, force ascensionnelle dûe aux différences de masse volumique et entraînement turbulent de l'air environnant sont identiques, mais, les variations des débits, vitesse et température en fonction de la cote h au dessus de la source dépendent des proportions géométriques de celle-ci. Deux cas limites de cette géométrie de source ont été très étudiés, il s'agit des sources circulaires (à la limite ponctuelle) et des sources rectilignes de grande longueur par rapport à leur largeur (à la limite linéaire de longueur infinie).

3.10.4 Caractéristiques communes

Dans un souci de simplification, les profils de vitesse et température dans les panaches sont ignorés ici au profit des grandeurs moyennes sur la section à la côte h .

Une tranche de gaz d'épaisseur δh et de volume δV est soumise à une force ascensionnelle (fig 10).

$$\delta F = (S_0 - S)g \delta V$$

5 D.BRIAN SPALDING, N.AFGAN - Heat transfer and turbulent buoyant convection Hemisphère Publishing Co Mc Graw Hill 1977

Cette force n'accélère pas à l'ascension du volume δV , mais entraîne, par turbulence, à la périphérie du panache, une certaine quantité d'air frais qui vient diluer les gaz chauds dont la température diminue par conséquent.

Contrairement à une opinion répandue, le panache de gaz chaud ne se dilate pas au sens courant de ce terme, mais grossit en se refroidissant.

L'expérience montre que, dans certaines limites de différence de température avec l'ambiance, la section méridienne d'un tel panache est un secteur angulaire ; la "largeur" du panache croît donc linéairement avec l'altitude.

Il est commode d'introduire une "source virtuelle" (fig.10) ponctuelle ou linéaire située à une distance d sous la source réelle. En fonction de la côte Z repérée à partir de cette origine, les lois d'évolution des débits Q_m , vitesse moyenne et température moyenne dans le panache s'expriment simplement.

Les principales caractéristiques de lois d'évolution du débit massique, de la vitesse moyenne ascensionnelle et de la température apparaissent sur la figure 10.

La loi commune $Q_m (\bar{T} - T_0) = \text{constante}$

traduit la conservation de la chaleur dans le panache quand on peut négliger les pertes radiatives. On doit remarquer la dépendance quadratique de Q_m par rapport à Q ou Q' . L'incertitude de 50 à 100% sur ces paramètres entraîne donc des incertitudes considérables sur Q_m et $T - T_0$.

En règle générale, les panaches issus de sources de forme irrégulière, en particulier plus ou moins allongées, peuvent conduire à des évolutions telles que

$$Q_m \sim Z^m \quad 1 \leq m \leq \frac{5}{3}$$

$$W_m \sim Z^n \quad -\frac{1}{3} \leq m \leq 0$$

avec

$$Q_m (\bar{T} - T_0) = \text{constante}$$

Il faut être prudent dans l'utilisation d'une loi hors de son domaine strict. En particulier, la proximité d'une paroi verticale, feu au pied d'une cloison ou dans un coin, diminue considérablement les possibilités d'entrée d'air dans le panache ce qui a pour effet de ramener la valeur 1.

En ce qui concerne l'application de telles lois à la sécurité, en l'absence d'une étude expérimentale spécifique, on peut recommander deux approches selon le problème posé.

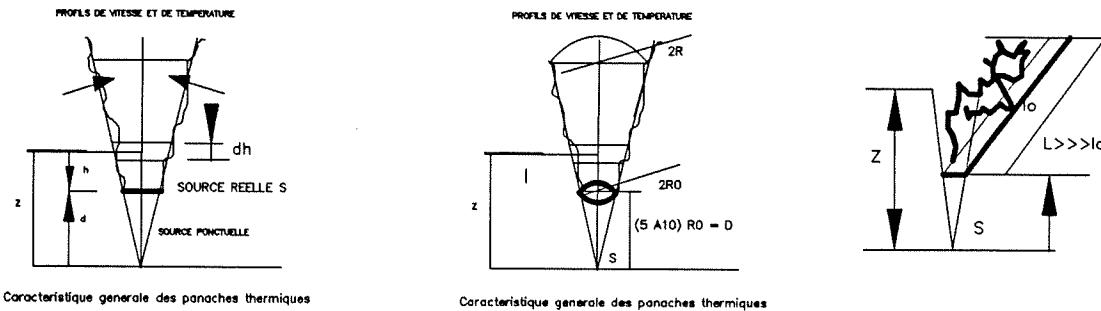


FIG 10 Principales propriétés des panaches linéaires et circulaires

3.10.4.1 Approche désenfumage

S'il s'agit de prévoir des conditions de désenfumage : volume de fumée à extraire, et température de ces fumées. Il est prudent d'utiliser une loi relative aux sources circulaires qui maximise la quantité de fumée et minimise sa température.

P.L. HINKLEY⁽⁶⁾ propose pour le désenfumage une loi approchée qui donne une estimation du débit massique Qm au dessus d'un feu de périmètre P quand on se place à une côte h au-dessus de la base du feu :

Dans le cas d'une source grossièrement circulaire due à un feu de puissance W sur une surface A , une estimation peut également être faite par :

$$Qm = \frac{W}{800} \left(1 + \frac{h}{\sqrt{A}} \right)^{\frac{5}{3}}$$

$$W : kw, A : m^2, h : m, Qm : kg/s$$

La température des gaz peut être déduite de la dernière relation par :

$$(\bar{T} - T_0) = 800 \left(1 + \frac{h}{\sqrt{A}} \right)^{-\frac{5}{3}}$$

3.10.4.2 Approche structures

Il peut arriver que le problème posé contienne un terme de stabilité au feu d'un élément de structure exposé au courant de gaz chauds d'un panache.

Il faut dans ce cas être prudent quant à l'évolution de la température du gaz au niveau de l'élément considéré.

6 (1) HINKLEY P.L. Building Research Establishment Current Paper 83/75 - Boorehamwood 1975
U.K.S

Il faut distinguer dans le panache des zones de flammes puis de fumée (figure11).

La zone h où $h < h_f$, flamme

La zone H où $h > h_f$, panache thermique

La hauteur de flamme varie beaucoup avec la nature du combustible, la forme du foyer et la vitesse de combustion. Dans toute cette zone, la température moyenne des gaz varie peu avec h. Elle avoisine 800°C en valeur moyenne avec de forts écarts (jusqu'à 1300°C) en certains points, ce qui est caractéristique des flammes de diffusion. P.THOMAS a mesuré les hauteurs de flammes.

Au-delà de cette hauteur h, on peut, par mesure de sécurité, admettre que la température maximale au centre du panache de gaz suit les lois des panaches linéaires.

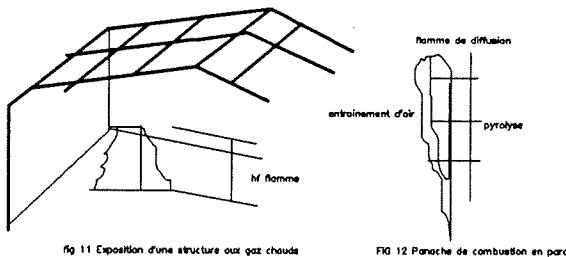
Une estimation peut être faite par une règle approchée par excès:

$$T_m - T_{ro} = 3000 \frac{h_f + 1,5\sqrt{A}}{h} \quad (h > h_f)$$

A : m² surface de feu.

3.10.5 Les combustions pariétales sur parois verticales

Les flammes de diffusion (figure12) présentent sur le plan aéraulique des analogies avec les panaches issues de sources linéaires. Elles font l'objet de travaux très élaborés qui semblent montrer qu'il est difficilement admissible de leur appliquer les lois simples d'entraînement d'air comme celles prévalant dans les panaches de gaz chauds non guidés.



3.10.6 Ecoulements en nappes stratifiées

Ces écoulements présentent une analogie très étroite avec les écoulements en nappes que l'on rencontre dans la géophysique marine. Trois types de situation sont utilisés dans l'approche de la sécurité incendie :

- . Nappes stratifiées stagnantes (problème de stabilité)
- . Nappes en écoulement stationnaire dans un couloir (stabilité)
- . Propagation du front d'une nappe sous un plafond.

Les deux premières situations, hormis le problème de la stabilité, sont parfaitement analogues à celles de l'hydraulique des bassins et des canaux à écoulements lent.

Néanmoins, alors que le remplissage ou la décharge d'un bassin au niveau d'un réservoir par exemple, s'effectuent avec conservation du volume du fluide, puisque l'eau et l'air ne se mélangent pas de façon stable, les décharges de fumées à travers un panache vertical ou une embrasure de porte s'accompagnent des phénomènes de mélange et d'entraînement décrits précédemment ; ce détail est très important et conduit à l'une des principales règles du désenfumage : chaque fois que la fumée s'écoule dans un panache son volume augmente ce qu'il faut éviter le plus possible.

Les vitesses de remplissage ou de décharge (débits de fumées) peuvent être estimées au moyen des techniques décrites précédemment pour le calcul des débits de panaches ou des débits de passage dans les ouvertures ou écoulements stratifiés.

Dans l'exemple schématisé sur la figure 13, le débit Q_1 , qui entre par le panache dans la nappe de fumée du local est d'autant plus grand que Q_1' est plus grand. Par contre, le débit Q_1' de "débordement" du local vers le couloir croît quand h_1 diminue. On conçoit donc bien qu'il existe une valeur d'équilibre quasi stationnaire fonction d'une part des dimensions et de la puissance du foyer et d'autre part des caractéristiques de la porte. Le calcul de h^* est en fait assez compliqué car la valeur de h_1 joue également sur la température des nappes ce qui influence en retour les débits.

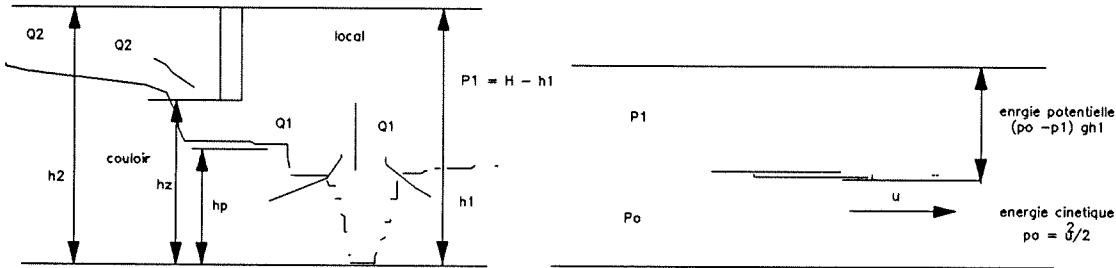


Fig 13 Ecoulement en nappe

Fig 14 Stabilité des nappes

Le débit de décharge Q_1' donne lieu à un court panache où la fumée se dilue en général dans un rapport de 2 à 5 fois

$$Q_2 = 2 \text{ à } 5 \text{ fois } Q_1'$$

La valeur de ce facteur est fortement influencée par l'épaisseur e_2 de la nappe qui circule dans le couloir. La valeur de e_2 dépend des conditions d'évacuation du couloir lui-même.

Deux problèmes importants sont encore non résolus dans ces phénomènes. Il s'agit de la stabilité des nappes stratifiées et de la vitesse de progression des fronts de nappe.

3.10.6.1 Stabilité d'une nappe stratifiée :

Il est clair qu'une nappe de fumée peut être destabilisée par une agitation suffisamment énergique.

L'arrosage automatique par des gicleurs, une arrivée d'air frais avec une vitesse trop grande qui induit des turbulences avec une énergie suffisante, l'effet du vent, et même une vitesse de combustion très élevée comme celle qui apparaît peu après l'inflammation simultanée de plusieurs objets au cours d'un feu dans un local d'habitation sont autant de facteurs de destabilisation des nappes.

La stabilité est, semble-t-il, directement liée aux valeurs relatives de l'énergie cinétique turbulente introduite par l'écoulement d'air perturbant et de l'énergie potentielle de stratification.

Avec les notations de la figure 14, le quotient

$$R_i = \frac{(\rho_0 - \rho_1) g h_1}{\rho_0 u^2}$$

que l'on désigne généralement par le nom de "nombre de Richardson Global", est un critère d'équilibre local intéressant.

L'équilibre local de la nappe est rompu si $Ri = 1$ environ, ce qui pour une nappe à 100°C de 1 m d'épaisseur conduit à une vitesse maximale U^* de l'ordre de 1,4m/s (figure15).

Il serait en effet possible de dépasser cette valeur en faisant en sorte de créer une turbulence réduite au moyen de dispositifs d'aménée d'air convenables.

3.10.6.2 Propagation d'un front de nappe sous un plafond

Ce phénomène qui peut jouer un rôle très important dans l'efficacité de la détection de fumée n'a pas été très étudié dans le cadre de la sécurité incendie.

En ce qui concerne les problèmes de détection, La Factory Mutual Research Corporation a fait une étude expérimentale à laquelle le lecteur intéressé pourra se référer avec profit (1 page suivante).

L'approche de ce problème peut être faite au moyen de corrélations entre la vitesse des ondes de très grande largeur d'onde à la surface séparant deux fluides de masse volumique ρ_1 et ρ_2 .

Avec les notations de la figure 15, cette vitesse U_0 vaut

$$U_0 = \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}} g \sqrt{h_1}$$

La grandeur

$$g' = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} g$$

est une accélération de gravité apparente dont l'analogie dans la circulation d'une nappe de fumée est représentée sur la figure 16.

La vitesse V de propagation du front de nappe est reliée aux caractéristiques de la nappe par l'équation approchée :

$$V = k \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 g} \right)^{1/2} h_1^{1/2}$$

où k est probablement voisin de 0,5 ; mais il faut se situer dans cet intervalle $0,1 < k < 1$

La valeur de cette constante k n'a pas encore été systématiquement mesurée pour les nappes de fumée.

Il faut noter que la vitesse V est du même ordre de grandeur que la vitesse critique de stabilité de la même nappe.

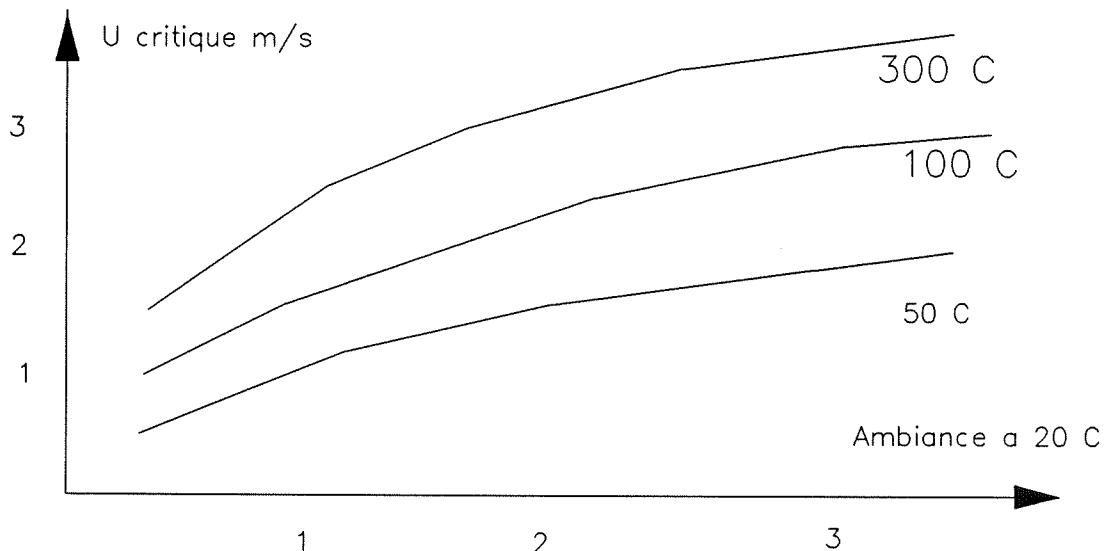


Fig 15 rupture de stabilité d'une nappe stratifiée

Estimation des vitesses critiques

CHAPITRE IV

4 MODELES DE SIMULATION INCENDIE

Les modèles de calculs sont de simples programmes de calculs qui simulent ou modélisent un processus ou un phénomène. Les modèles de calcul ont été utilisés pour l'analyse et le "désign" des matériaux de protection incendie. L'utilisation de modèle de calcul, connu communément comme programme de désign, est devenu une méthode standard de l'industrie pour la définition des installations d'eau et pour les systèmes d'extinction automatiques. Ces programmes réalisent une grande variété de calculs longs et fastidieux, et fournissent des résultats précis, ils permettent aussi une optimisation de coût de fabrication

En plus de la fabrication du matériel de protection contre l'incendie, les modèles de calcul peuvent aussi être utilisés pour évaluer les effets du feu sur les personnes et les biens. Ces modèles de simulation d'incendie peuvent produire des estimations plus rapides et plus précises de l'impact du feu, et donner des mesures à utiliser pour prévenir et contrôler le feu, aussi bien que les méthodes utilisées antérieurement. Alors que les méthodes de calcul manuelles fournissent de bonnes estimations sur les effets spécifiques du feu telles que la prédiction des temps de pré-embrasement, ils ne conviennent pas bien pour une analyse complète impliquant les inter-actions dépendantes du temps pour les processus physiques et chimiques multiples présents dans le développement du feu.

