



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ EL'HADJ LAKHDAR BATNA



INSTITUT D'HYGIENE ET SECURITE INDUSTRIELLE

Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI)

MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MAGISTER

EN

HYGIENE ET SECURITE INDUSTRIELLE

OPTION : GESTION DES RISQUES

PAR

CHETTOUH Samia, Epouse Mr. BENAROUA Khemissi
Ingénieur en Hygiène et Sécurité Industrielle

**MODELES NUMERIQUES POUR L'EVALUATION DES EFFETS
DE L'INCENDIE SUR L'ENVIRONNEMENT ATMOSPHERIQUE
*APPLICATION DES LOGICIELS : FLUENT, ALOHA***

Soutenu le 29 Octobre 2009

Devant le Jury :

Mr. Mebarek DJEBABRA, professeur à l'université de Batna	Président
Mr. Noureddine BOURMADA, professeur à l'université de Batna	Rapporteur
Mr. Abd Elbaki DJEBAILI, professeur à l'université de Batna	Examineur
Mr. Mahmoud OMARI, professeur à l'université de Biskra	Examineur
Mme. Rachida HAMZI, chargé de cours à l'université de Batna	Invité

Année 2009

Remerciement

*C*hacun sait qu'un travail de recherche, c'est long et que ce n'est pas l'histoire d'une seule personne. Je tiens donc à remercier ici tous ceux qui ont contribué plus ou moins directement à ce que je parvienne au bout de ce manuscrit.

Ce travail a été effectué à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle, au sein du Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI), Batna, dirigé par monsieur le professeur Mebarek Djebabra.

Mes premiers remerciements vont tout naturellement à l'encadreur de ce mémoire, Dr. Nourddine Bourmada, professeur à l'institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle, qui m'a fait confiance en me confiant ce sujet et m'a guidé dans mon périple scientifique. Par ses conseils et sa disponibilité, il a rendu ces deux dernières années enrichissantes et constructives.

Mes remerciements vont ensuite à Dr. Rachida Hamzi, co-encadreur qui a su elle aussi m'épauler et m'encourager dans mon travail. Elle a également beaucoup contribué à l'amélioration de mes connaissances.

J'exprime de sincères remerciements à monsieur Mebarek Djebabra, professeur à l'institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être président de jury de ce travail. Je révèle également ma profonde gratitude à monsieur Mahmoud Omari professeur à l'université de Biskra ainsi que monsieur Abd Elbaki Djebaili, professeur à l'université de Batna pour l'honneur qu'ils m'ont fait par leurs acceptations de participer au jury.

J'exprime une reconnaissance particulière envers Mr Djamel Haddad avec qui j'ai pu avoir des échanges sur le fonctionnement logiciel Fluent.

En outre, je remercie tout le personnel de l'institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle. En particulier mes remerciements s'adressent à Mr Abdellatif Arif pour son aide, sa gentillesse et ses encouragements.

Je profite l'occasion pour remercier toutes celles et ceux qui ont participé à éveiller ma curiosité scientifique depuis mon plus jeune âge, que ce soit ma famille et spécialement Adel Chettouh ou encore mes enseignants tout au long de mon parcours scolaire et qui m'ont donné l'envie de comprendre comment fonctionnent les choses.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma mère qui a toujours cru en moi et sans laquelle je n'en serais peut être pas arrivé là aujourd'hui.

Le dernier mot, tout simplement personnel, est pour mon époux Mr. Khemissi Benaroua pour sa présence à mes cotés, sa patience, sa compréhension, le soutien et l'équilibre qu'il m'a apportés. Merci...

Je terminerai par une devise qui me tient à cœur depuis longtemps...

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme »

F. Rabelais

Table De Matières

REMERCIEMENT	<i>i</i>
TABLE DE MATIERE	<i>iii</i>
LISTE DES FIGURES	<i>vi</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>ix</i>
NOMENCLATURE ET ABREVIATION	<i>x</i>

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I :

ASPECTS PHENOMENOLOGIQUES

I.1 Introduction	8
I.2 Eléments théoriques fondamentaux.....	9
I.3 Effets d'incendie sur l'environnement.....	9
I.3.1 Effets thermiques	10
I.3.1.1 Effets thermique sur les structures	10
I.3.1.2 Effets thermiques sur les personnes	11
I.3.2 Dégagement des suies et gaz de combustion.....	11
I.3.2.1 Dispersion atmosphérique	12
I.3.2.2 Danger lié à la toxicité des fumées	14
I.3.2.3 Perte de visibilité	16
I.3.2.4 Pollution des eaux	16
I.3.2.5 Pollution des sols et nappes phréatiques	17

I.4	Modélisation d'incendie	17
I.4.1	Classification des modèles d'incendie	19
I.4.1.1	Modèles statistiques d'incendie	19
I.4.1.2	Modèles déterministes.....	22
I.4.1.3	Les Modèles intuitifs.....	23
I.4.2	Utilité de la modélisation d'incendie	25
I.5	Conclusion	25

CHAPITRE II : MODELES NUMERIQUES D'INCENDIE

II.1	Introduction	27
II.2	Modèles numériques d'incendie	28
II.2.1	Modèles numériques de dispersion	29
II.2.1.1	Modèles gaussiens	29
II.2.1.2	Modèles intégraux	33
II.2.2	Modèles numériques thermiques	37
II.2.2.1	Modèle de zones	37
II.2.2.2	Modèles de champs - simulation numérique (CFD)	44
II.3	Conclusion.....	57

CHAPITRE III : DESCRIPTION DES L'OUTILS NUMERIQUES : FLUENT, ALOHA

III.1	Introduction	59
III.2	Simulation numérique d'incendie	60
III.2.1	Définition de la simulation numérique d'incendie.....	60
II.2.2	Principes de la simulation numérique d'incendie.....	60
II.2.3	Evolutions en matière de simulation numérique	61
II.2.4	Intérêts et apports de la simulation numérique.....	62
II.2.5	Outils de simulation numérique	63
III.3	Présentation générale du code FLUENT.....	64

III.3.1	Domaines d'utilisation du logiciel	65
III.3.2	Structure de programme	66
III.3.3	Principales étapes de résolution du FLUENT	69
III.4	Présentation générale du code ALOHA	77
III.4.1	Généralités	77
III.4.2	Caractéristiques clés du programme	78
III.4.3	Domaine de fonctionnement D'ALOHA	80
III.3.4	Utilisations d'ALOHA	81
III.5	Conclusion	83