Dans un passé récent une attention croissante a été apportée dans le développement et l'usage des modèles de simulation incendie. Ils ont été utilisés par les ingénieurs et les architectes pour la construction des buildings, par les fonctionnaires de la construction pour la révision des plans, par les services de planification de lutte contre l'incendie, par les enquêteurs pour l'analyse après les incendies, par les groupes écrivant les codes sur le feu, par les fabricants de matériel, par les chercheurs sur le feu, et enfin pour la formation. Tandis que ces modèles ne sont pas une substitution pour la construction et les règles de sécurité; ils peuvent être des outils intéressants pour les professionnels de l'incendie.

L'état de l'art pour la définition des modèles de calcul évolue rapidement. La compréhension des processus impliqués dans l'évolution du feu s'améliore et ainsi les techniques de bases pour les modèles s'améliorent-ils. Les possibilités d'un modèle, la documentation, et le support pour un modèle donné évoluent très rapidement dans le temps . De plus l'évolution tant matérielle que logicielle est très rapide. Il y a quelque temps un calculateur assez puissant était indispensable pour la plupart des logiciels de simulation incendie, mais aujourd'hui, compte tenu de l'évolution matérielle très rapide, un nombre croissant de modèle fonctionne sur des microcalculateurs. Nous allons à présent préciser les caractéristiques principales des différents modèles.

En général, les modèles de simulation incendie pour la prédiction des dangers liés aux incendies, peuvent être groupés en deux catégories :

les modèles de simulation dans les enceintes

les modèles de simulation particuliers.

4.1 MODELES DE SIMULATION DANS LES ENCEINTES

Des avancées significatives sont apparues dans le développement des modèles de calcul structurés pour la prédiction des interactions multiples dans le processus du feu entraînant le transfert de chaleur, la mécanique des fluides et la combustion chimique apparaissant simultanément dans les enceintes. Ces modèles fournissent des estimées sur les éléments particuliers de développement du feu tels que la croissance, l'élévation de température et la génération et le transport de fumée. Quelques uns sont capables de simuler plusieurs pièces tandis que d'autres ne simulent que la pièce à l'origine du feu. Généralement, le grand nombre d'expressions mathématiques devant être résolues simultanément dans certains de ces modèles nécessite l'utilisation d'un calculateur.

Il y a deux grandes classes de modèles de simulation pour analyser le développement du feu dans une enceinte :

les modèles Probabilistes

Les modèles déterministes

4.1.1 MODELES PROBABILISTES

Les modèles probabiliste traitent avec la croissance du feu comme une série d'évènements ou états séquentiels.

Ces modèles sont définis comme modèles de transition d'état. Les règles mathématiques sont établies pour gouverner le transfert d'un évènement à un autre c'est-à-dire à partir de l'allumage jusqu'à l'établissement du feu. Les probabilités qui sont des fonctions du temps sont assignées à chaque point de transfert basées sur une analyse de données expérimentales pertinentes et sur des données historiques sur le feu. Ces modèles ne font pas normalement appel à l'usage d'équations physiques et chimiques décrivant le processus du feu.

4.1.2 MODELES DETERMINISTES

Par contraste, les modèles déterministes représentent les processus rencontrés dans un feu de compartiment par des expressions mathématiques en rapport avec la physique et la chimie du feu. Ces modèles peuvent aussi être référencés comme des modèles de feu de pièce, des modèles de calcul de feu ou des modèles mathématiques de feu. Idéalement, ces modèles représentent des possibilités ultimes : les changements discrets de n'importe quel paramètre physique peuvent être évalués en terme d'effet de danger lié à l'incendie. Tandis que l'état de l'art dans la compréhension des processus du feu n'a pas encore atteint le sommet, plusieurs modèles de calculs sont à présent disponibles qui fournissent des estimées raisonnables sur les effets d'un feu présélectionné. Ces modèles sont décrits ci-dessous :

4.1.2.1 Les modèles dits de Zone

Le modèle physique de base le plus commun est le modèle dit de "zone" ou modèle à contrôle de volumes. Ce modèle résoud les équations de conservation pour des régions distinctes. Un certain nombre de modèles de zones existent, variant selon certain degré de détail dans le traitement des phénomènes liés au feu. La caractéristique dominante de cette classe de modèles est qu'ils divisent la ou les pièces en une couche haute chaude et en une couche basse froide. Les calculs des modèles fournissent des estimées, des conditions clés pour chacune des couches en fonction du temps. Les modèles dits de zones se sont révélés être des méthodes pratiques pour l'obtention des estimés du premier ordre des processus du feu dans des enceintes.

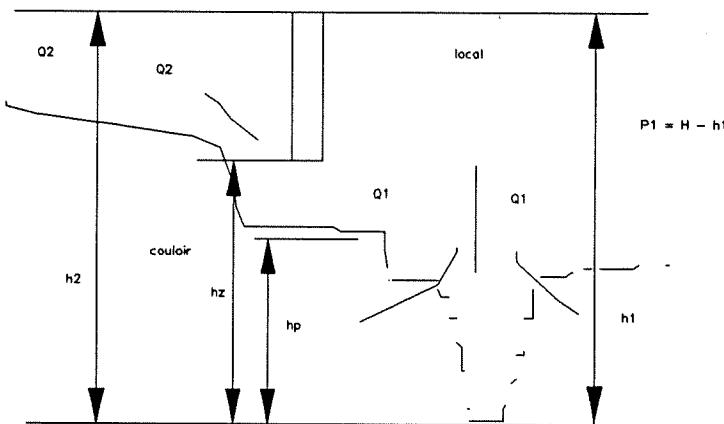


Fig 13 Ecoulement en nappe

4.1.2.2 Les modèles Champs

Les autres modèles généraux du type déterministe sont des modèles dit de "Champs". Ce type de modèle résoud les équations fondamentales de masse, de moment et d'énergie pour chaque élément de l'espace d'un compartiment qui a été préalablement divisé en une grille d'éléments de base. Par exemple dans une enceinte remplie par une grille tridimensionnelle de cubes élémentaires, un modèle tridimensionnel calcule les conditions physiques dans chaque cube en fonction du temps. Le calcul prendra en compte chaque changement des conditions physiques dans un cube et répercuttera ces changements dans chaque cube environnant. Ceci permettant à l'utilisateur de déterminer les conditions à chaque point du compartiment.

Actuellement ces modèles ne sont pas assez développés pour un usage commun. La demande en temps de calcul atteint la limite de calcul actuel de beaucoup de processeurs et la description

des processus physiques du feu est encore incomplète. Des développements ultérieurs seront nécessaires et l'apparition de nouvelles machines très performantes facilitera leur applications.

Les tables données en fin de chapitre donnent une liste d'un nombre de modèle de zone dans les enceintes. On décrira quelques modèles ci-dessous, modèles qui sont parmi les plus utilisés.

4.2 REVUE DES PRINCIPAUX MODÈLES DE ZONE

4.2.1 ASET

ASET (temps de sécurité pour l'évacuation) est un programme pour le calcul de la position et de la température de la couche de fumée haute dans une pièce unique avec portes et fenêtres fermées. ASET peut servir à calculer le temps de définition de conditions de danger à la fois pour les personnes et pour les biens. Les entrées nécessaires au programme sont :

- La fraction de perte de chaleur
- La hauteur du fuel au-dessus du plancher
- Les critères pour la détection des dangers
- Les caractéristiques géométriques du local
- La chaleur atteinte ...

Les sorties du programme sont :

- La température, l'épaisseur et en option les concentrations spécifiques de la couche de fumée comme étant une fonction du temps,
- Le temps pour la détection des dangers.

4.2.2 BFSM

BFSM (Modèle de simulation de feu de building) est un modèle stochastique de transition d'état fini qui permet l'examen de corrélation entre le développement du feu, la vitesse de combustion, et le mouvement des personnes occupant une résidence. Plutôt qu'un ensemble d'expressions mathématiques explicites, qui décrivent le processus physique le modèle consiste en : un ensemble d'état du process et un ensemble de règles qui gouvernent le passage d'un état à l'autre. Les entrées nécessaires sont :

- Les caractéristiques des lieux
- Les caractéristiques des éléments pouvant brûler
- La situation des occupants

Sont aussi nécessaire les définitions des probabilités pour les transitions du feu à travers des états discrets établis pour le modèle.

Les sorties sont:

L'évolution des températures en fonction du temps et la concentration des fumées, l'historique des états du feu, l'historique des voies disponibles pour l'évacuation. Ce modèle étant actuellement un outil de recherche.

4.2.3 FAST

FAST (Transport de la fumée et du feu) est un modèle de simulation incendie multipièces qui prédit les conditions dans une structure prédéfinie par l'utilisateur. La dernière version de FAST s'accommode de plus de 10 pièces avec de multiples ouvertures entre les pièces et l'extérieur. Les données requises sont:

La géométrie décrivant les pièces et leur connexion

Les propriétés thermophysiques des murs, des planchers et des plafonds

Le feu simulé comme une perte de masse

Le taux de génération de produits de combustion

Les sorties du programme sont :

La température, l'épaisseur, les concentrations d'espèces des couches de température haute et basse de chaque compartiment.

Sont aussi données les interfaces de température, la chaleur transférée et le flux de masse.

4.2.4 HARVARD

Le code HARVARD prédit le développement du feu et des conditions résultantes dans une pièce (version 5) ou dans plusieurs pièces (version 6), résultant de spécifications de feu fourni par l'utilisateur ou de ses spécifications sur l'ignition du feu. La version 5 prédit la chaleur et les embrasements possibles de plus de quatre objets dûs au feu initial. La pièce doit avoir au moins une ouverture vers l'extérieur. La version 6 réalise les mêmes opérations pour plus de 10 pièces connectées entre-elles par des ouvertures et dont au moins une pièce possède une ouverture vers l'extérieur.

Les données requisent pour les entrées du programme sont :

La géométrie décrivant les pièces et leurs ouvertures

Les propriétés thermophysiques des murs, des planchers et des plafonds

Le taux de génération de suie doit être spécifié et d'autres espèces peuvent être spécifiés.

Le feu doit être défini soit comme une perte de masse soit en termes de propriétés fondamentales du fuel.

L'ensemble des sorties comprend:

La température

La concentration des especes à l'intérieur

Les couches de température chaudes et froides dans chaque compartiment.

Ce programme donne aussi les températures de surface , le transfert de chaleur et le flux de masse.

4.3 MODELES A USAGE PARTICULIER

Des modèles de simulation à usage particulier sont définis pour des analyses spéciales telles que :

Résistance des structures au feu

Prédiction des temps de réponse pour des détecteurs de chaleur et des gicleurs automatiques

Concept d'évacuation pour des occupants de building

La définition de systèmes de gicleurs

La performance du contrôle de détection de fumée

Le contrôle des systèmes de ventilation...

Ces modèles nécessitent et/ou permettent le couplage avec d'autres modèles spécifiques, ou avec des modèles plus généraux de simulation du feu.

Une table de divers modèles est donnée en fin de chapitre.

4.3.1 ASCOS

ASCOS (analyse de système de contrôle de fumée) est un modèle pour l'analyse des débits d'air d'un système de contrôle de fumée

Ce programme permet d'analyser n'importe quel système de contrôle de fumée qui produit une différence de pression avec l'hypothèse de limitation de mouvement de fumée dans un situation de feu de building.

Les entrées consistent en:

Températures intérieures et extérieures de la construction

Une description du réseau de distribution , et la distribution produit par les systèmes de contrôle de fumée et de ventilation.

Les sorties sont des états stables de pression et de flux à travers la construction.

4.3.2 DETACT-QS

DETACT est un programme pour le calcul des temps d'activation de dispositifs thermiques fixés en-dessous de plafond non confiné. Il peut être utilisé pour prédire les temps d'activation de détecteur de chaleur à température fixée ou de gicleurs pour un feu spécifié par un utilisateur.

DETACT-QS suppose que le détecteur thermique est situé dans une zone relativement large; ceci étant, il n'y a pas d'accumulation de couche de gaz chaud autre que le flux du feu au plafond chauffant le dispositif thermique.

Les données d'entrées nécessaires sont :

- La hauteur du plafond au-dessus du fuel,
- La distance du dispositif thermique au dessus de l'axe du feu
- La température d'activation du dispositif thermique
- L'index du temps de réponse du dispositif thermique ,
- La chaleur atteinte.

Les sorties sont :

- La température du gaz au plafond à l'endroit du détecteur
- La température du dispositif, L'ensemble étant fonction du temps et du temps de réponse nécessaire pour l'activation du dispositif.

4.4 LOGICIELS REPERTORIES

Le développement de modèle de simulation incendie est très actif, aussi cette brève description de certains modèles n'est-elle pas exhaustive les deux tables suivantes donnent une liste plus complète des modèles, tels ceux dans une enceinte et ceux à usage particulier.

TABLE I MODELE DE SIMULATION DANS LES ENCEINTES

Modèle	Auteur	Organisme	Ressource	Caractéristiques
ASET	COOPER	NIST	Micro	Modèle une enceinte
BF3D	BAUM	NIST	Mini	Modèle champs
BRI2	TANAKA	BRI	Micro	Modèle une enceinte
CCFM	COOPER	NIST	Micro	Multiroom
CFIRE-X		BAT.INST.	Micro	Modèle une enceinte
CIFI	BODARD	CSTB FR	MINI	Multiroom
COMPBRN		CALIFORNIE	Micro	Modèle une enceinte
COMPF2	WALTON	NIST	Mini	Modèle une enceinte
DSLAVY		NDRI SUEDE	Micro	Modèle une enceinte
FAST	JONES	NIST	Micro	Multiroom
FIREX		INTELLEX	Micro	Modèle une enceinte
FIRST	MITLER	NIST	Micro	Modèle une enceinte
FISBA		CSTB	Mini	Modèle une enceinte
FISCO		INTELLEX	Micro	Modèle une enceinte
HARVARD	ROCKETT	NIST	Micro	Multiroom
HAZARD I		NIST	Micro	Analyse de risque
JASMINE	COX	FRS UK	mini	Modèle une enceinte
KAMELEON		SINTEF	Mini	Modèle champs
R-VENT		SINTEF	Micro	Modèle Ventilation

TABLE II MODELE DE SIMULATION A USAGE SPECIAL

Modèle	Auteur	Organisme	Ressource	Caractéristiques
ASCOS	KLOTE	NIST	Micro	Contrôle fumée
DETACT-QS	EVANS	NIST	Micro	Activation Detecteur
EVACS	TANAKA	BRI	Micro	Evacuation
INSTAI	LIE	NRCC	Micro	Résistance d'acier
MFIRE	GREUER	MTU	Micro	Feu de mines
NAT	CURTAT	CSTB	Mini	Effet sur les structures
SMACS	KLOTE	NIST	Micro	Mouvement de fumée

CHAPITRE V

5 INTRODUCTION A L'INTERFACE CHLOE POUR DETACT

L'utilisation de programme de simulation d'incendie n'est en général pas très convivial et le souci des programmeurs n'est pas d'élaborer un interface qui soit des plus convivial. Nous proposons ici un principe d'interface graphique qui améliore le dialogue homme/machine voir la compréhension du programme. Le programme choisi est DETACT[1]. L'outil d'interface est la librairie graphique CHLOE.