CHAPITRE IV : **APPLICATION DES L'OUTILS
NUMERIQUES : FLUENT, ALOHA**

IV.1	Introduction	85
IV.2	Application des outils de modélisation numérique à un cas réel.....	86
IV.2.1	Description de l'accident	86
IV.2.2	Modélisation par le code FLUENT	87
IV.2.2.1	Conditions aux limites	87
IV.2.2.2	Résultats et discussions	89
IV.2.3	Modélisation par le logiciel ALOHA	99
IV.2.3.1	Conditions aux limites.....	99
IV.2.3.2	Résultats et discussions	101
IV.3	Conclusion.....	106
	CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	110
	ANNEXES	114
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	128
	RESUME	135
	ABSTRACT	135

Liste des figures

Figure I.1 : Représentation schématique de l'émission de polluants engendrés par un incendie de stockage de combustibles (Chivas, 2005)	9
Figure I.2 : Classification des modèles d'incendie	19
Figure I.3 : Démarche pour la modélisation statistique (Rambaud, 2007)	20
Figure I.4 : Courbe de feu paramétrique selon l'Eurocode 1	21
Figure II.1 : Distribution gaussienne des concentrations au sein d'un panache (Cretin, 2002)	30
Figure II.2 : Schématisation de l'approche utilisée par les modèles à zones. Les flèches indiquent le sens des écoulements (DESANGHERE, 2006)	38
Figure II.3 : Exemple de courbe obtenue par un modèle de zone	39
Figure II.4 : Exemple de discrétisation utilisée par un modèle à champ (Desanghere, 2006)	45
Figure II.5 : Maillages 2D - structurés: rectiligne (a) et 'body-fitted' (b) et non structuré (c) (Gobeau et al., 2002 ; Tucker et al., 2000)	46
Figure III.1 : Structure d'organisation de FLUENT	67
Figure III.2 : Interface Utilisateur – Graphique (GUI)	68
Figure III.3 : Maillage des faces	69
Figure III.4 : Maillage des segments	69
Figure III.5 : Maillage de base	69
Figure III.6 : Différentes options du solveur	70
Figure III.7 : Principe de résolution de la méthode isolée	71
Figure III.8 : Principe de résolution de la méthode couplée	72
Figure III.9 : Interface d'équation d'énergie	73
Figure III.10 : Paramètres caractérisant la nature de l'écoulement	73
Figure III.11 : Modèle des espèces	73
Figure III.12 : Caractéristiques du milieu d'étude	74
Figure III.13 : Conditions aux limites du domaine	74
Figure III.14 : Conditions initiales du problème	74

Figure III.15 : Enregistrement des données saisies	75
Figure III.16 : Nombre d'itération de simulation	75
Figure III.17 : Résiduelle des itérations	75
Figure III.18 : Procédure de convergence du programme FLUENT	76
Figure III.19 : Résultats de simulation	76
Figure III.20 : Enregistrement des résultats de simulation	76
Figure III.21 : Modélisation par le logiciel ALOHA, zone parcelle affichés sur une carte MARPLOT.	77
Figure III.22 : Situation géographique de la zone concernée	78
Figure III.23 : Taux de décroissance du polluant brule par rapport au temps	78
Figure III.24 : Différents scenarios modélisés par ALOHA	79
Figure III.25 : Différents types de risque évalués par ALOHA	79
Figure III.26 : Modélisation par le logiciel ALOHA zone parcelle affichés sur une carte Google Earth (NOAA, 2006)	82
Figure III.27 : Photo de la boule de feu résultante du Boilover	86
Figure III.28 : Conséquences des effets de l'incendie.	86
Figure III.29 : Représentation schématique du domaine de l'étude	87
Figures A : Contours de température pour différents temps	90
Figures B : Quelques images des contours de vitesse prise de l'animation (à des instants différents)	92
Figures C : Champs de réaction prise pour différents temps	93
Figures D : Evolution de la concentration du C_4H_{10} dans le temps	95
Figures E : Evolution de la concentration du CO_2 dans le temps	95
Figures F : Evolution de la concentration du SO_2 dans le temps	95
Figures G : Evolution de la concentration du SO_3 dans le temps.	96
Figures H : Evolution de la concentration du SO dans le temps.....	96
Figures I : Evolution de la concentration du SH dans le temps	96
Figures J : Evolution de la concentration du NH_3 dans le temps	97
Figures K : Evolution de la concentration du HCN dans le temps.	97
Figures L : Evolution de la concentration du NO dans le temps.	97
Figure III.30 : Représentation schématique du problème, du domaine de calcul et du système des coordonnées utilise dans la simulation.	100
Figure III.31 : Débit de la source du rejet du à la fuite pendant une durée ne dépassant pas 60 minutes.	102

Figure III.32 : Concentration du polluant en ppm dans les régions touchées	102
Figure III.33 : Concentration du polluant au point (5m, 5m).	102
Figure III.34 : Débit de la source du rejet lors de l'accident	103
Figure III.35 : Concentration du polluant en ppm dans les régions touchées	103
Figure III.36 : Concentration du polluant au point (100m, 100m)	103
Figure III.37 : Concentration du polluant au point (1000m, 1000m)	103
Figure III.38 : Concentration du polluant au point (2000m, 2000m)	103
Figure III.39 : Concentration du polluant au point (5000m, 5000m)	103
Figure III.40 : Zones menacées par la surpression	104
Figure III.41 : Zones menacées par les effets thermiques	104
Figure III.42 : Concentration des effets thermiques au point (100m, 100m)	104
Figure III.43 : Concentration des effets thermiques au point (1000m, 1000m)	104
Figure III.44 : Concentration des effets thermiques au point (2000m,2000m).....	105
Figure III.45 : Concentration des effets thermiques au point (5000m, 5000m)	105

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux produits impliqués relevés dans la liste d'accidents extraite de la base ARIA du BARPI	14
Tableau I.2 : Quelques méthodes probabilistes de sécurité incendie (Curtat, 1989 ; Benou raich, 1986)	23
Tableau I.3 : Quelques méthodes intuitives de sécurité incendie (Scheilds, 1987 ; Cluzel, 1978)	24
Tableau IV.1 : Modélisation de la dispersion des polluants	92
Tableau IV.2 : Modélisation des effets thermiques.....	93
Tableau IV.3 : Comparaison entre les résultats de la modélisation thermique et la dispersion des polluants.....	104
Tableau IV.4 : Origines des écarts entre prédictions et réalité.....	105