DETACT-TST est un programme interactif pour le calcul des temps de réponse nécessaires aux détecteurs de fumées ou aux détecteurs de chaleur soumis à un feu évolutif. Le programme affiche à l'écran la position respective du détecteur par rapport à l'axe du feu visualisant ainsi les aspects géométriques du scénario. Il propose aussi dans un ensemble de fenêtres les différentes entrées à renseigner, puis après avoir lancer le programme il donne les résultats du calcul dans une troisième fenêtre. Ce programme est un des éléments de la procédure HAZARD I .

5.1 APERCU GENERAL DU PROGRAMME

Des études de réponse de détecteur de chaleur soumis aux flux du feu sous des plafonds confinés ont été entreprises depuis les années 1970. Les résultats de ces vastes études expérimentales ont servi au développement de corrélation de données qui se sont avérées utiles pour une large variété de conditions de feu et de caractéristiques d'immeuble. Ces corrélations ont été utilisées pour définir des méthodes d'ingénierie afin de calculer les espacements de détecteur de chaleur , les temps de réponse des gicleurs, les temps de détection d'alarmes de fumées pour des constructions industrielles où l'existence de large plafond est commune. La méthode pour le calcul d'espacement des détecteurs de chaleur a d'ailleurs été adoptée par le NFPA⁷ comme standard.

Les corrélations des mêmes données expérimentales que celles des tables standards NFPA furent utilisées pour élaborer un programme FORTRAN (DETACT-T2) qui évalue le temps de réponse de système de détection de chaleur existant. Les calculs du programme correspondaient à 5 % près aux valeurs publiées dans les tables NFPA. Bien que cette méthode de calcul soit la plus "solidement" établie parmi celles existentes son application est limitée au feu dont l'augmentation en énergie est proportionnelle au carré du temps à partir de l'allumage.

Le programme DETACT-QS évalue la réponse au feu dont la valeur de l'énergie réalisée est arbitraire. La seule restriction est que la courbe de l'énergie réalisée doit être représentée en fonction du temps par une série de lignes droites.

Les codes en général analyse la réponse de détecteur dans des installations sous des plafonds larges et non confinés. Pour des compartiments plus petits le problème a été étudié mais aucun code n'a été généré.

L'analyse de la réponse de détecteurs de fumée est couramment réalisée en approximant le détecteur de fumée comme détecteur de chaleur basse température à temps de décalage nul. La sélection de la réponse en température, correspondant à la sensibilité d'un détecteur donné, dépend aussi de la proportion relative de fumée et de l'énergie réalisée par le fuel qui brûle.

La librairie graphique CHLOE est utilisée pour l'affichage des entrées et de sorties. CHLOE permet de diviser la station de travail en plusieurs zones et sous-zones accessibles individuellement. Les paramètres graphiques sont stockés dans un fichier appelé SCENARIO et peuvent être modifiés sans régénérer le programme exécutable. Le scénario est alors compilé par un programme (CSC.EXE) qui en vérifie la syntaxe et la validité. Le résultat est un scénario compilé (.CHL) plus compacte qui est lu par le programme d'application.

Un écran du type CHLOE comprend une zone titre, une zone menu, une zone de commandes permanentes et plusieurs zones et sous-zones définies par le programmeur de l'application. Les commandes permanentes sont accessibles à tout moment et servent à modifier l'environnement et à envoyer l'affichage sur papier ou dans un fichier et à quitter le programme.

Le menu est une structure hiérarchique dans laquelle on se déplace selon l'exécution du programme. Toutes les fonctions d'entrées permettent un contre-ordre pour annuler l'opération en cours en pointant le curseur sur un autre noeud ou sur une commande permanente.

Les zones particulières à DETACT sont la zone de visualisation de la flamme et du détecteur, la zone de définition des unités, la zone des entrées associée à une zone d'affichage et une zone de rentrée des données, la zone d'exécution du programme et enfin la zone des résultats.

Dans la zone de visualisation apparaissent la flamme, le détecteur, la hauteur sous plafond et l'angle que fait le détecteur avec la flamme.

La zone de sélection des unités choisies qui autorise le choix soit du système métrique soit du système d'unité anglaise, les conversions étant faites par le programme.

La zone de sélection des entrées où apparaissent plusieurs informations définissant les paramètres d'entrée du programme (température d'activation du détecteur, chaleur réalisée ...)

La zone d'impression des résultats où plusieurs caractéristiques définissent les paramètres de sortie du programme (température d'activation du détecteur, temps de réponse ...)

CHLOE dans sa version DOS utilise les primitives d'une librairie CGI. On doit donc installer les pilotes d'écran et de souris avant d'utiliser une application sous CHLOE.

5.2 EXEMPLE

Calculer le temps d'activation pour une température et un taux d'élévation de température donné, avec un espace de 3.05 m, dans une zone de hauteur 3.66m. Le détecteur a un RTI de $370.3 \left(\frac{m}{s} \right)^{\frac{1}{2}}$.

La température d'activation du détecteur est de 54.4 °C et le taux d'élévation est de 8.33 °C/min. La température ambiante est de 21 °C.

LA VERSION ANTERIEURE MONTRE SUR L'ECRAN:

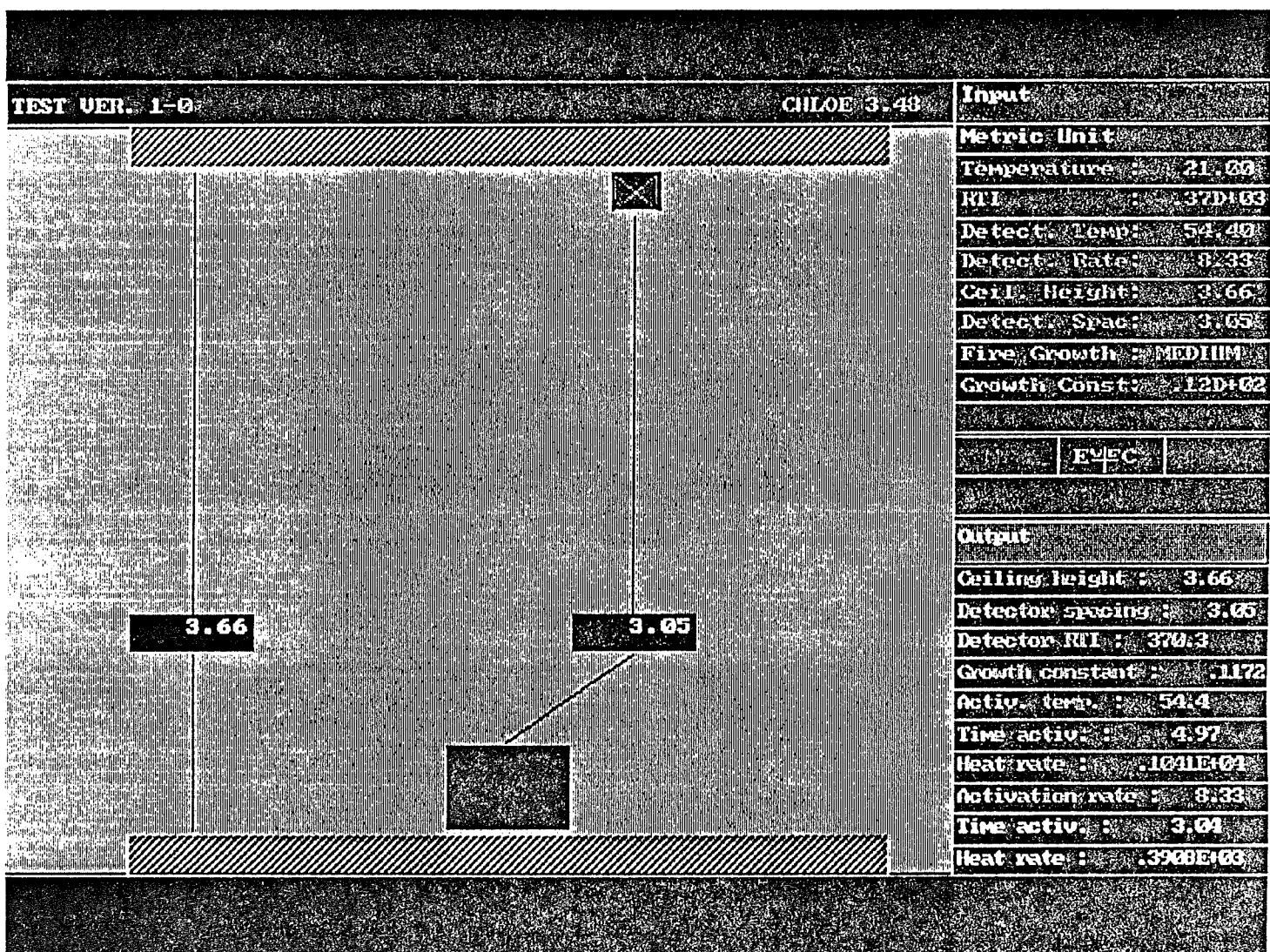
Input

```
ENTER THE AMBIENT TEMPERATURE IN DEGREES C? >21
ENTER THE DETECTOR RESPONSE TIME INDEX (RTI) IN (FT-SEC)**1/2? >370.3
ENTER THE DETECTOR ACTIVATION TEMPERATURE IN DEGREES C? >54.4
ENTER A DETECTOR RATE OF RISE IN DEGREES F/MINUTE? >8.33
ENTER THE CEILING HEIGHT IN METRE? >3.66
ENTER THE DETECTOR SPACING IN FEET? >3.05
ENTER S FOR SLOW FIRE GROWTH RATE"
      M FOR MEDIUM FIRE GROWTH RATE" >M
      F FAST FIRE GROWTH RATE"
      U ULTRAFAST FIRE GROWTH RATE"
```

REULTATS

```
CEILING HEIGHT = 3.66 METRES "
DETECTOR SPACING = 3.05 METRES "
DETECTOR RTI = 370.3 (M-S&EC)**1/2 "
FIRE GROWTH CONSTANT = .1171 +002 WATTS/SEC**2
ACTIVATION TEMPERATURE = 54.4 DEGREES C
TIME TO ACTIVATION = 297,88 SECS
HEAT RELEASE RATE = .1038 +007 WATTS
ACTIVATION RATE OF RISE = 8.33 DEGREES C/MIN"
TIME TO ACTIVATION = 182.75 SECS
HEAT RELEASE RATE = .3908 +006 WATTS
```

5.3 VERSION ACTUELLE



VUE DE L'ECRAN MONTRANT LA LOCALISATION DU DETECTEUR PAR RAPPORT AU FOYER D'INCENDIE AINSI QUE L'AFFICHAGE DES DONNEES

CHAPITRE VI

6 MODELISATION DU MOUVEMENT DE LA FUMEE ET DES EFFETS DU SYSTEME DE VENTILATION DANS LES FEUX DE PUITS DE MINE

6.1 RESUME

MFIRE est un programme de calcul qui réalise la planification d'un réseau de ventilation et qui simule dynamiquement la transition d'état d'un réseau de ventilation sous diverses conditions. Le programme est utile pour l'analyse d'un réseau de ventilation sous influence d'une ventilation naturelle, de ventilateurs, de feux, ou toutes combinaisons de ceux-ci. MFIRE simule le système de ventilation d'une mine et sa réponse à des conditions altérées de fonctionnement, comme par exemple le développement d'une nouvelle zone de travail, le changement dans la structure de ventilation, les influences externes telles que la variation de température extérieure et les influences internes comme les feux.

Des sorties détaillées permettent une analyse détaillée des effets des altérations causées au système de ventilation.

Ce programme est très intéressant, mais comme toujours des améliorations peuvent être apportées notamment au niveau des informations entrée/sortie en y associant du graphisme à l'aide d'outils du genre Autocad, Chloé ... Il s'agit surtout de visualiser les différents effets du feu, des contaminants et leurs évolutions dans le temps

6.2 INTRODUCTION

Les principes physiques qui régissent les systèmes de ventilation des mines et l'état de l'art de la ventilation sont initialement soulignés. Plusieurs programmes de calcul développés au cours de la dernière décennie pour la modélisation de l'interaction de la ventilation et l'évolution du feu dans les mines sont ensuite décrits. Les anciens programmes considéraient le système ventilation-feu à l'état d'équilibre. Au moyen de ces derniers le débit d'air, les pertes de pression, les températures, la fumée et les concentrations de méthane peuvent être calculés. Les nouveaux programmes, en faisant l'hypothèse d'un débit d'air constant, permettent le calcul de la concentration de fumée par transition d'état, aussi bien que la détermination du temps d'exposition à la fumée des mineurs sauvés.

6.2.1 INCENDIE DANS LES MINES

Les feux ont toujours été un grand souci pour l'industrie minière. Ils sont fréquents lorsque le minéral des mines est combustible. Les statistiques montrent que le nombre de feux majeurs, dans les mines aux U.S.A, qui exigent l'évacuation de la mine s'élèvent approximativement à 50 pour cent par an. Les feux de mine peuvent conduire à un grand nombre de perte de vies humaines, puisque les possibilités d'évacuation sont limitées. La plupart des grandes catastrophes minières

au cours de l'histoire des mines, ont été causé par des feux ou des explosions, ces dernières fréquemment suivies par des feux. Les feux dans les mines ne sont pas limités aux mines de charbon. L'étayage dans les mines de métal renferme beaucoup de bois, et le dernier grand feu de mine aux USA, avec la perte de 92 mineurs en une heure, survint dans une mine de cuivre.

6.2.2 VENTILATION DES MINES

Pratiquement toutes les mines doivent être ventilées, principalement les mines de charbon pour la dilution et l'enlèvement du gaz de méthane et de la poussière, les mines de métal surtout pour l'extraction des gaz diesel. D'autres contaminants comme la chaleur, le radon, et la fumée peuvent également jouer un rôle .

La quantité d'air nécessaire s'élève normalement à environ un millier de m^3

par heure et peut s'élever à plus d'un millier de m^3

par heure pour quelques mines. Les ventilateurs doivent compresser l'air à une pression de plusieurs kPa et requièrent une puissance de 1000 à 2000 kW.

Principes physiques de la ventilation des mines.

En vue d'une étude élémentaire des systèmes de ventilation sous des conditions de fonctionnement normal, il est suffisant de considérer les lois physiques suivantes:

1 Conservation de masse, qui conduit pour chaque noeuds de galerie ou jonction à l'équation :

$$\sum Q = 0$$

où Q = débit massique

2 Conservation des moments et conservation d'énergie, qui conduisent aux équations de flux turbulent pour chaque conduit d'air de type:

$$H_t = R Q |Q|$$

où H_t = chaleur perdue et R = facteur de résistance, et pour chaque ventilateur la caractéristique

$$H_f = f(Q)$$

où H = ventilateur de tête

3 Conservation d'énergie, qui conduit pour chaque maille du réseau à :

$$\sum H_n - \sigma H_f - H_n = 0$$

est la ventilation naturelle principale. La ventilation naturelle est un terme de mine établi pour des écoulements en "tourbillon" ou puits thermiques. Si H_n est mesuré en kj/kg, la première loi de thermodynamique nous donne l'amplitude comme étant :

$$H_n = \int v dp$$

où v = volume spécifique en m^3

/kg et p = pression d'air (kPa)

Une très bonne approximation est :

$$H_n = \left(\frac{1}{T_m} \right) \int T dZ$$

où T = température de l'air (K), Z = élévation de la branche (m), et T_m la température moyenne de l'air.

Modélisation de la ventilation de mines

Le but d'une planification de ventilation normale d'une mine est de définir le débit d'air dans la branche et la perte de pression comme une fonction des caractéristiques du ventilateur, de la résistance des branches et de la ventilation naturelle (calcul du réseau). Les caractéristiques du ventilateur et les facteurs de résistance sont mesurés ou calculés. Puisque sous des conditions normales de ventilation, la densité de l'air et la température ne changent pas beaucoup, leurs influences sur le facteur de résistance R , sur les caractéristiques du ventilateur $f(Q)$ et sur le tirage naturel de ventilation H_n , sont généralement vérifiées séparément et considérées, comme donnés d'entrées

Les systèmes de ventilation des mines sont généralement importants et complexes. Même lorsque les branches en parallèles et en séries sont imbriquées les unes dans les autres, ils comprennent normalement plusieurs centaines de branches, de noeuds et de mailles. Le calcul d'un réseau signifie par conséquent la résolution d'un ensemble d'équations égale au nombre de branches. Il existe deux méthodes :

- (1) Linéarisation des équations non linéaires et résolution simultanée ;
- (2) Utilisation du développement en séries de Taylor des équations non linéaires et résolution du résultat simultané ou des équations non liées.

De récentes études montrent que pour des réseaux de la dimension des systèmes de ventilation des mines, la seconde méthode, avec toutes les dérivées sauf pour la première qui est négligée, donne les temps de calcul les plus courts lorsqu'il y a accompagnement par une méthode de convergence par sélection des mailles. Partant d'une estimation de distribution de débit d'air, qui satisfait l'équation des noeuds $\sum Q = 0$, le débit d'air d'une branche faisant partie d'une maille est corrigé itérativement par un terme

$$\Delta Q = - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i Q_i |Q| - H_{F,i}) - H_n}{2 \sum_{i=1}^n R_i Q_i |Q| - \frac{dH_{F,i}}{dQ_i}}$$
E

avec la maille formée de telle façon que le dénominateur devienne le plus faible possible. Cette méthode est communément nommée d'après son auteur Hardy Cross.

6.2.3 MODELISATION DE L'INTERACTION D'UN FEU DE MINE ET DE LA VENTILATION D'UNE MINE

Malgré le fait qu'ils soient concernés par les incendies dans les mines et l'existence de techniques avancées de planification de la ventilation des mines, les ingénieurs miniers furent lents dans la reconnaissance du potentiel des ordinateurs pour la planification de la sécurité des feux. Un certain tournant fut atteint lors du feu de mine de Sunshine en 1972 ci-dessus mentionné. Des poursuites 850 millions de dollars intentés contre le Gouvernement Fédéral des USA conduisit au développement d'un programme de calcul pour la simulation d'un système de ventilation de mine lors d'un incendie. Ce programme suppose que le système passe à travers une séquence de conditions d'états stables contrôlée par l'intensité du feu, qui est en retour fonction de l'alimentation en oxygène du feu. Il a été bien accepté non seulement dans l'industrie des mines mais aussi par les concepteurs de systèmes de lutte contre l'incendie dans les buildings. Plusieurs autres programmes pour la simulation de la distribution de transitoire de concentration de fumée, et pour l'étude à l'exposition de la fumée chez les mineurs rescapés, ont aussi été écrits.

Programme d'état stable

Avec les mouvements vifs d'air dans le système de ventilation des mines, le feu a deux effets de base : un effet d'accélération causé par l'expansion de volume de l'air chaud, et un effet de cheminée semblable à une ventilation naturelle. L'ensemble étant exclusivement des effets de température.

Le programme mixe de calcul d'un réseau conventionnel (débit d'air, perte de pression) comprend le calcul de concentration et de température et prend automatiquement en compte les forces de ventilation dues aux changements de température. N'importe quel type de source de chaleur ou de contaminant peut être considéré. La nature des feux varie selon les types de fuel, la densité de fuel, et l'alimentation en oxygène. L'évolution du dégagement de méthane et sa concentration sont considérés séparément. L'inversion de débit d'air et la recirculation ne pose pas de problème au niveau du calcul.

Le programme a été écrit pour des applications conformes aux de procédures d'utilisation pratiquées pour les ingénieurs. Il peut être utilisé pour le calcul de réseaux, de concentration et de température séparément ou combiné. Les entrées et les sorties ont été minimisées. Quand c'est possible, les données incomplètes sont compensées par des valeurs moyennes et les données incorrectes sont corrigées. Les tableaux 1 et 2 données en annexe résument les données d'entrée et de sortie.

La logique du programme pour un réseau combiné, la concentration, et le calcul de température comme il est nécessaire en simulation d'incendie, est montrée en figure 1.

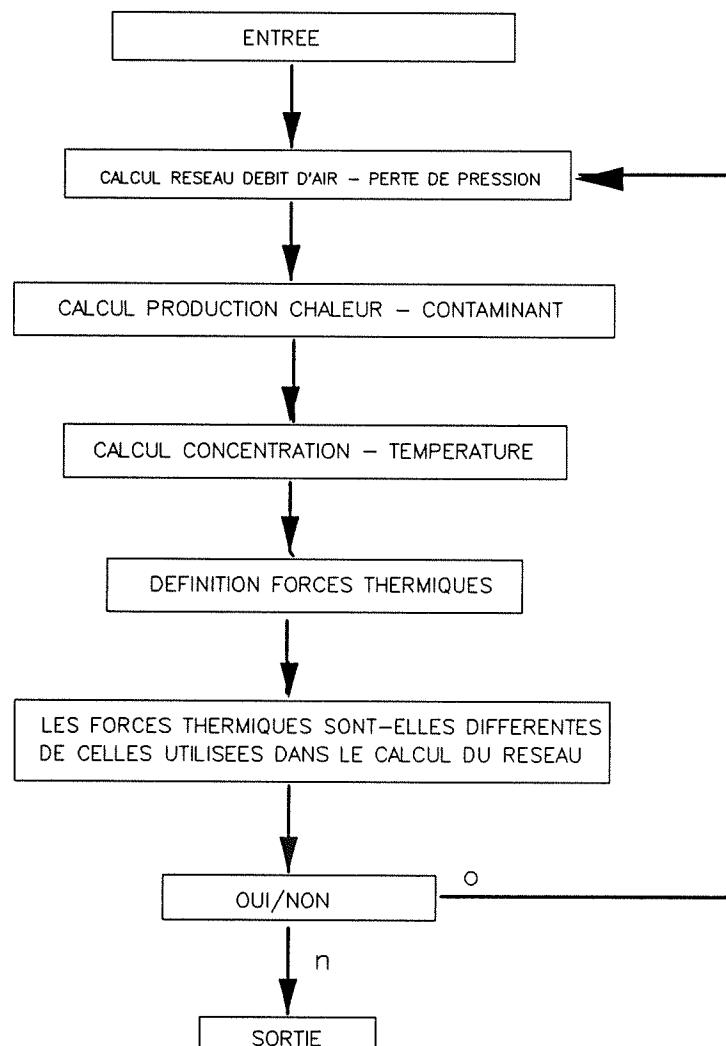


FIG 1 Logique simplifiée du programme d'état stable

Après que le calcul d'un réseau conventionnel pour un état de pré-feu ait été réalisé, la production de chaleur et de fumée, les distributions de concentration, et les forces thermiques générées sont calculées. Ces dernières sont insérées dans le calcul d'un nouveau réseau et une autre séquence de calcul est réalisée jusqu'à ce qu'un équilibre des forces de ventilation soit atteint.

Cette approche est justifiée puisque des changements de la distribution de température produite par le feu ne sont observées qu'à proximité immédiate du feu et à une courte distance de lui. Les nouvelles valeurs de la distribution de débit d'air produite par le changement de distribution de température, sont donc atteintes presque instantanément.

L'échange de chaleur entre l'air et les murs des branches, qui est crucial pour l'amplitude des forces de ventilation générée par le feu, est calculé sous des conditions d'état non stable prenant en compte l'état de changement de température. Les calculs sont réalisés par l'intermédiaire des équations de Fourier en conduction thermique et sous des considérations de vitesse et de température dépendant des coefficients de convection.

Si le changement de système de ventilation dans le temps doit être pris en considération, il est nécessaire de réaliser une séquence de calcul pour différents intervalles de temps depuis le début du feu. La figure 2 en fin de chapitre montre un diagramme plus détaillé du programme principal. Ce programme peut être considéré comme l'association de deux parties:

Partie réseau - Partie concentration et température.

La partie réseau contient le programme de calcul du réseau pour une planification conventionnelle de ventilation. Le calcul de la concentration et de la température ont des caractéristiques communes et sont ainsi réalisées conjointement. Pour l'ensemble de celles-ci il est nécessaire de connaître quels courants d'air arrivent au même noeud et le quittent. Les changements de concentration et de température dans les chemins sont causés par les contaminants et les variations de la chaleur de l'air. Dans les jonctions et noeuds, ils sont causés par mixage. Le calcul débute à un noeud dont les conditions sont connues: généralement il se situe à la surface donc à la pression atmosphérique. Les calculs des chemins déterminent l'état de l'air à la fin de chaque branche quittant ce noeud et avant d'entrer dans le noeud suivant.

Un test est ensuite réalisé pour savoir pour quel noeud les conditions d'entrées d'air sont connues. Si de tels noeuds sont trouvés, le calcul de jonction, traitant du mixage seulement, détermine l'état du mélange de l'air du noeud. Cette séquence de calcul alterné soit sur les chemins soit sur les jonctions continue jusqu'à ce le noeud de départ soit atteint à nouveau. La séquence est interrompu lorsque une recirculation apparaît, depuis l'état du noeud d'entrée ou la recirculation d'air est connue. Cette difficulté est surmontée en utilisant une méthode itérative. L'état où l'on a de l'air recirculant est initialement estimé. Après qu'alternativement les chemins et les jonctions

aient été calculés, le calcul de l'air recirculant est utilisé à nouveau pour une meilleure estimation. Ce processus est utilisé jusqu'à ce la différence entre l'estimé et le calculé ait disparue. Une grande importance est accordée aux calculs de la température.

Il est heureux que la théorie et la pratique de précalculation de la température pour les travaux de mines soient bien avancées. Comme mentionné ci-dessus les perturbations générées par les feux de mines peuvent être, pour les systèmes de ventilation de mines, attribuées aux effets d'accélération de ventilation naturelle, avec la formation induite par l'expansion du volume d'air. Puisque les pertes de chaleur sont proportionnelles au carré de la vitesse de l'air, qui pour des débits d'air et des zones d'intersections constantes sont proportionnelles aux volumes spécifiques, les effets d'accélération peuvent être pris en compte par un facteur $\left(\frac{T_f}{T_o}\right)$, où les indices dénotent

la température du feu et celle ambiante. Puisque La température le long des galeries change, il est nécessaire d'utiliser le carré de la moyenne de la température selon cette formule :

$$T_f^2 = \int T^2 \frac{dL}{L}$$

où T = la température absolue dans la galerie $F(l)$ et L = longueur de la galerie. La hauteur de charge de la ventilation naturelle peut être estimée par l'équation ci-dessous

$$H_n = \frac{1}{T_m} \int T dZ$$

L'ensemble des autres facteurs, sont des fonctions de l'élévation et de l'échange de chaleur avec les murs de la galerie. Cette dernière est une fonction de la température de la roche, qui est encore une fonction de l'élévation de la galerie. Le résultat est tel que les fonctions mathématiques pour définir T_f^2 et H_n ne sont pas simples. Après que les forces thermiques générées par le feu aient été calculées, le programme retourne à la partie réseau et répète la séquence de débit d'air, de concentration, de distribution de température et de calcul des forces produites par des effets thermiques jusqu'à ce que les conditions soient telles qu'un équilibre soit trouvé.

6.3 CALCUL DES TRANSITIONS D'ETAT DE CONCENTRATION

Considérer un système de ventilation sous influence d'un feu, évoluant sous des conditions d'états stables, est une approximation acceptable pendant que la distribution d'air évolue. Ceci est une moins bonne approximation pour la distribution de concentration due à la grande dispersion par la ventilation et au très grand chemin parcouru par les contaminants. Cela peut prendre un temps très important pour atteindre le remplissage de la mine tant par la fumée que par les contaminants. Plusieurs galeries inférieures peuvent rester sans fumée pendant un certain temps et ensuite se remplir graduellement par la concentration de fumée.

Ceci est très important pour la réalisation de la détection d'incendie et les systèmes d'évacuation. Ainsi plusieurs programmes furent écrits pour calculer la transition d'état de distribution de concentration. Tous sont basés sur l'hypothèse d'un débit d'air constant, qui peut être soit celui prévalent avant le feu, soit celui établi lui-même après la transition d'état pendant le feu. Les procédures de calcul choisies furent de diviser l'atmosphère de la mine en volumes de contrôle homogène de concentration de contaminants qui avance avec le flux à travers le système de ventilation. Lorsque les volumes de contrôle se rencontrent aux noeuds, ils sont éliminés et de nouveaux volumes de contrôles sont formés. Le nombre de volumes contrôlés peut varier largement selon la complexité du système de ventilation. Lorsque une recirculation apparaît, elle peut devenir infinie avec des différences de concentration de plus en plus faibles entre les nouveaux volumes de contrôle formés et ceux observés.

6.4 PROGRAMME DE TRANSITION D'ETAT COMPLET

L'hypothèse d'un débit d'air constant dans le temps pour le calcul de transitions d'état de distribution de concentration est justifiée pour les étapes précédentes du feu, lorsqu'aucune pointe de feu n'influence le débit d'air. Pour les étapes suivantes du feu, il existe une bonne approximation qui est d'autant meilleure que le développement du feu est rapide. Plusieurs essais furent faits pour mieux décrire la simulation complète de transition d'état d'un système de ventilation. Pour ceux-ci, l'approche de contrôle de volume a été retenue, mais les volumes de contrôle sont définis comme étant les volumes d'air qui ont pénétrés la galerie depuis un certain temps. La longueur de l'intervalle de temps est variable. Si les conditions dans le système ne changent que lentement, alors l'intervalle de temps est allongé. Si une inversion de flux apparaît l'intervalle de temps est réduit jusqu'à ce que l'inversion soit bien établie.

La simulation de transition d'état des système de ventilation est, naturellement ce que les ingénieurs des mines veulent avoir à leur disposition. Mais des améliorations devront être apportées pour rendre ces outils routiniers.

6.5 ANNEXE

6.5.1 TABLE 1

Données d'entrées pour chaque type de calcul

1- Nombre d'identification des branches, branches de départ et noeuds terminaux

2- Calcul du réseau

Branches; facteur de résistance ou facteur de friction et dimension du réseau (longueur, périmètre, zone d'intersection), débit d'air estimé,

Régulateurs: débit d'air désiré

Ventilateurs: caractéristiques pression et débit d'air estimé

Noeuds: température et élévation

3- Calcul de température

Branches, régulateurs et ventilateurs; facteur de friction et dimensions (longueur, périmètre, section d'interconnection), changement d'élévation, propriété de la roche (température, conductivité thermique et diffusion), débit d'air

4-Calcul de la concentration de méthane

Branches, régulateurs et ventilateurs: évolution totale de méthane par unité de surface, ou changement de concentration de méthane, débit d'air

5- Calcul de la propagation du feu et des contaminants

Branches, régulateurs et ventilateurs: production de contaminants, concentration de contaminants et développement de chaleur ou (feu riche en oxygène) concentration d'oxygène sous le feu ou (feu riche en fuel) production de chaleur et de fumée par quantité d'oxygène, débit d'air.