Nomenclatures et abréviations

Abréviations

2 D	: Deux Dimensions
3 D	: Trois Dimensions
AdD	: Arbre de Défaillance
AdE	: Arbre d'Événements
AEGLs	: Acute Exposure Guideline Levels
ALOHA	: Aerial Locations of Hazardous Atmospheres
AMDEC	: Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité.
BDF	: Diagramme Bloc de Fiabilité
CdM	: Chaînes de MARKOV
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CLA	: Couche Limite Atmosphérique
DES	: Detached Eddy Simulation
DO	: Densité optique
EBU	: Eddy Break-Up
EDM	: Eddy Dissipation Model
EPA	: Environmental Protection Agency
ERPG	: Emergency response planning guideline
FDS	: Fire Dynamics Simulator
FVM	: finit volum method
GUI	: Graphic User Interface
LES	: Large Eddy Simulation
NIST	: National Institute of Standards and Technology
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration

ODE	: Equations Différentielles Ordinaires
PPDF	: Presumed Probability Density Function
PPM	: Particules Par Million
RANS	: Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SAM	: Station for Atmospheric Measurements
SGE	: Simulations Grandes Echelle
TEELs	: Temporary Emergency Exposure Limits
TVR	: Tension de vapeur relative
UDF	: User Defined Functions

Lettres Romaines

x_0, y_0, z_0	: Coordonnées de la source de produit
x, y, z	: Coordonnées du point où l'on calcule la concentration
At	: Surface totale des parois du compartiment
b	: Effusivité qui prend en compte la nature des parois du compartiment pour estimer les pertes thermiques à travers elles
C	: Concentration
Cp	: Capacité calorifique à pression constante.
E	: Energie interne
M	: Masse de produit libéré
m	: Masse de gaz
O	: Facteur de ventilation du compartiment étudié
P	: La pression totale
$q_{t,d}$: Densité surfacique de charge d'incendie
S_x, S_y, S_z et S_T	: Termes liés à des sources comme la convection naturelle.
t	: Temps depuis l'émission du gaz
T	: Température de gaz
t_{lim}	: Temps de combustion complète de la charge d'incendie
u	: Vitesse moyenne du vent
u, v et w	: Composantes de vitesse selon les axes x, y et z

Lettres grecques

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Ecart-types de la distribution gaussienne de la quantité M de gaz par rapport à sa localisation à l'instant t
α	: Coefficient de réflexion au sol
ρ	: Densité et masse volumique
λ et μ	: Coefficients de viscosité de Lamé

Espèces chimiques

Br	: Brome
Cl	: Chlore
CO	: Monoxyde de carbone
CO ₂	: Dioxyde de carbone
C ₄ H ₁₀	: Butane
COV	: Composés Organiques Volatils
F	: Fluor
HCN	: Cyanure d'Hydrogène
HCl	: Acide chlorydrique
HF	: Acide fluorydrique
HBr	: Bromure d'Hydrogène
HNO ₃	: Acide nitrique
H ₂ SO ₄	: Acide sulfurique
H ₂ O	: Eau
N ₂	: Azote
NO	: Monoxyde d'azote
NO ₂	: Dioxyde d'azote
NO ₃	: Trioxyde d'azote
NO _x	: NO+NO ₂
NH ₃	: Ammoniac
O ₂	: Oxygène

Introduction Générale

Introduction générale

« Certains problèmes sont simples, jusqu'au jour
où l'on se met en tête de les résoudre. »

0.1 Science du feu à travers les âges

La maîtrise du feu constitue une étape majeure de l'évolution humaine. L'homme est le seul qui a non seulement domestiqué le feu, mais qui a également réussi à le reproduire. La rencontre entre l'homme et le feu a eu lieu il y a environ 600 000 ans au cours d'incendies allumés par la foudre ou encore la lave. Les premières traces de feu « entretenu » actuellement connues datent de 400 000 ans avant notre ère. L'aptitude à créer une flamme sans utiliser un feu préexistant remonte quant à elle à environ 30 000 ans (Curtat, 2001). Le feu a permis à l'homme d'utiliser les cavernes pour se protéger, d'éloigner les carnivores, de lutter contre le froid, de cuire ses aliments, de prolonger le jour et également de perfectionner son outillage. L'organisation de la vie sociale a été indéniablement favorisée par la maîtrise du feu, ne serait-ce que grâce à la convivialité qu'il offre (Lumley, 2000). Il est vite paru évident que la conservation du feu nécessite un soin particulier et qu'en même temps ce dernier peut facilement se propager de manière incontrôlée à la végétation environnante. L'homme a été véritablement confronté aux dangers du feu à partir du moment où il a eu des biens et des lieux de regroupement à protéger. Il a ainsi dû s'organiser pour lutter contre les incendies en même temps qu'il se socialisait.

Au cours du moyen âge, l'usage du feu se diversifie, allant du foyer d'habitation au feu destiné à l'artisanat, que ce soit pour la métallurgie, la poterie, la bijouterie, le travail du verre, la cuisine, etc. ou même pour la guerre. L'utilisation du bois, combustible alors le plus employé, se perfectionne en même temps que les incendies continuent à ravager les cités. La réglementation contre les risques d'incendie en France naît au début du *XVe siècle*. À partir du *XVIIe siècle*, l'alchimie du moyen âge laisse place à une approche physique plus scientifique du feu. On comprend alors que la flamme n'est pas une substance en elle-même.

Le chimiste belge Van Helmont met en évidence l'existence du gaz carbonique et décrit déjà la flamme comme de la « fumée allumée ». Les chimistes allemands Stahl et Bêcher élaborent la théorie du phlogistique pour expliquer le phénomène de combustion. En s'appuyant sur les propriétés de ce nouvel élément, ils réalisent une synthèse cohérente qui concilie les phénomènes de combustion et d'alimentation du feu. L'idée de la conservation d'un élément au cours de la combustion est particulièrement novatrice. Pourtant, cette théorie ne fait jouer à l'air aucun autre rôle que celui de support du phlogistique et elle est mise en défaut par certaines expériences simples. Il faut attendre le milieu du *XVIII^e siècle* pour que le français Lavoisier (Lavoisier, 1785) montre qu'il est en fait nécessaire de considérer le feu comme une réaction chimique entre un combustible et l'oxygène de l'air. Un peu plus tard, la naissance de la thermodynamique avec la thèse de Carnot (Carnot, 1824) et les travaux de Joule mettent en évidence la dimension énergétique du feu. Au cours des *XIX^e et XX^e siècles*, les scientifiques conservent cette façon de décrire le feu et cherchent à le décomposer selon différents aspects de mieux en mieux définis. Ceci les mène à une approche qui décrit le feu comme un ensemble de systèmes en interaction. Ces systèmes évoluent au cours du temps selon les échanges de matière et d'énergie qui existent entre eux. La formalisation de ces systèmes et de ces échanges, moyennant certaines hypothèses simplificatrices, aboutit à des modèles analytiques qui sont aujourd'hui simulés avec des ordinateurs de plus en plus puissants. Le savoir scientifique actuel relatif au feu provient ainsi de différentes disciplines telles que la thermodynamique, la thermique, la chimie et la cinétique chimique, la mécanique des fluides, la physique des transferts de matière et d'énergie, etc.

Mais en parallèle, avec cette diversité de l'utilisation du feu, son côté sombre devient de plus en plus difficile à contrôler, A ce niveau intervient ce qu'on appelle la combustion provoquée et contrôlée, que l'on rencontre dans les moteurs à combustion, les turbines ou les chaudières par exemple qui devient le sujet de nombreux travaux de recherche depuis *les années 1940*, tant au point de vue de la modélisation qu'au point de vue de l'investigation expérimentale. L'utilisation aujourd'hui très répandue de ce type de combustion au niveau industriel explique l'intérêt que suscitent les recherches à ce niveau. L'étude des incendies, c'est à dire du feu non désiré et mal maîtrisé, profite des avancées obtenues dans l'étude de la combustion contrôlée. Elle se base donc essentiellement sur les mêmes approches. Ce type d'investigation est motivé par des questions de sécurité des personnes mais aussi des questions d'ordre économique découlant de la protection des biens, tel que :

- Qu'est-ce que le risque lié à l'incendie ?
- Quel est l'ordre de grandeur ce risque ?
- Quels sont les moyens de lutte ?
- Quelle est l'efficacité de ces moyens ?
- Quels types d'interactions existe-t-il entre ces moyens ?
- Quelles contraintes engendrent-ils pour les autres corps d'état du bâtiment ? Et vice versa.
- Quel est l'impact de ces moyens sur l'enveloppe budgétaire ?

Il y a beaucoup qui ont tenté de répondre à la plus fondamentale de ces questions, à savoir l'ordre de grandeur du risque incendie (Curtat, 1989 ; Harmaty, 1985 ; Cluzel et al., 1978). La leçon que l'on peut en tirer est que le phénomène physique est complexe et pose le problème du degré de modélisation qu'il est raisonnable d'adopter. Toutefois, l'incendie constitue dans la hiérarchie des événements humains un risque non négligeable (Guyonnet et al., 1983).

Avec la croissance des entreprises, l'invention des matériaux nouveaux (plastiques) et de nouvelles techniques de production et de construction, les sinistres sont devenus de plus en plus fréquents et catastrophiques. Ce qui a provoqué des majorations parfois insupportables pertes des vies humaines et financières. Il fallait donc des solutions complémentaires passant par la technique et la matière pour assurer la sécurité de son utilisateur.

0.2 Sécurité contre l'incendie

De nos jours, la situation est plus critique. Un incendie peut être fatal du fait des circonstances favorisant son développement, en France, par exemple, une entreprise sur trois disparaît dans les trois ans qui suivent un incendie (Kruppa, 1986).

Dans ce cas, il est obligé de traiter techniquement ses risques. Cette maîtrise technique des risques est encore plus indispensable si un éventuel incendie est susceptible d'attaquer l'environnement de par la nature même de l'activité. De nos jours, l'impact médiatique suffit à la perte de l'entreprise si elle n'est pas en situation de monopole. Par ailleurs, une erreur courante est de croire que le risque incendie ne menace que les moyennes et grandes entreprises. Pour les petites entreprises, l'impact est d'autant plus fort qu'elles ont moins de trésorerie. Le coût d'un incendie dépasse rapidement leur capacité financière.

Et ainsi il est apparu ce qu'on appelle l'approche de la sécurité incendie qui est le plus souvent abordée par le biais du concept dual de risque incendie ; ce qui conduit à une démarche générale d'Ingénierie de Sécurité Incendie qui consiste à :

- D'une part rechercher systématiquement tous les enchaînements d'événements susceptibles de constituer un risque. Chaque enchaînement, appelé scénario, est recensé, décrit et associé à une probabilité d'occurrence dans le cas de l'ouvrage, du système de transport ou du bâtiment considéré ;
- D'autre part, parmi tous les outils disponibles, sélectionner, qualifier et utiliser ceux qui sont nécessaires et pertinents pour évaluer les performances de l'ouvrage, des produits et des systèmes étudiés

Elle consiste par ailleurs à :

- Evaluer les effets nuisibles (risques pour les personnes, intégrité structurelle, perte d'exploitation par exemple) générés par la combustion non contrôlée, en fonction de paramètres précis ;

- Caractériser la potentialité d'extension du feu dans des espaces donnés et la dégradation de l'atmosphère interne à ces espaces.

Depuis *les années 1960*, diverses approches de la sécurité incendie se sont développées, des plus empiriques aux plus scientifiques. On peut classer ces approches en trois groupes de modèles suivant les données et les connaissances utilisées et les résultats fournis : les déterministes, les probabilistes, les intuitives.

- **Les modèles déterministes** : Cherchent à donner une valeur quantitative des phénomènes physiques liés à un incendie (Harmaty, 1985 ; Harmaty, 1983; Baldassara, 1988).

- **Les modèles probabilistes** : Donnent les probabilités d'occurrence de diverses quantités de dommages (Benouraich et al., 1986 ; Bessis, 1984). Ils utilisent des probabilités de certains événements (succès/échec du cloisonnement, naissance d'un incendie dans la vie du bâtiment, etc. (Curtat, 1989 ; Benouraich, 1986).

- **Les modèles intuitifs** : Sont ceux qu'il est difficile de classer dans les deux premiers groupes. On peut dire qu'ils sont semi-probabilistes, car ils cherchent tous à nous indiquer dans quelle mesure un incendie aura lieu dans la vie du compartiment.

Et ainsi, après avoir été apprivoisé très tôt par l'homme, le feu a bien longtemps résisté à la modélisation. Comment modéliser une flamme, la propagation d'un feu? Voilà des phénomènes qui ont donné bien du mal à tous les mathématiciens, ingénieurs et calculateurs de tous pays. La modélisation du feu est maintenant mieux maîtrisée et elle constitue un axe très bien développé de la sécurité d'incendie.

Les incendies sont maintenant modélisés, ce qui permet de mieux les comprendre en retour. Les discontinuités de propagation causées par le rayonnement, la saute des brandons font dans le cas des feux de forêts. Puis elle est venue l'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables.

La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante.