6.5.2 TABLE 2

Sortie du programme

Toutes les données d'entrées

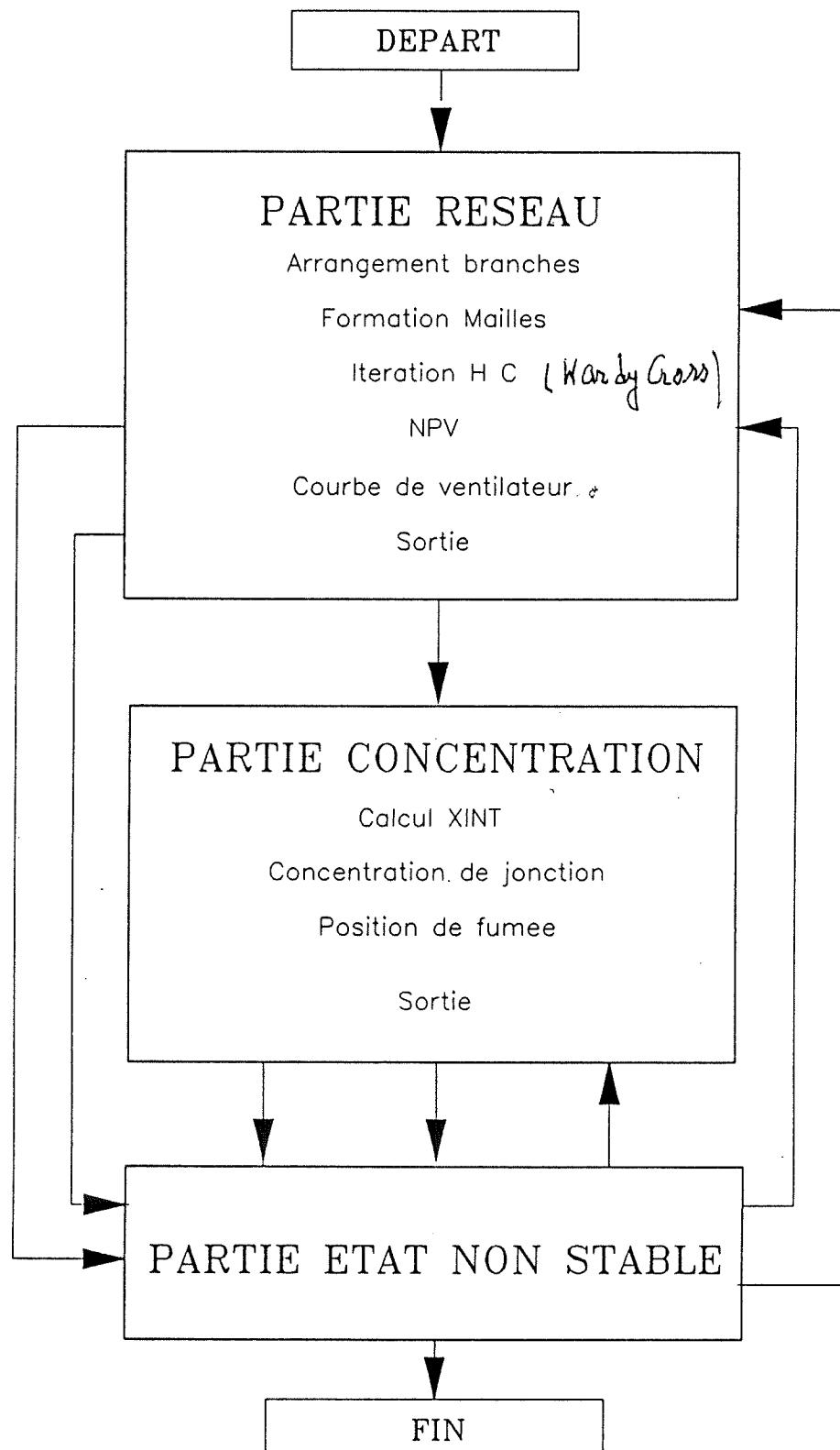
Résultats du premier calcul du réseau (avant-feu)

Débit d'air et perte de pression dans les branches, température, concentration de méthane et de contaminent.

Température, méthane et concentration de contaminants aux noeuds.

Liste de chemins de recirculation et les galeries avec inversion de débit d'air.

Liste des conditions dangereuses dans les galeries et noeuds.



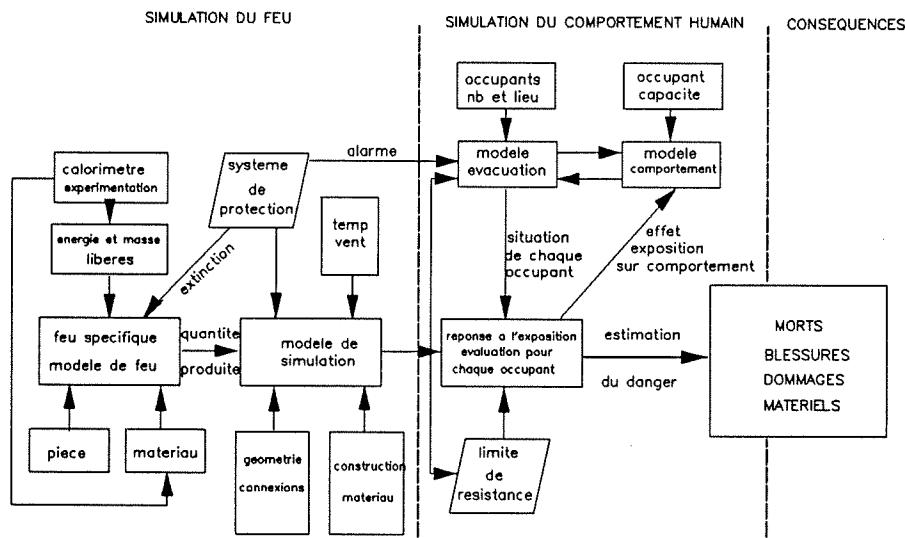
CHAPITRE VII

7 INTRODUCTION A LA METHODOLOGIE PROTOTYPE POUR L'ANALYSE DES DANGERS

Le centre de recherche sur le feu du NIST a réalisé une méthode pour la quantification des dangers liés aux incendies pour les occupants des immeubles, et pour la contribution relative des différentes espèces de produits de construction à ces dangers. HAZARD I[2] est la première application aussi complète dans le domaine de la prédiction des dangers liés à l'incendie.

HAZARD I associe l'expertise de jugement de spécialiste du feu, et les calculs pour évaluer les conséquences du feu.

La figure ci-dessous illustre les éléments et interactions nécessaires pour la réalisation d'une analyse significative de danger d'incendie.



SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE HAZARD I

Des mesures expérimentales pour évaluer le comportement au feu des matériaux utilisés sont nécessaires, et la description des lieux dans lesquels ils brûlent est aussi requise pour définir le feu en terme d'énergie réalisée et de consommation de masse à travers le temps. Le transport de cette énergie et de cette masse à travers la construction est influencé par la structure géométrique, les matériaux de construction utilisés et les systèmes de protection utilisés. Le comportement des occupants et les conséquences du feu dépendent de l'instant où les occupants sont informés, de leur capacité physique, des décisions qu'ils prennent et enfin de leur susceptibilité devant les dangers auxquels ils sont exposés.

HAZARD I est un ensemble de procédures associant le jugement d'expert et le calcul pour estimer les conséquences d'un feu.

Ces procédures impliquent quatre étapes :

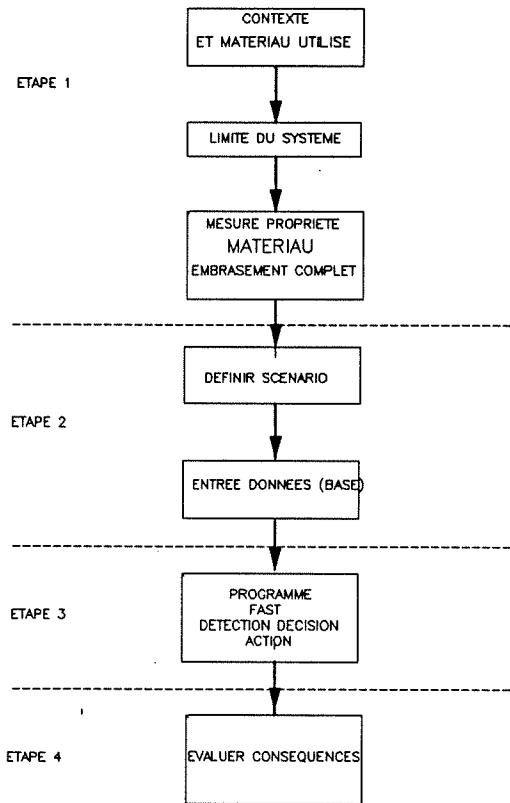
- 1- Définir le contexte,
- 2- Définir le scénario,
- 3- Calculer le danger
- 4- Evaluer les conséquences

Les étapes 1 à 3 sont largement dépendantes du jugement et de l'expertise de l'utilisateur. L'étape 3, qui suppose l'utilisation intensive de logiciel, nécessite une expertise très importante en pratique de lutte contre l'incendie. Le cœur du logiciel HAZARD I est une séquence de procédures logicielles implantées sur calculateur pour calculer le développement de conditions dangereuses dans le temps, calculer le temps nécessaire aux occupants d'un building pour s'échapper sous ces conditions, et estimer les pertes de vies résultantes basées sur le comportement supposé des occupants et les critères de défense. Ces calculs sont réalisés pour une construction particulière et un ensemble de données précises de scénario.

Les constructions et les scénarios d'intérêt pour l'utilisateur d'estimation de danger de feu dépendra de l'objet de l'évaluation . Par exemple les fabricants de produits ne seront pas concernés par les constructions mais plutôt par un scénario améliorant de façon significative leur production dans toutes les constructions ou on peut les trouver. L'intérêt des inspecteurs de sécurité sera dans des feux spécifiques de certaines constructions puisqu'ils reproduisent des incidents qui se sont produits.

Un ensemble d'exemples de référence a été compilé pour aider l'utilisateur à travers le processus. Ceux-ci incluent un jeu de construction prototype et des scénarios de feux communs. Les méthodes décrites dans ce papier permettent à l'utilisateur de substituer différents produits à ceux utilisés dans un des exemples ou réaliser une analyse sur des constructions ou de scénarios différents, ceci telle que les phénomènes impliqués se trouvent dans les limites techniques des modèles.

Chacune des situations ne nécessite pas une nouvelle investigation ou un nouveau calcul des différents dangers. Par exemple, il peut être répondu à certaines questions par estimation ou inférence des performances souhaitées d'un produit à partir de matrices fournies ou d'exemples déjà traités. Naturellement, comme le nombre d'exemples augmente dans le temps plusieurs utilisateurs trouveront leurs réponses en examinant simplement les divers exemples à leur disposition. D'une autre façon l'utilisateur peut être concerné par des situations en dehors des possibilités du système, auquel cas il lui faudra revenir à des moyens plus traditionnels. Une troisième alternative est que l'utilisateur choisisse de passer au travers d'une situation entièrement nouvelle . Le diagramme suivant illustre les trois alternatives.



7.1 PROCEDURE LOGIQUE

Initialement, le contexte d'utilisation et les scénarios (étape 1 et 2 de la méthode d'analyse des dangers) pour les produits en question sont établis, et comparés aux matrices d'exemples fournies. S'il est établi que les applications tombent dans le champ de capacité de HAZARD I mais que les exemples sont insuffisants pour répondre aux questions posées par les dangers relatifs à certains produits, alors une nouvelle séquence de calcul (étape 3) est nécessaire.

Lorsqu'on travaille avec l'analyse de dangers, on doit bien comprendre la méthode et les différents raisonnements. Des exemples représentatifs serviront de référence pour la méthode avec des données appropriées.

Table 1 Détails de la méthode d'analyse de risque	
1 Définition du contexte d'utilisation du produit	
<p>Quel est le problème à résoudre</p> <p>Quel est l'environnement ou le contexte d'utilisation du produit type d'occupants, design de la construction, contenu, occupants.</p> <p>Qui sont les clés de décisions</p> <p>Quels critères utiliseront-ils pour accepter ou rejeter le produit</p>	
<p>2 Définition du scénario du feu (Un scénario est un feu spécifié dans un type de construction avec une bonne définition du contenu et des occupants)</p> <p>Examen des incidents pertinents du feu, expérience avec des produits identiques ou similaires.</p> <p>Identifier la vraisemblance du rôle ou de l'amélioration des produits dans le feu.</p> <p>Quel scénario de feu les preneurs de décision prennent-ils le plus commun/vraisemblable le plus performant</p>	
<p>3 Calcul des dangers : Pour chaque scénario identifié ci-dessus utilisation du guide technique de référence et de logiciels fournis.</p> <p>Les principales routines du programmes sont:</p> <p>FAST_in - spécification du scénario (immeuble, contenu, occupants, feu)</p> <p>FAST - Calcul de la propagation du feu et de la fumée</p> <p>EXITT - prédition des actions et décision des occupants</p> <p>TENAB - Calcul de l'impact sur les occupants.</p>	
4 Evaluation des conséquences	
<p>Examens des sorties pour chacun des scénarios pertinents définis à l'étape 2 en fonction de critères décision.</p> <p>Etablissement d'un degré de confiance dans les résultats en utilisant la sensibilité d'analyse, le jugement d'expert si nécessaire en effectuant des tests complémentaires.</p> <p>Délimitation de la plage d'applicabilité des résultats.</p>	

7.1.1 ETAPE-1 DEFINITION DU CONTEXTE

La définition du contexte nécessite qu'une analyse du produit et des détails de son utilisation dans les lieux d'intérêt soit développée. Le contexte d'utilisation d'un produit implique souvent les caractéristiques de l'occupant nécessaire. Ceci s'avère nécessaire pour les étapes suivantes et la sélection de scénario.

L'utilisateur devra clarifier la base sur laquelle le jugement du produit sera faite. Il est préférable de statuer explicitement sur le niveau de sécurité requis ou souhaité que le produit devra atteindre. Un critère approprié pour un nouveau produit sera tel que sa performance de tenue au feu devra être au moins égale à un produit de même usage, ou que le produit atteigne un niveau de performance défini. Par exemple, le produit devra être jugé moins inflammable, réduisant la vraisemblance d'ignition. La procédure appropriée pour l'étape 3 devra être évaluée en fonction d'un critère choisi. Par exemple, si la réduction en perte de vie est le critère, la procédure doit être la prédiction de mortalité. On devra aussi déterminer si les procédures de calcul ou de test qui traitent des aspects clés du produit sont disponibles.

Finalement des questions importantes pour la vérification ou l'acceptation des résultats seront posées. Celles-ci comprennent :

Quelle expérience sera rapportée dans la solution

Comment les limitations techniques peuvent-elles résolues?

7.1.2 ETAPE-2 DEFINITION DES SCENARIOS CONCERNES

Une somme significative d'informations relatives à la définition du scénario peut être obtenue à partir de l'historique des incidents du feu impliquant le produit ou les produits utilisés. Des bases de données contiennent des données pertinentes normalement réparties en catégories spécifiques. D'autres données sont les données des recensements et les données démographiques

Pour chaque scénario devant être analysé par HAZARD I une quantité significative d'informations est nécessaire. Un échantillon des données nécessaires est présenté en table 2. Le scénario entier devra être défini avant de rentrer les données. S'il y a plus d'un scénario concerné ils devront également être développées en premier. Une étude de la variation de sensibilité des résultats sur un ou plusieurs paramètre est recommandée mais ceux-ci ne seront définitifs qu'après une première analyse du scénario de base.

Table 2 DESCRIPTION DE SCENARIO D'UTILISATION DE HAZARD	
Description de l'immeuble ou du site	
1-Nombre de pièces 2-Dimension des pièces 3-Dimension des ouvertures entre pièces (portes,fenêtres...) 4-Construction des Plafonds murs et planchers 5-Présence et location des détecteurs et gicleurs	
Description du feu	
1-Description de tous les éléments combustibles de la pièce d'origine matériaux et poids de chacun. Dimension de chaque élément Situation de chaque élément dans la pièce. 2-Source d'inflammation Description (matériel et quantité) Situation en regard de l'élément qui allume le feu 3-Extension de la propagation du feu Un seul élément Une partie de la pièce Toute la pièce	
Description des occupants	
1-Nombre d'occupants 2-Age et sexe 3-Limites mentales et physiques 4-Position et condition au moment du feu	

7.1.3 ETAPÉ 3 CALCUL DU DANGER

Le but est de fournir le meilleur état de l'art des estimations ou informations techniques sur la contribution du produit pour l'ensemble des dangers du feu en général et en particulier pour les dangers de toxicité des fumées pour chaque scénario concerné. Il est préférable pour ces sorties d'être exprimées en terme quantifiable tels que morts, blessures ou dommages étendus, ainsi ils peuvent être reliés aux critères établis à l'étape 1 et appliqués à l'étape 4. Chacun voudra

essayer ses mesures individuelles telles que le temps d'inflammation, le temps d'évacuation, les pointes de températures, l'inflammabilité, ou tout autre indice qui permet une prise de décision à travers l'ensemble des performances du produit.

Une fois que les détails du problème ont été définis l'interface utilisateur FAST_in est activé. Ce programme crée le fichier d'entrée nécessaire pour utiliser le modèle de transport FAST. Il permet à l'utilisateur de travailler soit en unités Anglaises soit en unité métrique (SI) requise par FAST. Les sorties de FAST sont des sorties métriques uniquement, cependant FAST_in effectue un test d'erreur sur la cohérence des données d'entrées et avise l'utilisateur sur d'éventuels problèmes.