0.3 Présentation de la problématique liée à la modélisation numérique d'incendie

Ce travail porte sur la modélisation des incendies et plus exactement la modélisation numérique des effets de l'incendie qui devient crucial compte tenu de la multiplication des incidents. Les progrès scientifiques des trente dernières années et la course effrénée de l'industrie vers la minimisation des effets néfastes des incendies ont permis de concevoir des modèles et des outils de simulation peuvent désormais présenter la dynamique du feu, la résistance des matériaux, la dispersion des fumées, les systèmes d'évacuation et bien d'autres phénomènes d'incendie. Ces nouvelles possibilités semblent permettre dans un proche avenir de nouvelles avancées technologiques.

La première motivation de ce travail est de comprendre le mécanisme complexe des différents modèles numériques spécifiques aux différents phénomènes d'incendie. L'objectif majeur est l'application de ces modèles à des cas réels. L'intérêt de ces applications n'est pas juste dédié à l'étude des phénomènes qui naissent lors d'un incendie mais de protéger des biens ou des personnes contre les effets qu'il peut générer.

0.4 Organisation du mémoire

Ce document est organisé en deux grandes parties consacrées à l'étude de la modélisation numérique des effets de l'incendie.

La première partie sera composée de trois chapitres :

Le premier chapitre : Présente une synthèse bibliographique des éléments théoriques concernant le phénomène d'incendie relative à la problématique et qui permet d'introduire les notions utilisées par la suite, commençant par sa définition et arrivant à ses différents types de modélisation.

Le second chapitre : Concernera la modélisation numérique d'incendie proprement dite. Il expose les principaux modèles numériques d'incendie, leurs méthodes de résolution, leurs domaines de validité ainsi que leurs limites d'utilisation.

Le troisième chapitre : Abordera une description des outils numériques utilisés ultérieurement dans le cadre de ce travail ; le contexte de la simulation numérique des écoulements représentatifs de situation d'incendie est d'abord évoqué, l'outil numérique mis en œuvre est ensuite décrit, en mettant l'accent sur l'originalité de certaines approches employées.

La seconde partie englobe un chapitre :

Le quatrième chapitre : Qui clôturera ce travail par une application des outils de la modélisation numérique d'incendie à un cas pratique : L'accident de Skikda 2005, Nous y révélerons une comparaison entre les résultats des différents outils de simulation utilisés.

Et enfin une ***conclusion générale*** de ce travail d'initiation à la recherche ainsi que les perspectives envisagées pour des travaux futurs.

*Aspects
phénoménologiques*

Chapitre **1**

<i>I.1 Introduction</i>	<i>8</i>
<i>I.2 Éléments théoriques fondamentaux.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3 Effets d'incendie sur l'environnement.....</i>	<i>9</i>
<i>I.4 Modélisation d'incendie</i>	<i>17</i>
<i>I.5 Conclusion.....</i>	<i>25</i>

Chapitre I

Aspects phénoménologiques

Ce premier chapitre présente les éléments fondamentaux permettant de préciser le cadre du présent travail. Dans une première partie, une présentation des principaux phénomènes physiques et chimiques mis en jeu lors d'un incendie est soulignée. Deux aspects essentiels du feu sont ensuite évoqués : le phénomène de la dispersion des polluants et gaz d'incendie ainsi que le transfert d'énergie par effet thermique au sein des milieux considérés.

Dans un second temps on abordera le domaine de la modélisation d'incendie en sens large en présentant ces différents axes. Cette description essentielle va nous permettre par la suite de mettre l'accent sur une de ces catégories afin de fournir un panorama des connaissances actuelles en la matière, permettant ainsi de replacer le sujet dans son contexte.

1.1 Introduction

Lors des dernières décennies, un nombre important de recherches a été consacré aux feux libres ou confinés. Ces études ont permis de faire évoluer les modélisations et les simulations numériques et d'obtenir des outils d'analyse de sûreté performants. Malgré cela, les incendies restent toujours synonymes de cause majeure de dégâts matériels et de pertes de vies humaines.

Les incendies présentent des comportements très variés qui dépendent principalement de la nature et composition du combustible, Air ambiant (météorologie), la topographie ainsi que de la ventilation de l'enceinte. Une partie de la chaleur dégagée par la flamme et des produits de combustion peut être piégée dans l'enceinte, ce qui augmente le flux de chaleur vers les sources de combustible disponibles qui s'embrasent alors.

I.2 Éléments théoriques fondamentaux

L'incendie est un phénomène très complexe de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace, durant lequel interviennent pratiquement tous les processus physiques observables au sein des écoulements réactifs subsoniques. Lorsqu'un incendie se déclare, il sera responsable de dégâts très importants, et son impact, sa vitesse de propagation, et son intensité vont dépendre de nombreux facteurs environnementaux.

L'incendie met en jeu des phénomènes qui sont fortement interdépendants, non seulement à petite échelle au niveau de la zone de réaction, mais aussi à grande échelle, jusqu'au niveau des conditions aux limites du domaine étudié. Par exemple, à grande échelle, le panache thermique issu d'une flamme crée un entraînement d'air qui apporte de l'air frais vers les zones de réaction et entretient ainsi les processus de combustion. Au niveau des petites échelles, la zone de réaction est influencée par la turbulence de l'écoulement qui contrôle la mise en présence des réactifs. En même temps, la turbulence est elle-même alimentée en énergie par les mouvements à grande échelle.

I.3 Effets d'incendie sur l'environnement

L'incendie non seulement présente un risque pour les vies des personnes, mais également il a d'importants impacts sur l'environnement. Ces atteintes causés par les incendies peuvent être à la fois à court et à long terme.

Une fois que le feu a pris naissance il va y avoir toute une série de conséquences et il convient de retenir, dans le cas classique les grandes classes présentées dans la figure I.1 ainsi que les facteurs influençant le développement d'incendie :

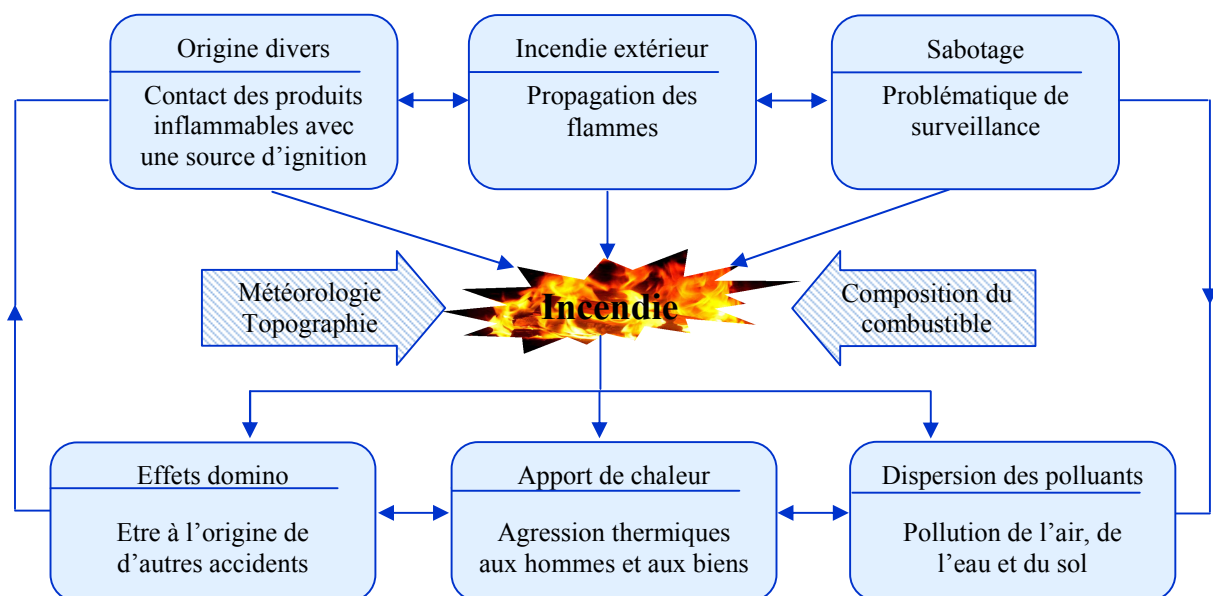


Figure I.1 : Représentation schématique de l'interaction entre l'incendie et son environnement.

Dans le cas classique, on peut classer ces impacts en deux grands types de conséquences liées au développement d'un incendie, qui peuvent à leur tour être à l'origine de d'autres conséquences :

- **Les effets thermiques** (flux de chaleur reçu par une cible) ;
 - Les effets sur les structures : les structures sont susceptibles de se déformer et de s'effondrer sous l'effet de la chaleur ;
 - Les effets sur les personnes ;
- **Dégagement des suies et gaz de combustion** ;
 - Les effets toxiques liés à la présence éventuelle de produits toxiques dans les fumées de combustion ;
 - Les effets visuels : la présence des fumées diminue généralement fortement la visibilité dans l'entrepôt et éventuellement dans l'environnement proche du site ;
 - La pollution éventuelle des sols par les eaux d'extinction, chargées en produits toxiques pour l'environnement ;
 - La pollution des cours d'eau voire des nappes phréatiques.

1.3.1 Effets thermiques

L'incendie est un ensemble de phénomènes physiques et chimiques qui se développent en plusieurs phases et de plusieurs manières aux cours desquelles sa température va s'élever, le mécanisme logique de propagation d'un incendie se fait de deux façons différentes, soit par génération par combustion des substances qui se déplacent par la suite, soit par transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

Compte tenu que le rayonnement est le mode prédominant de transfert thermique pour les feux de grande taille (c'est le mode qui donne en effet les distances d'effets les plus importantes dans cette configuration), Les dangers liés au rayonnement thermique se caractérisent par :

- Atteintes corporelles aux personnes ;
- Effets sur les structures.

1.3.1.1 Effets thermique sur les structures

D'une manière générale, les effets d'incendie sur une structure sont multiples, et résultent du couplage entre l'intensité de l'agression, les dispositions constructives et l'évolution des caractéristiques des matériaux de construction avec la température :

• **L'intensité de l'agression** dépend bien évidemment de la nature des produits combustibles, ainsi que de la distance de la structure au foyer. Le mécanisme de l'incendie étant complexe, il est difficile de connaître exactement les températures atteintes et les différentes phases réelles du développement, la première caractéristique qui vient à l'esprit, dans le cas d'un sinistre, est leur combustibilité. Elle concerne surtout les matières plastiques et le bois. A titre d'exemple, certaines pièces de bois, matériau combustible, mais doté de qualités d'isolation thermique, auront une tenue au feu supérieure à celles d'éléments équivalents faits d'acier. En effet, la couche de bois carbonise à la surface des pièces, limite

alors la conduction de la température e leur cœur et favorise leur tenue mécanique au feu. Toutefois, la combustibilité va souvent de pair avec l'émission de fumées toxiques pour l'être humain (Reimeringer, 2007). ;

- Une autre propriété, **la dilatation thermique**, concerne principalement les structures métalliques. Elle interagit directement avec les dispositions constructives : pour les éléments dont les extrémités sot fixées, elle va être à l'origine de forces pouvant conduire à de la compression, voire à du flambage ou au déplacement des éléments auxquels ils sont reliés aux extrémités (Reimeringer, 2007);

- Les **caractéristiques intrinsèques** des matériaux évoluent souvent très fortement avec la température, généralement dans le sens d'une moindre résistance mécanique ;

- Enfin, certains matériaux, tels que le béton, par exemple, peuvent subir des **dégradations irréversibles** lorsqu'ils sont soumis au feu (Reimeringer, 2007).

1.3.1.2 Effets thermiques sur les personnes

Les effets thermiques du d'incendie sur les personnes ont trois principales origines :

- Un débordement de la thermorégulation qui engendre une élévation de la température corporelle. Comme la fièvre, cette élévation engendre des maux de tête et peut entraîner la mort au-dessus de 42 °C. L'évacuation de la chaleur par thermorégulation étant basée sur le principe de l'évaporation de la sueur, l'humidité ambiante est primordiale ;

- Une atteinte des voies respiratoires (asphyxie), caractérisée par un dessèchement ou des brûlures à différents niveaux : gorge, trachée et bronches, alvéoles pulmonaires ;

- Un effet direct sur la peau (brulures) qui peut être d'origine radiative (flux radiatif incident), sans contact de la peau avec les fumées, ou lié à la convection et au contact des tissus avec les fumées.

Ces atteintes constituées par les brûlures. Leur mécanisme peut être direct (par flamme) ou indirect (par conduction, ou par agression thermique des fumées). Il en résulte des brûlures cutanées trachéo-bronchites (Ferlay et al., 1998).

L'exposition pour laquelle l'hyperthermie est suffisante pour causer une dégradation des capacités mentales, diminuant la capacité d'évacuation et de survie. Ce niveau est comparable à un effet subaigu, c'est à dire à une exposition unique moyenne, mais prolongée (Guillaume, 2006).