Le modèle de transport FAST fonctionne en "batch" plutôt qu'en mode interactif. Contrairement à son nom le modèle prend un temps significatif pour s'exécuter. Plus le cas est complexe plus le temps de simulation est long aussi l'utilisateur devra être patient. Ce modèle réalise une impression d'un résumé des sorties à des intervalles de temps défini par l'utilisateur dans FAST_in. Ces données tabulées peuvent être dirigées soit vers l'écran ou l'imprimante soit vers un fichier pour une impression différée. Cette version FAST supporte aussi un run-time graphique qui est facilement activée à partir de FAST_in. L'utilisateur se souviendra de ne pas envoyer les sorties imprimantes vers l'écran si le graphique est actif. Les graphiques par défaut sont la température de la couche haute, la position de l'interface (limite entre les deux couches), la concentration d'oxygène de la couche haute et la chaleur atteinte. Les dessins affichés par le run-time graphique peuvent être rendus conviviaux en éditant les spécifications graphiques du fichier d'entrée tel que celui construit dans le système .

7.2 FAST

7.2.1 THEORIE

FAST est un membre de la classe des modèles référencés comme un modèle à zone ou volume contrôlé. Ceci signifie que chaque espace ou pièce est divisé en un nombre limité (normalement deux) de volume appelé couche chacune d'entre-elle étant supposée uniforme. Ceci suppose que la température, les concentrations de fumée et de gaz dans chaque couche sont les mêmes à chaque point. Puisque ces couches représentent les parties hautes et basses de la pièce, cela indique que les conditions dans la pièce varient du plancher au plafond et non horizontalement. Ces hypothèses sont basées sur des observations expérimentales telles que dans un feu. Nous pouvons mesurer les variations de conditions dans les couches, celles-ci sont généralement petites comparées aux différences entre les couches.

FAST est basé sur la résolution d'un ensemble d'équations prédisant les changements dans l'énergie (la température) et la masse (la fumée et les concentrations de gaz) sur des petits intervalles de temps.

Ces équation sont des équations de conservation pour l'énergie, la masse et aussi les lois idéales des gaz pour la chimie.

Ces équations sont toujours vérifiées n'importe où. Ainsi les erreurs qui peuvent être commises par le modèle ne proviennent pas de ces équations, mais proviennent plutôt des hypothèses simplificatrices ou à partir des sorties du processus parce que nous ne savons pas bien les incorporer. Des exemples de telles sources d'erreurs seront soulignés au cours de la présentation.

7.2.2 LE FEU

Le feu est une source de fuel, défini à un taux spécifié par l'utilisateur. Ce fuel est converti en énergie (le facteur de conversion est la chaleur de combustion) et en masse (le facteur de conversion est le champ particulier des espèces) alors qu'il brûle. La combustion prendra entièrement place dans le feu pour une combustion non contrainte ou libre (type 1), ou pour un feu contraint s'il n'y a pas assez d'oxygène entraîné dans la plume pour consumer toute la masse réalisée. Pour un feu contraint où il n'y a pas assez d'oxygène entraîné dans la plume du feu, le fuel non brûlé se déplacera successivement à l'intérieur de la plume et brûlera, ira dans la couche haute du feu, la couche haute de la pièce en feu, la plume de l'ouverture de porte vers la pièce suivante, la plume de l'ouverture de porte vers la troisième pièce et ainsi de suite jusqu'à qu'il atteigne l'extérieur ou qu'il soit consummé.

Cette version de FAST ne prédit pas le développement du feu. Alors l'utilisateur doit donner en entrée l'historique du feu. La similitude de ces entrées avec un problème réel de feu déterminera la précision des résultats de calcul.

7.2.3 LA PLUME

Au-dessus de chaque objet qui brûle, se forme une plume qui n'est pas considérée comme faisant partie d'une couche, mais qui agit comme une pompe pour le déplacement de l'énergie (température) et masse (fumée et gaz) de la couche basse vers la couche haute (vers le haut seulement). Pour la plume du feu FAST n'utilise pas une approximation point de source, mais utilise plutôt une corrélation empirique (issue de données expérimentales).

La plume est supposé être le seul mécanisme pour le déplacement de l'énergie et de la masse entre les couches dans la pièce. Ceci n'est pas tout à fait correcte. Alors que l'expérimentation démontre qu'il y a un léger mixage entre les couches à leur limites (appelé interface), les sources de convection comme les radiateurs ou diffuseurs de chaleur et les systèmes d'air conditionné, et le flux descendant dû au refroidissement des murs, entraîneront un tel mixage. Ceci sont des exemples de phénomènes qui ne sont pas pris en compte car les théories sont encore en développement.

Les autres sources de mixage entre les couches qui sont incluses dans FAST apparaissent aux ouvertures des portes et fenêtres. Ici il y a un mixage aux limites de mouvement de flux entre l'intérieur et l'extérieur d'une pièce. Le degré de mixage est basé sur une relation de mixage semi-empirique. A la fois les flux extérieurs et intérieurs entraînent de l'air des couches environnantes. Le flux de sortie d'une ouverture est aussi modélisé comme une plume (appelé plume de porte ou jet), et en fait utilise les mêmes équations que la plume du feu, avec néanmoins deux différences.

Premièrement, une source ponctuelle est calculée (pour prendre en compte l'entraînement sans ouverture) et deuxièmement, les équations sont modifiées pour prendre en compte la géométrie rectangulaire des ouvertures en comparaison de la géométrie circulaire de la plume du feu. Toutes les plumes entraînent de l'air à partir de leur environnement en accord avec les relations d'entraînement semi-empiriques. C'est l'entraînement du froid et de l'oxygène contenu dans l'air qui ajoutent de l'air à la plume et permettent ainsi à l'oxygène de brûler, et qui cause son expansion et son déplacement vers le haut (sous la forme d'un cône inversé). La plume est supposée être non affectée par d'autres flux qui peuvent apparaître. Ceci étant si l'objet qui brûle est près d'une porte, le flux d'air perturbateur entraînera un déplacement de l'axe de la plume par rapport à la verticale. De tels effets ne sont pas pris en compte.

7.2.4 LES COUCHES

Comme précisé plus haut, chaque pièce est divisée en deux couches, la couche haute et la couche basse. Au début de la simulation, les couches dans chaque pièce sont initialisées aux conditions ambiantes et chaque zone haute est positionnée à 0,001 du volume de la pièce (un volume arbitraire, même très petit, évite les problèmes de la division par zéro). Comme la masse et

l'énergie sont aspirées vers la couche haute par la plume du feu, l'expansion de la plume entraîne une diminution de la couche basse en volume et l'abaissement de l'interface. Si la porte vers la prochaine pièce a un dessus, il peut ne pas avoir de flux à travers elle jusqu'à ce que l'interface n'atteigne le bas du dessus de porte. Ainsi dans les étapes suivantes l'expansion de la couche supérieure agira comme un piston, poussant la couche basse vers la pièce suivante à travers la porte.

Une fois que l'interface atteint le niveau du seuil, une forme de plume de porte et un flux de la pièce en feu vers la pièce suivante sont initiés. Ceci crée un flux correspondant de la seconde pièce vers la pièce en feu dans la partie basse de la porte pour entraîner l'air allant à l'extérieur. Tous ces flux sont entraînés par des différences de pression et des différences de densité qui résultent des différences de température et des différences de profondeur de couches. Ainsi la clé pour obtenir un flux droit est de distribuer correctement les énergies et les masses entre les couches.

7.2.5 TRANSFERT DE CHALEUR

Le transfert de chaleur est le mécanisme par lequel l'énergie est distribuée. Les transferts convectifs apparaissent à partir des couches vers les surfaces de la pièce. L'énergie ainsi transférée passe à travers les murs, le plafond ou le plancher dans des directions perpendiculaires aux surfaces seulement. FAST est plus avancé que la plupart des autres modèles dans ce domaine puisqu'il permet d'utiliser différents matériaux pour les plafonds, les planchers et les murs de chaque pièce (cependant tous les murs de la pièce doivent être les mêmes). De plus FAST permet uniquement trois couches distinctes (chacun avec ses propriétés et épaisseurs) pour chaque surface, qui sont traitées séparément dans le calcul de conduction. Ceci ne donnant pas de résultat plus précis, mais permet aux utilisateurs de traiter naturellement avec les constructions actuelles. Les propriétés thermophysiques de matériaux sont supposés être constant, bien que nous sachions qu'elles varient avec la température. Cette hypothèse est faite parce que les données au-dessus des gammes de températures requises sont rares même pour les matériaux communs, et parce que les variations sont relativement faibles pour la plupart des matériaux. Cependant l'utilisateur reconnaîtra que quelques matériaux changent de propriétés mécaniques avec la température. Ces effets ne sont pas modélisés.

Les transferts radiatifs apparaissent entre le feu et les couches de gaz, entre les couches, et entre les couches et les surfaces de la pièce. Ces transferts sont une fonction de la différence de température et de l'émissivité. Pour le feu et une surface typique, les valeurs de l'émissivité varient seulement dans une faible plage, ainsi les valeurs utilisées ne sont pas trop éloignées. Pour les couches de gaz, cependant, l'émissivité est une fonction de la concentration d'espèces qui sont de mauvais radiateurs : en prédominance les particules de fumée, le dioxyde de carbone

et l'eau. De telles erreurs dans la concentration d'espèces entraînent des erreurs dans la distribution d'énergie à travers les couches, qui résultent en erreurs de température, entraînant des erreurs dans les flux. Nous allons maintenant commencer à voir comment relier les prédictions faites par FAST .

7.2.6 CONCENTRATION D'ESPECES

Lorsque les couches sont initialisées au début de la simulation, leurs propriétés sont définies aux conditions ambiantes. Celles ci sont la température définie par l'utilisateur, et les concentrations qui sont 23% par masse (21% par volume) d'oxygène , 77% par masse (79 % par volume) d'azote, et une concentration en masse d'eau spécifiée par l'utilisateur comme humidité relative , puis une concentration nulle pour les autres espèces. Comme le feu brûle, des espèces variées sont produites en relation directe avec la masse de fuel brûlé (cette relation est le champ des espèces définie par l'utilisateur pour le fuel brûlé). Puisque l'oxygène est consumé plutôt que produit par la combustion, le "champ" d'oxygène est négatif et, est positionné de façon interne à la somme correspondante d'oxygène nécessaire pour que le fuel brûle.

Chaque unité de masse d'une espèce produite est transportée par le flux dans les diverse pièces et accumulée dans les couches. Le modèle garde une trace de la masse de chaque espèce dans chaque couche, et connaît le volume de chaque couche en fonction du temps. La masse divisée par le volume est la concentration en masse, qui combiné avec le poids moléculaire donne le pourcentage de concentration en volume ou en ppm selon le cas.

La version 18 de FAST utilise un schéma de combustion chimique différent des autres modèles. Tandis que les autres modèles calculent chaque concentration d'espèce avec une fraction de champ indépendant, FAST maintient un équilibre, carbone-hydrogène-oxygène avec un calcul à deux étapes. Le carbone du fuel et l'hydrogène evoluent en CO₂ et eau avec ensuite réduction en CO et C (suie) à des taux spécifiés par l'utilisateur. Cela signifie que le modèle ne peut produire plus de CO sans produire moins de CO₂ ou C et vice et versa. Ce qui devient spécialement important lorsque l'efficacité de la combustion change sous des conditions de ventilation limite pour la combustion. Les données d'entrée sur les champs des espèces sont en générale de précision limitée. Ainsi le résultat est un candidat évident pour le test de sensibilité.

7.2.7 LIMITATION

Alors que FAST a été sujet à des validations comparatives et à plusieurs séries d'expériences de la taille de plusieurs pièces, et qu'il a une possibilité raisonnable de produire des résultats approximativement près des tests expérimentaux mesure, il n'est actuellement pas possible de fournir à l'usager une instruction d'analyse précise sur la précision des prédictions faites par le modèle. Aussi il est recommandé que ce modèle et que le logiciel HAZARD I soient utilisé

pour évaluer les changements relatifs dans la prédiction des dangers plutôt que de définir un danger absolu à partir d'un seul calcul. Ainsi l'utilisateur minimisera l'impact des erreurs systématiques alors que celles-ci sont présentes dans tous les calculs à comparer.

7.3 EXITT

Après avoir obtenu les résultats de calcul du modèle FAST, le module d'évacuation EXITT est activé. Les données requises sont les dimensions des pièces et la description des occupants, données utilisées pour le tracé de l'immeuble et la prise de décision de l'étape 1. De plus les données prédictes par FAST pour la position de l'interface et la densité de fumée sont lues directement dans le fichier "DUMP" produit par FAST. Le modèle d'évacuation EXITT prédira les temps d'activation des détecteurs de fumée basés sur les données de fumée (densité de fumé et épaisseur de la couche) lues du fichier dump de FAST, ou une valeur du temps peut être rentré manuellement. Alors que le modèle DETACT est fourni pour estimer les temps d'activation des détecteurs de chaleur ou des têtes de gicleurs, l'impact de l'activation du détecteur est laissé au jugement de l'utilisateur. Le système courant d'analyse des dangers ne peut prédire le processus d'extinction pas plus que l'impact de l'arrosage sur le transport ou le refroidissement des gaz dans la couche.

Les résultats des précédents calculs sont à présent utilisés pour évaluer si les occupants ont pu s'échapper avec succès. Si ce n'est pas le cas, l'utilisateur saura si les conditions limites étaient la chaleur, la fumée ou la toxicité et, quand ces conditions sont apparues. Dans tous les cas seulement l'impact physique est prédit, et il n'y a pas d'association avec les processus mentaux et le jugement. Ceci est réalisé en exécutant le programme TENAB, lequel compare les conditions dans le temps, prédictes par le modèle FAST et la situation des occupants dans le temps prédict par le modèle d'évacuation selon les critères de résistance soulignés ci-dessus. L'environnement induit par le feu dans chaque pièce est généralement stratifié en deux couches distinctes.

La couche supérieure est généralement très chaude avec une grande concentration de gaz . Ainsi la couche à laquelle les occupants sont exposés a un impact très important sur les résultats. Dans HAZARD I chaque fois que la position de l'interface dans la pièce occupée est en dessous de 1,5 m, les occupants sont supposés être exposés aux conditions de la couche basse. Si l'interface est en dessous de 1 m les occupants sont supposés être exposés aux conditions de la couche haute. Entre 1 et 1,5 m TENAB teste la couche haute de température et sélectionne la couche haute si la température est inférieure à 50 °C, ou la couche basse si la température est au-dessus de 50 °C, supposant que l'occupant est couché ou accroupi.

Des expositions autre que la fumée sont considérées comme conditions limites et sont supposées n'avoir aucun impact sur les occupants jusqu'à ce que les limites ne soient atteintes. Alors que ceci n'est pas tout à fait vrai, l'état de l'art de l'évaluation des toxicités ne les prend pas en compte pour des concentrations intermédiaires.

L'obstruction de la fumée et ses effets sur la possibilité d'évacuation est pris en compte dans le modèle en supposant que les occupants se déplacent rapidement dans la fumée légère et plus lentement dans la fumée dense. A un certain niveau de fumée, le modèle suppose que les personnes n'entreront pas dans la pièce et ne trouveront pas d'autres issues pour s'échapper. Aucun autre effet de la fumée ne sera pris en compte.

La toxicité est prise en compte de deux façon :

1- En utilisant un temps de concentration pour la production du paramètre (C).

2- Par la méthode FED qui considère l'exposition au cyanure d'hydrogène et au monoxyde de carbone, prenant en compte l'exposition simultanée au monoxyde de carbone et à la réduction d'oxygène. Ces données de concentration de gaz sont produites par le modèle FAST lorsque les champs de ces espèces sont définies par l'utilisateur.

Pour C les valeurs de référence sont de 900 g min/m³ pour la mortalité et 450g min/m³ pour l'incapacité, ces valeurs peuvent être utilisées lorsque le matériel qui brûle est de toxicité moyenne. Ceci signifie que lorsque en utilisant des tests appropriés de toxicité de combustion, le matériel ne montre ni un potentiel extrêmement toxique(ETP) ni une réponse toxicologique non usuelle (UTR). Puisque ceci est une approximation de toxicité, il est souhaitable de définir une sensibilité des résultats en référence à la valeur de C utilisée. Ceci ne nécessite pas de simulation supplémentaire, mais seulement la détermination de la valeur cumulative de C pour chaque occupant au moment où ils quittent l'immeuble. La valeur de référence donnée ci-dessus divisée par la valeur maximum accumulée représente le facteur de sécurité pour l'estimation.