1.3.2 Dégagement des suies et gaz de combustion

En plus de l'effet thermique, ou lumineux induit par la flamme, l'incendie s'accompagne généralement par une émission de fumées, qui constitue la majeure partie des produits de combustion visibles lors d'un incendie. La toxicité du panache de fumées est donc évaluée en additionnant la toxicité respective des différents gaz le constituant (cumul des effets des différentes espèces toxiques formées). Cette dernière contient en particulier des suies, particules produites en quantité plus ou moins importante selon les produits en feu et les caractéristiques de la combustion (Bernuchon, 2002).

La dispersion de ces fumées représente une source de danger potentielle pour l'environnement du site de par :

- La toxicité des produits de combustion ;
- La gêne visuelle occasionnée, sur les voies de communication à proximité (Bernuchon, 2002).

1.3.2.1 Dispersion atmosphérique

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de particules (aérosols, gaz, poussières) rejetées dans l'atmosphère (Arya., 1999), elle peut désigner soit un phénomène dangereux, soit le phénomène physique c.-à-d. les mécanismes physiques de mélange d'une substance dans l'air de l'atmosphère. Elle caractérise donc la façon dont le nuage est transporté et dilué (effets de turbulence, gravité, ...). Les deux phénomènes physiques régissant l'évolution du nuage dans l'atmosphère sont : le déplacement du nuage et la dilution du nuage (Couillet, 2002).

L'évolution du nuage dans l'atmosphère est principalement régie par :

- La densité du nuage par rapport à l'air (gaz léger / lourd / neutre) ;
- Les conditions de rejet : durée du rejet (continu – instantané), dilution du nuage - entraînement d'air (quantité de mouvement initiale, cisaillement du champ de vent), géométrie de la source (ponctuelle – surfacique), hauteur du rejet (sol – altitude), échanges thermiques ;
- Les conditions météorologiques : vitesse du vent et stabilité atmosphérique ;
- Les conditions orographiques : obstacles, rugosité, relief, occupation du sol ;

Mais le problème majeur qu'on rencontre a ce niveau est de déterminer a priori si la variation d'un paramètre dans un sens va plutôt aller dans le sens d'une approche conservatrice ou non (Couillet, 2002).

La dispersion des fumées toxiques dans l'atmosphère dépend des caractéristiques d'émission et des conditions météorologiques, en particulier la turbulence de l'atmosphère et la vitesse du vent (Couillet, 2002).

Le risque d'atteinte de l'environnement par des fumées ou des produits polluants d'incendie est inhérent à tous les types d'activité industrielle, même si certains présentent un potentiel de danger plus important. En effet, tous les incendies industriels sont susceptibles de former des effluents gazeux à caractère toxique, comme le montre la liste non exhaustive suivante, issue de l'accidentologie étudiée pour les besoins de ce rapport :

- Fabrication ou stockage de produits agrochimiques ou phytosanitaires,
- Fabrication de peintures, vernis et solvants,
- Autres industries chimiques,
- Activité d'entreposage,
- Fabrication ou stockage de pneumatiques,
- Industrie textile,
- Activités comportant une installation de réfrigération,
- Activités fabriquant ou employant des polymères (équipementiers..).

Des études ont montré que les accidents les plus fréquents interviennent dans l'industrie chimique (produits à caractère dangereux, réactions exothermiques...), puis dans l'agrochimie et les phytosanitaires (production et stockage). Ensuite, les entrepôts, les décharges, l'industrie automobile au sens large (équipements, pneus) se trouvent également souvent impliqués dans les accidents recensés. Enfin, beaucoup d'autres types d'activités industrielles sont concernés du fait de l'emploi de produits « courants » tels que les plastiques, les isolants thermiques, les câbles électriques, dont la combustion produit des composants à fort potentiel toxique.

La cause de l'incendie n'est pas un paramètre déterminant dans la production de fumées toxiques et l'accidentologie effectuée reporte tous types de départ d'incendies : point feu, court-circuit, foudre, malveillance, auto-échauffement ou décomposition exothermique d'un produit, incompatibilité entre réactifs, accident mécanique...

A. Produits impliqués lors d'un incendie

Les principaux produits impliqués lors d'un incendie sont d'une part, ceux pris directement dans l'incendie et d'autre part, l'ensemble des produits toxiques formés pendant l'incendie.

La nature des produits chimiques impliqués dans les incendies étudiés varie selon le domaine d'activité. Pour chaque domaine d'activité recensé dans la liste d'accidents du BARPI (voir Annexe), les principaux produits impliqués sont relevés dans le tableau I.1 (Chivas, 2005) :

Domaines d'activité industrielle	Principaux produits impliqués
Agrochimie et phytosanitaire	nitrate d'ammonium, thiodicarbe, engrais NPK, nitrate de sodium, permanganate de potassium...
Produits chimiques	acide chlorhydrique, soude, soufre, benzène, phénol cyanure de potassium, dichlorométhane, chlore, pentasulfure de phosphore ...
Polymères et additifs	PVC, néoprène, polystyrène, pneumatiques, revêtements synthétiques, isolants, textiles, tapis, moquettes, vernis, colles et solvants...
Produits pétroliers	Hydrocarbures (perchlorate d'ammonium, pétrole)...

Tableau I.1 : Principaux produits impliqués relevés dans la liste d'accidents extraite de la base ARIA du BARPI (Chivas, 2005).

Ces produits dégagent au cours de leur dégradation thermique des fumées toxiques dont les principales composantes sont identifiées pour la plupart au paragraphe suivant.

B. Produits toxiques dégagés par l'incendie

Les produits toxiques formés lors d'un incendie sont liés à des réactions et combinaisons chimiques des composés entre eux, faisant intervenir d'éventuels effets

antagonistes, synergiques ou autres interactions additives. Leur nature est par conséquent directement liée aux produits impliqués dans l'incendie et aux conditions de leur dégradation thermique (Chivas, 2005).

Les fumées toxiques issues d'un incendie sont identifiées en trois catégories :

- Les polluants asphyxiants : ils représentent les gaz les plus dangereux et sont souvent les sources d'émissions toxiques responsables des décès constatés ; les plus importants sont : NO, H₂S, SO₂, HCN, CO (Chivas, 2005) ;
- Les polluants irritants : il s'agit des suies (composé microparticulaires polycycliques azotés et carbonés), des acides minéraux et des produits organiques irritants. Les gaz acides inorganiques les plus fréquents dans les fumées d'incendie sont HCl, HBr, HF, NO_x, SO_x, P₂O₅. Les produits organiques irritants sont les composés carbonés (formaldéhyde, acroléine, butyraldéhyde...), des dérivés de l'azote (NO, NH₃, isocyanate, amine) (Chivas, 2005) ;
- Les composés à « toxicité spécifique » : ces composés à effet cancérigène, mutagène, allergisant, sont généralement formés en quantité limitée dans le panache et ne conduisent généralement pas à des effets aigus mais peuvent présenter des effets toxiques à long terme (benzène, dioxine, dibenzofurane...) (Chivas, 2005).