L'évaluation de l'impact du monoxyde de carbone, du cyanure d'hydrogène et du bioxyde de carbone avec la réduction de l'oxygène, représente la première version de l'évaluation technique de la toxicité référencée comme modèle :"N-Gaz". Lorsque la valeur calculée de FED atteint 1, on suppose que l'état de mort apparaît; à la valeur 0,5 on suppose l'incapacité. Un autre ensemble de critères de "défendabilité", basé sur les travaux de Purser avec un primate non humain, est utilisé par TENAB pour évaluer l'incapacité seulement. Pour l'ensemble des approches C et FED, les données utilisées sont les doses d'exposition (intégration du temps d'exposition), et ils sont ainsi cumulatif dans le temps. Ainsi, le changement d'exposition d'un occupant se déplaçant dans l'immeuble ou pris dans une couche descendente sont totalisés par sommation (intégration) de ces concentration dans le temps par TENAB. Ainsi par exemple un occupant est initialement exposé à la couche basse jusqu'à ce que l'interface atteigne la hauteur de sa tête. Le temps pour que ceci apparaisse est obtenu à partir des données sur l'interface de cette pièce Ainsi l'exposition à n'importe quel moment est égale à la valeur de l'accumulation de C jusqu'à ce temps. Lorsqu'il y a déplacement de pièce à pièce la dose

d'exposition accumulée pour chaque pièce est calculée. L'exposition totale est la somme des doses d'exposition accumulées dans chaque pièce jusqu'à ce que l'occupant quitte l'immeuble. La même technique est utilisée pour les données FED.

7.4 ETAPE 4 EVALUATION DES CONSEQUENCES

Dans cette étape finale , les résultats obtenus pour le produit sont analysés en tenant compte des critères établis dans l'étape 1. Ceci permet des comparaisons avec une acceptation pratique et la base de données. La sensibilité des paramètres clés est testée. Tous les scénarios sont testés et une décision finale est prise. Il doit aussi être décidé si tous les scénarios pertinents ont été considérés, si les résultats ont un sens et si des étapes additionnelles sont nécessaires en regard des limitations de la méthode employée.

Tandis que les résultats sont en termes absolus (les occupants morts ou vivants), il faut leur donner un sens relatif. Aussi, puisque le système d'analyse de dangers est encore à un stade expérimental, l'impact des erreurs de méthodologie peut affecter la validité des résultats comparés provenant de deux simulations. Ainsi, le système est mieux utilisé en examinant la différence des résultats avec et sans le produit en question ou quand le produit est remplacé par une alternative traditionnelle. Les exemples représentatifs fournis peuvent constituer une base de départ.

De plus on observera que la plupart des données spécifiées le sont par l'utilisateur et la sensibilité des résultats à cette hypothèse devra être examinée. Si les résultats sont très sensibles à une entrée précise une étude complémentaire devra être entreprise pour affiner l'estimation afin d'avoir une meilleur confiance dans les résultats prédits.

Finalement les résultats d'une analyse doivent être interprétés par un expert en établissant des comparaisons avec des cas similaires.

CAPITRE VIII

8 UN SYSTEME EXPERT HIERARCHIQUE POUR LA SIMULATION INCENDIE

8.1 DONNEES DU PROBLEME

Comme on a vu précédemment, il existe plusieurs logiciels permettant de simuler le comportement du feu quant à sa propagation et quant aux produits de combustion dégagés.

A moins d'être un utilisateur quasi-journalier de ces logiciels, l'élaboration du scénario pré-requis à toute simulation et le choix du modèle de simulation le plus approprié nécessite beaucoup de labeur.

Ceci se traduit par des pertes de temps. En effet, la définition d'un scénario à partir d'une situation donnée requiert une grande quantité d'informations qu'il faut savoir ordonner et les nombreux logiciels spécialisés demandent de bien les connaître pour procéder à un bon choix.

Ces raisons ont conduit à proposer un système expert pour aider à bâtir le scénario et à choisir les modèles de simulation. Puisqu'il s'agit de domaines de connaissances différentes, on voit que le système expert général va se composer de sous-systèmes experts spécialisés formant entre eux une hiérarchie. D'où l'apparition du sigle SEHMSI (Système Expert Hiérarchisé de Modélisation et Simulation Incendie).

Quatre types de systèmes experts différents s'intègrent dans l'architecture de SEHMSI. Elle compte (figure 8) l'expert superviseur, l'expert d'élaboration de scénarios, l'expert de choix de modèles et l'expert de simulation.

L'expert superviseur a pour rôle le bon déroulement de l'opération en prenant en compte l'ordonnancement des tâches et l'interaction entre les systèmes experts d'exécution de celles-là.

L'expert d'élaboration de scénarios voit à la compilation systématique des données, correspondant à l'énumération de la figure 9. Il procède par questions et réponses puis édite le scénario définitif.

Selon le scénario qui lui est fourni, l'expert de choix de logiciels de simulation est activé pour choisir le modèle le plus approprié.

Comme les résultats produits par ces logiciels de simulation requièrent la compétence d'experts humains pour leur interprétation, l'expert de simulation vient se substituer à eux pour dégager les conséquences d'un incendie sous une forme facilement compréhensible.

8.2 DEFINITION DU SCENARIO

Le problème posé reprend les données définies en table 4.

8.3 CHOIX DU LOGICIEL DE SIMULATION

Une fois le scénario élaboré, l'outil expert de choix de logiciels de simulation sera activé pour choisir le modèle le plus approprié. Chacun des logiciels décrits précédemment ayant des propriétés différentes, l'expert base son choix en comparant les exigences découlant du scénario avec ces propriétés

8.4 SIMULATION

La simulation proprement dite s'effectue en montrant à l'écran l'évolution du feu. Toutefois l'interprétation des résultats requièrent les connaissances d'un expert. Ceci conduit à définir un outil de comparaison et d'analyse des résultats sous la forme d'un système expert.

8.4.1 STRUCTURATION DES CONNAISSANCES

Préalablement à la présentation de l'arbre d'inférence de ce système expert, rappelons quelques notions sur la structuration des connaissances.

Fonctionnement des systèmes experts

Pour les systèmes experts, il existe essentiellement deux stratégies de recherche qui mènent aux conclusions: *le chaînage arrière* et *le chaînage avant*. Un système expert qui utilise le chaînage arrière tente de prouver qu'une valeur de son but est vraie. Pour cela la recherche s'effectuera sur des règles qui influent sur le but avec une valeur de leur conclusion (la partie ALORS). Toutefois pour pouvoir utiliser cette règle, le système expert doit vérifier la validité des valeurs de ses conditions (la partie SI). Pour cela le système expert cherchera d'autres règles qui affectent les valeurs des objets de la partie SI des règles en amont. Ce processus, appelé chaînage arrière continue jusqu'à ce que le système expert puisse établir une valeur du but.

A l'opposé, le chainage avant implique un départ de la partie SI avec une règle correspondant à la valeur de l'objet donné en fait, et de considérer la partie ALORS également comme un fait. Le système recherche les règles dont les parties SI satisfont les faits précédents et acceptés, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la valeur du but puisse être établie comme vraie.

8.4.2 OBJETS

Avant de construire l'arbre d'inférence les paramètres importants du domaine seront identifiés avec leurs objets. Un objets ne sera considéré que si ses valeurs contribuent à mener l'expert à une décision.

Supposons par exemple que l'objet A est le but du système et les objets B et C déterminent ce but. Par ailleurs, C est dépendant des valeurs des objets D et E. Par conséquent B et C sont des enfants de A, et D et E sont des enfants de C. La figure 7 représente les dépendances entre les enfants objets.

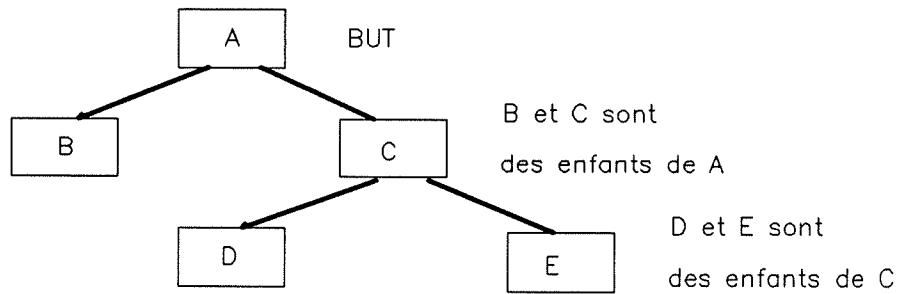


Figure 7 OBJETS

8.5 ARBRE D'INFERENCE

La résolution d'un problème impliquera d'organiser les différents paramètres, c'est-à-dire les objets, desquels dépend la solution.

On s'est servi de SOPHOS [Cognisis 90] pour élaborer l'arbre d'inférence et générer ses règles. L'intégration de ces différents concepts se traduit par l'arbre d'inférence suivant:

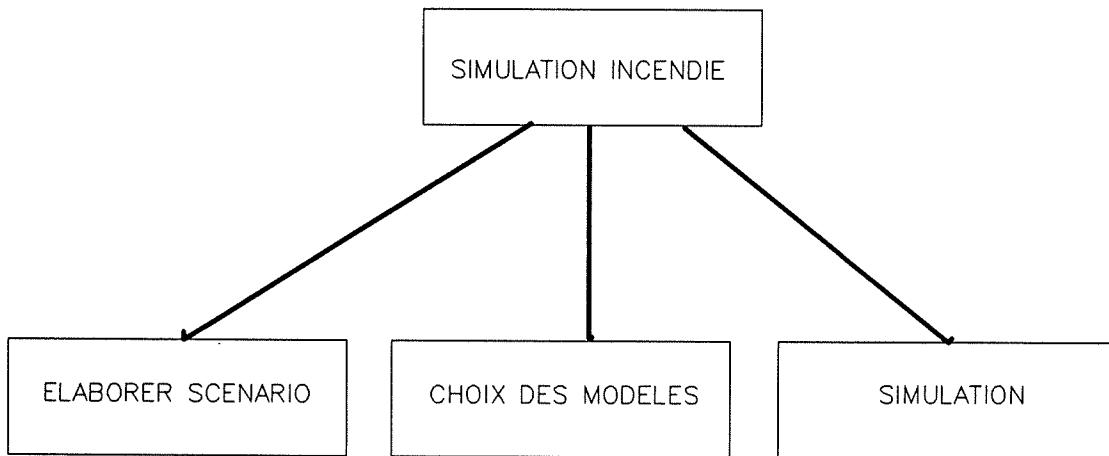


Figure 8 STRUCTURE DE SEHMSI

Cet arbre d'inférence global peut se subdiviser en systèmes experts d'élaboration de scénarios, de choix de modèles, de simulation et d'analyse des résultats de simulation.

La figure 9 illustre l'arbre *d'élaboration d'un scénario* tandis que la figure 10 présente un exemple d'un arbre de *choix de modèles*.

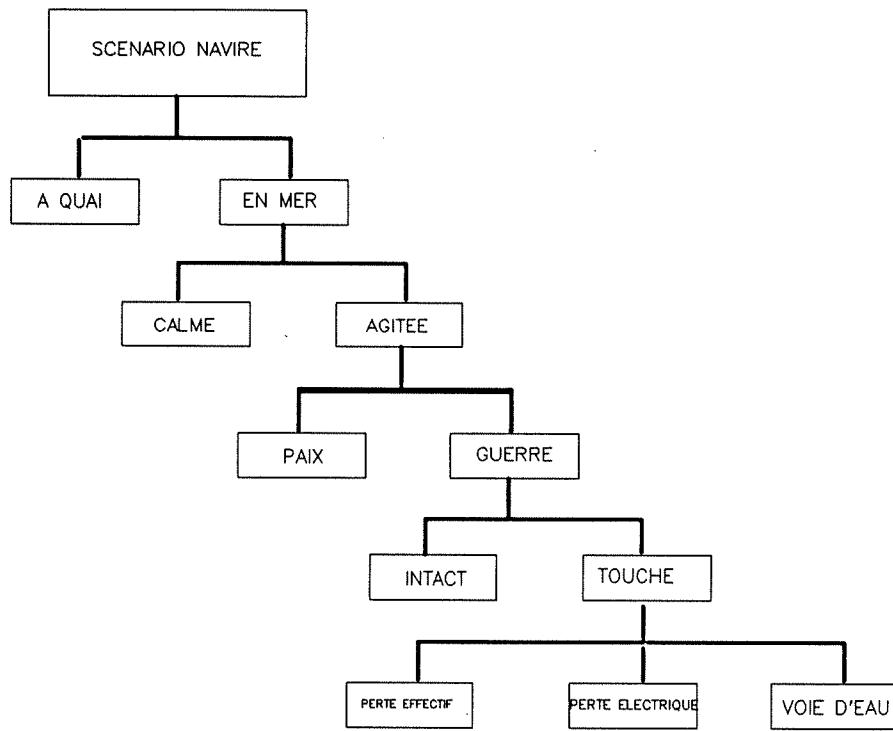


Figure 9 EXEMPLE DE SCENARIO POUR UNE SITUATION DE NAVIRE

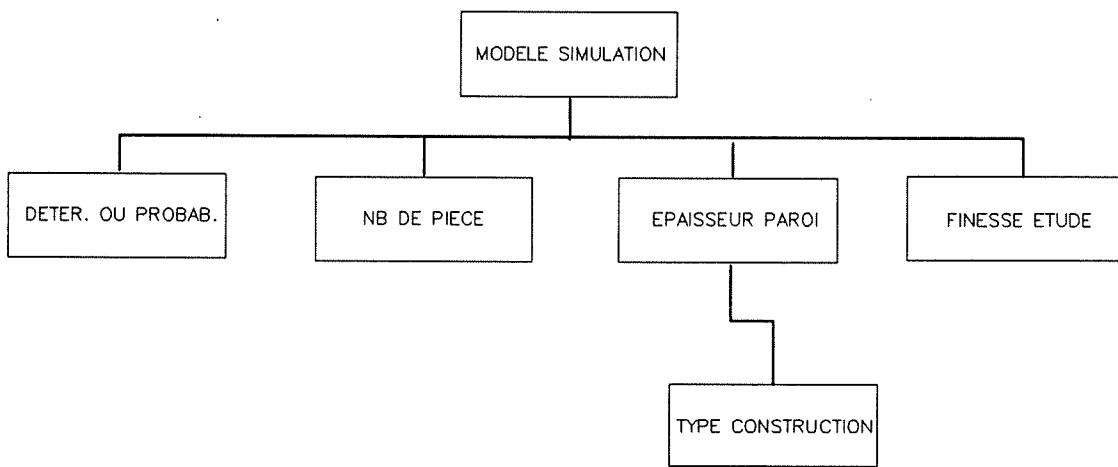


Figure 10 EXEMPLE D'ARBRE DE CHOIX DE MODELES

8.5.1 VALEUR DES OBJETS

Ayant élaboré l'arbre d'inférence de l'expert *choix du modèle*, on peut donner à présent la valeur de ses objets.(Tableau 11) et des règles qui sont la combinaison de leur différentes valeurs (Tableau 12).

TABLEAU 11 VALEURS DES OBJETS

NOM (1) : Modèle de simulation TYPE : Symbolique PERMET DETERMINER : Aucun OBJETS ENFANTS : Déterministe ou Probabiliste Nombre de pièces Epaisseur paroi Finesse de l'étude VALEURS POSSIBLES : FIRST II, FAST, NAVFIRE, HAVARD VI	NOM (2) : Déterministe ou Probabiliste TYPE : Symbolique PERMET DETERMINER: Modèle simulation OBJETS ENFANTS : Aucun VALEURS POSSIBLES : Déterministe Probabiliste
NOM (3) : Nombre de pièces TYPE : Numérique PERMET DETERMINER: Modèle simulation OBJETS ENFANTS : Aucun VALEURS POSSIBLES : >1 =1	NOM (4) : épaisseur paroi TYPE : Symbolique PERMET DETERMINER: Modèle simulation OBJETS ENFANTS : Type de construction VALEURS POSSIBLES : parois fines parois épaisses
NOM (5) : Type de construction TYPE : Symbolique PERMET DETERMINER : Epaisseur paroi OBJETS ENFANTS : Aucun VALEURS POSSIBLES : Edifice, Entrepot, Navire	NOM (6) : Finesse de l'étude TYPE : Symbolique PERMET DETERMINER: Modèle simulation OBJETS ENFANTS : Aucun VALEURS POSSIBLES : Étude générale, Etude détaillée

8.5.2 REGLES

Associé à l'arbre d'inférence de l'expert de "choix de modèles", on a les règles d'attribution dont le fichier apparaît en tableau 12

TABLEAU 12 FICHIER DES REGLES:

REGLE No. 1 SI Déterm ou prob EST DETERMINISTE Nombre de pieces EST = 1 Epaisseur de paroi EST Parois fines Finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST FIRST II	REGLE No. 2 SI Déterm ou prob EST PROBABILISTE Nombre de pieces EST = 1 Epaisseur de paroi EST Parois fines Finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST NAVFIRE
REGLE No. 3 SI Déterm ou prob EST DETERMINISTE Nombre de pieces EST > 1 Epaisseur de paroi EST Parois fines Finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST HARVARD VI	REGLE No. 4 SI Déterm ou prob EST PROBABILISTE Nombre de pieces EST > 1 épaisseur de paroi EST Parois fines finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST NAVFIRE
REGLE No. 5 SI Déterm ou prob EST DETERMINISTE Nombre de pieces EST = 1 Epaisseur de paroi EST Parois épaisses Finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST FIRST I	REGLE No. 6 SI Déterm ou prob EST PROBABILISTE Nombre de pieces EST = 1 épaisseur de paroi EST Parois épaisses finesse de l'étude EST Etude générale ALORS Modèle simulation EST NAVFIRE

<p>REGLE No. 7</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST DETERMINISTE</p> <p>Nombre de pieces EST > 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois épaisse</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude générale</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST HARVARD VI</p>	<p>REGLE No. 8</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST PROBABILISTE</p> <p>Nombre de pieces EST > 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois épaisse</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude générale</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST NAVFIRE</p>
<p>REGLE No. 9</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST DETERMINISTE</p> <p>Nombre de pieces EST = 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois fines</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude générale</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST FIRST II</p>	<p>REGLE No. 10</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST PROBABILISTE</p> <p>Nombre de pieces EST = 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois fines</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude générale</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST NAVFIRE</p>
<p>REGLE No. 11</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST DETERMINISTE</p> <p>Nombre de pieces EST > 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois fines</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude détaillée</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST HARVARD VI</p>	<p>REGLE No. 12</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST PROBABILISTE</p> <p>Nombre de pieces EST > 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois fines</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude détaillée</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST NAVFIRE</p>
<p>REGLE No. 13</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST DETERMINISTE</p> <p>Nombre de pieces EST = 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois épaisse</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude détaillée</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST FIRST I</p>	<p>REGLE No. 14</p> <p>SI</p> <p>Déterm ou prob EST PROBABILISTE</p> <p>Nombre de pieces EST = 1</p> <p>Epaisseur de paroi EST Parois épaisse</p> <p>Finesse de l'étude EST Etude détaillée</p> <p>ALORS</p> <p>Modèle simulation EST NAVFIRE</p>

REGLE No.15 SI Déterm ou prob EST DETERMINISTE Nombre de pieces EST > 1 Epaisseur de paroi EST Parois épaisse Finesse de l'étude EST Etude détaillée ALORS Modèle simulation EST HARVARD VI	REGLE No.16 SI Déterm ou prob EST PROBABILISTE Nombre de pieces EST > 1 Epaisseur de paroi EST Parois épaisse Finesse de l'étude EST Etude détaillé ALORS Modèle simulation EST NAVFIRE
REGLE No. 17 SI Type de construction EST Edifice ALORS épaisseur de paroi EST Parois épaisse	REGLE No. 18 SI Type de construction EST Entrepot ALORS épaisseur de paroi EST Parois épaisse
REGLE No. 19 SI Type de construction EST Navire ALORS épaisseur de paroi EST Parois fines	

8.6 RESULTATS

Utilisant l'outils expert VPX et appliquant ces règles concernant le choix d'un logiciel de simulation, on a pu réduire le temps requis pour la prise de décision par l'utilisateur et rendre très conviviale l'inter-action homme-machine. Le système expert de choix de logiciels procède en posant des questions sur l'écran et selon les réponses indiquées par l'utilisateur au moyen soit d'un curseur (flèche sur la figure 13). Puis il affiche ses recommandations au bas de l'écran selon les réponses.

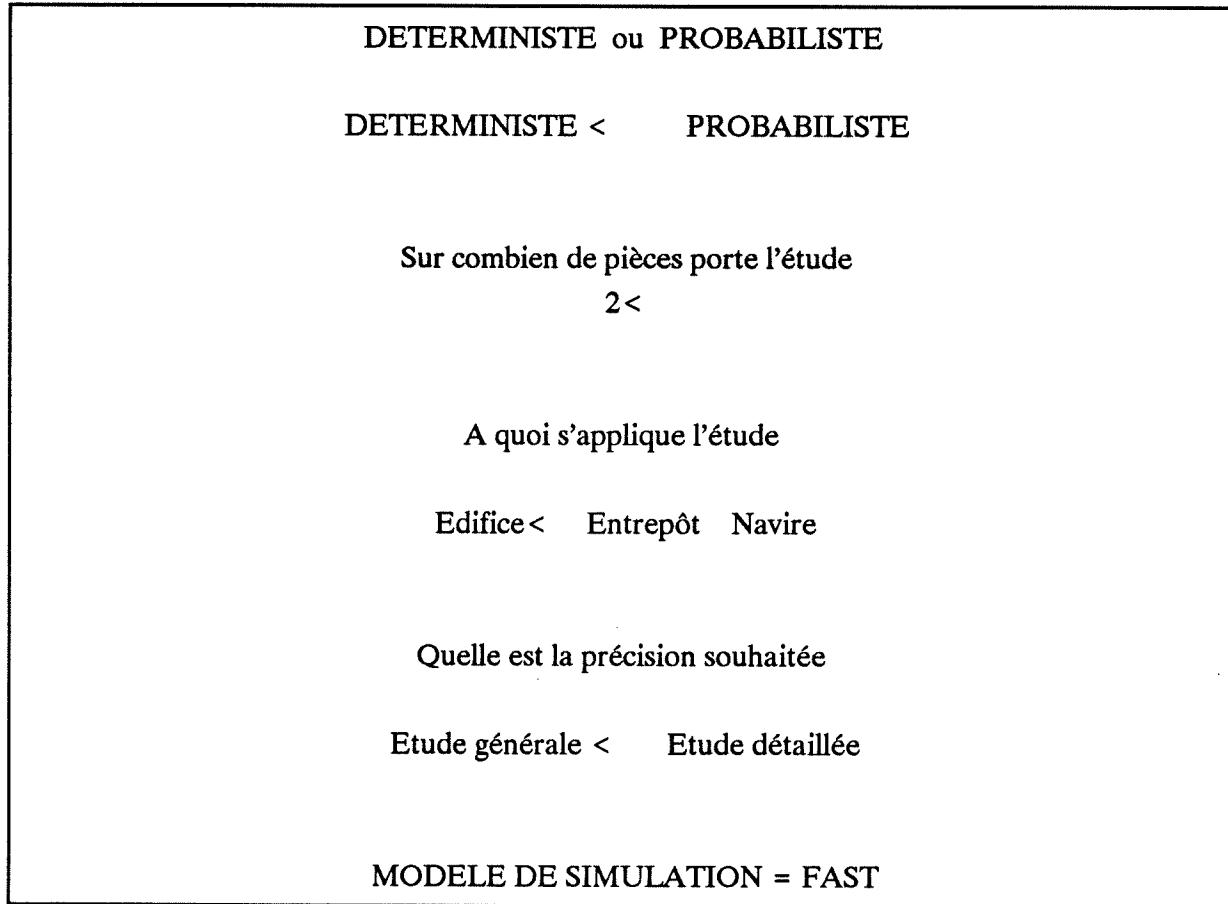


Figure 13 AFFICHAGE DE L'EXPERT "CHOIX DE MODELES"

8.7 CONCLUSION

Devant la complexité des problèmes de simulation incendie, on présente quelques modèles de simulation (liste non exhaustive) chacun avec ses particularités et ses limites. Un prototype de logiciel intégré est examiné.

Or on constate que pour un utilisateur non expert en incendie la difficulté d'utilisation est très grande. Aussi il nous est apparu nécessaire de proposer une philosophie d'approche de résolution des problèmes de simulation incendie à l'aide de systèmes experts. Cette approche montre l'intérêt d'une intégration générale des différentes procédures tant au niveau procédurale que déclaratif.

On propose donc un prototype de système expert pour aborder plus facilement les études de risques incendies. Un premier découpage fait apparaître un système hiérarchisé à deux niveaux. Cet outil étant une aide à la prise de décision

BIBLIOGRAPHIE

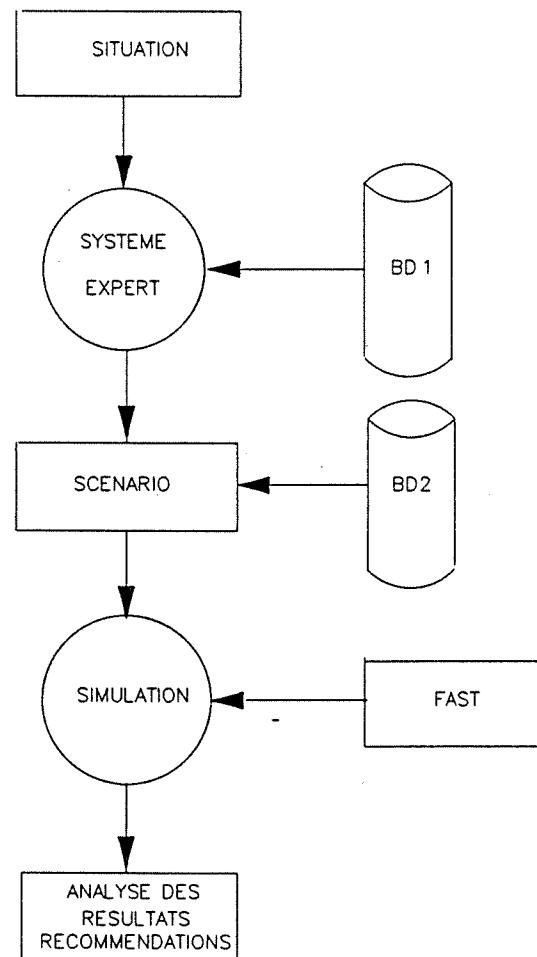
- [Bukowski 89] Bukowski R. B., Peacock R.D., Jones, W.W. & Forney, C.L. : *Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method*. Handbook 146 Volume II, U.S. National Institute of Science and Technology, Gaithersburg, MD 1989.
- [Bukowski 89] Bukowski R. B., Peacock R.D., Jones, W.W. & Forney, C.L. : *Software User's Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method*. Handbook 146 Volume I, U.S. National Institute of Science and Technology, Gaithersburg, MD 1989.
- [Bukowski 89] Bukowski R. B., Peacock R.D., Jones, W.W. & Forney, C.L. : *Software User's Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method*. Handbook 146 Volume III, U.S. National Institute of Science and Technology, Gaithersburg, MD 1989.
- [Camarero 89] Camarero et al : *Guide d'utilisation de CHLOE*. Ecole Polytechnique de Montréal, 1989.
- [Evan 85] Evan d. Stroup D.W.: *Methods to Calculate the Reponse Time of Heat and Smoke Detectors*. NBSIR 85-3167 US NBS 1985.
- [Greuer 85] Greuer R.E : *Modeling the Movementof Smoke and the Effect of Ventilation Systems in Mines Shaft Fires*. Fire Safety Journal, Vol 9 N° 1 2 May/June 1985.
- [Jones 89] Jones, W.; Peacock, R : *Technical Reference Guide for FAST Version 18*, National Institute of Standard and Technology, Note 1262; 1989 May.
- [Levine 89] Levine B.M.: *A Simulation Model of Occupant Decision and Action in Residential Fires*, National Bureau of Standard USA 1989.
- [Malek 87] Malek D.E.: *Performance Evaluation under Intoxicating Atmospheres*. Fundamental and Applied Toxicology 8: 1987.
- [Mitler 81] Milter, H.; Emmons H.: *Documentation for CFC V the Fifth Harvard Fire Code*. Natonal Bureau of Standard (U.S.) NBS CGR 81-344; 1981 October.
- [Mitler 87] Milter, H.; Rockett, J.A. : *User's Guide to FIRST, a Comprehensive Single Room Fire Model*. National Bureau of Standard (U.S.) NBSIR 87-3595; 1987 September.
- [Tewarson 82] Tewarson A.: *Quantification of Fire Properties of Fuels and Interaction with Fire Environnements*. National Bureau of Standard (U.S.) NBS GCR 82-395; 1982 June.
- Marque déposée Cognisys.
- Marque déposée Paperback.

ANNEXE

1 PROJET

Définir les paramètres d'une simulation incendie correspondant le mieux à une situation caractéristique donnée impliquent une démarche dont les grandes lignes seraient les suivantes:

ORGANIGRAMME



BD1 PARAMETRS DE LA SITUATIONS

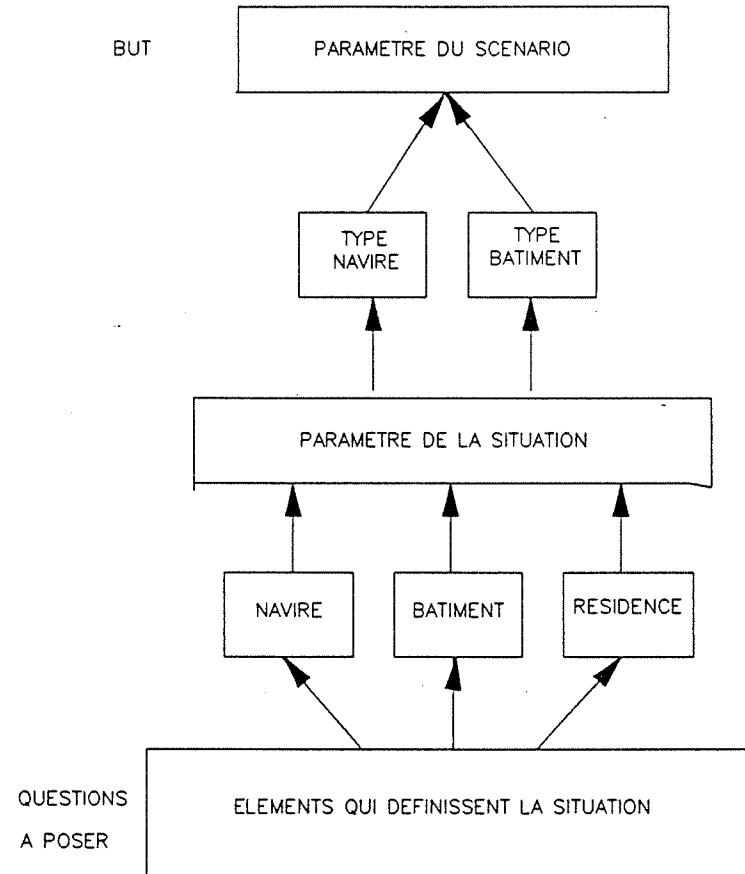
BD2 CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS DE LA SITUATION

1.1 INTRODUCTION DONNEES DU PROBLEME

1.1.1 DESCRIPTION

1.1.1.1 Projet complet

1.1.1.2 Projet pilote



1.2 METHODOLOGIE

1.2.1 ETAPES

1.2.2 DEVELOPPEMENT DU SYSTEME EXPERT PILOTE

1.2.3 SIMULATION

1.2.4 INTERPRETATION DES RESULTATS

1.3 RESULTATS

1.3.1 SITUATIONS ETUDIABLES

1.3.2 SYSTEME EXPERT (Maquette)

1.3.2.1 ARBRE D'INFERENCE

1.3.2.2 OBJET VALEUR

1.3.2.3 REGLES

1.3.2.4 RESULTATS DU SYSTEME EXPERT (Scénario)

1.3.2.5 RESULTATS DE LA SIMULATION

1.3.2.6 CONCLUSION

1.3.3 RESSOURCES Temps Matériel

1.4 PERSPECTIVES FAISABILITE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289641 1