Les incendies représentent une source importante des différents gaz et particules émis en atmosphère affectant ainsi la qualité de l'air.

1.3.2.2 Danger lié à la toxicité des fumées

Ce danger est lié à la présence éventuelle de produits toxiques dans les fumées de combustion. De nombreux travaux ont montré que c'est leur inhalation qui va faire le plus de victimes (Sumi et al., 1997 ; Garnier, 1990) Les fumées sont dangereuses en raison des produits toxiques qu'elles contiennent, pour leur température élevée et pour leur opacité qui désoriente les victimes en les empêchant de trouver rapidement la sortie. Il faut préciser que les caractéristiques des fumées dépendent beaucoup du type de sinistre (Purser, 1995) et de la nature du combustible considéré.

En particulier, certaines notions sont essentielles dans l'évaluation du danger lié à la toxicité des fumées ; la fumée est une fonction de son pouvoir toxique, de l'exposition d'une personne à une concentration (variable) de fumée et de l'effet thermique au cours du temps.

Certains des effets se produisent progressivement au cours d'une exposition continue, d'autres se produisent presque instantanément. En particulier, il convient de s'intéresser aux effets incapacitants et létaux des fumées, ce qui implique de s'intéresser aux effets des substances présentes. Ces substances peuvent être irritantes, asphyxiantes ou narcotiques (Hartzell, 1992).

• ***Effets psychologiques*** : Le déclenchement de l'évacuation est lié à la perception par les occupants de leur capacité de tenabilité et aux diverses lignes de conduite possibles. La décision d'évacuer ou non, et le choix d'un chemin d'évacuation impliquent la perception par les personnes des risques relatifs inhérents à chacune des décisions possibles. Cette

perception est elle-même influencée par une combinaison de la vue de la fumée, du feu, de la sensation de la chaleur, de l'irritation oculaire et de la région supérieure de l'appareil respiratoire. De façon générale, il est difficile d'évaluer quantitativement les effets psychologiques d'une exposition au feu et fumées. De plus, leur effet principal conditionne le temps requis pour l'évacuation (Guillaume, 2006).

• **Effets physiologiques** : Les effets psychologiques sont liés à des effets physiologiques qui peuvent avoir une influence sur la capacité physique des occupants à évacuer. La perte de visibilité par la fumée affecte la capacité des occupants à repérer et à évaluer efficacement leur situation par rapport aux sorties de secours. Certaines études expérimentales ont ainsi montré l'effet de la densité de fumées sur la vitesse de déplacement et la capacité de mouvement. Les effets physiologiques résultant de l'exposition aux effluents gazeux produits lors d'un incendie peuvent conduire à différents degrés d'atteintes irréversibles sur la santé, voire au décès (Guillaume, 2006).

• **Facteurs décisifs pour la survie**

On trouve que le temps de survie des victimes d'un incendie est inversement proportionnel à la concentration et à la toxicité des produits dégagés (Guillaume, 2006).

– La concentration des produits toxiques dégagés en fonction du temps, la densité de fumée et la chaleur dépendent de la variation du développement de l'incendie ainsi que la perte en masse du combustible.

– Le potentiel toxique des produits correspond à la concentration d'exposition (kg/m^3) ou la dose d'exposition ($\text{kg}\cdot\text{min}/\text{m}^3$ ou $\text{ppm}\cdot\text{min}/\text{m}^3$) nécessaire pour produire des effets toxiques ainsi que les effets équivalents en termes de chaleur et de diminution de la visibilité. Donc le taux des effets dépend sur la connaissance des concentrations ou des doses d'exposition qui réduisent ou empêchent l'évacuation (Guillaume, 2006).

• **Effet des gaz irritants**

La liste des produits chimiques identifiables dans les fumées d'incendie dépasse plusieurs milliers de dérivés, issus des molécules qui composent les matériaux en feu. Les éléments les plus irritants sont :

Les acides inorganiques : les halogénures d'hydrogène (chlorure d'hydrogène (HCl), bromure d'hydrogène (HBr) et fluorure d'hydrogène (HF)), le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x) (Rechenbach, 2000; Conference, 1999)

Certains composés organiques tels que les aldéhydes de faible poids moléculaire (acroléine, formaldéhyde, acétaldéhyde). Actuellement, plus de 20 substances irritantes ont été mises en évidence dans la fumée.

Les premières sensations d'une victime est exposée à une atmosphère irritante sont d'abord une sensation d'irritation des yeux, du nez, de la gorge, puis des poumons. Cette irritation est proportionnelle à la concentration en gaz irritant.

Ainsi, pour le chlorure d'hydrogène, il a été montré que l'aptitude des personnes à évacuer n'est pas compromise pour une concentration comprise entre 100 et 500 ppm. Au-delà de 1000 ppm, l'évacuation devient impossible (Purser, 1999).

1.3.2.3 Perte de visibilité

La visibilité est un élément déterminant dans les procédures d'évacuation. La visibilité lors d'incendie se trouvait très rapidement réduite jusqu'à devenir pratiquement nulle au bout de quelques minutes seulement à cause des fumées dégagées par l'incendie, donc elle retarde l'évacuation, désoriente les foules et peut les exposer plus longtemps ou de manière plus importante aux autres effets ; Dans de nombreux incendies, l'évacuation des personnes est l'un des critères primordiaux pouvant orienter le sinistre vers une issue tragique. En effet, les personnes présentes lors du démarrage d'un incendie doivent fuir rapidement. Cette évacuation ne peut se faire si la visibilité est insuffisante. (Guillaume, 2006).

Des études ont montré que la fumée était perçue comme une barrière impénétrable pour les victimes des incendies. Dans des conditions normales, la vitesse moyenne de marche d'un homme est de 1,2 m/s. Elle chute à 0,3 m/s dans un local enfumé lorsque la densité optique (DO) atteint 0,5. Pour une obscurité plus grande, les gens agissent comme s'ils étaient dans le noir complet et suivent les murs pour se déplacer. En fait, ils hésitent à pénétrer dans la fumée lorsque la visibilité est inférieure à 3 m et ont plutôt tendance à revenir en arrière pour se réfugier dans un endroit qu'ils estiment plus sûr (Guillaume, 2006).

1.3.2.4 Pollution des eaux

Les importantes quantités d'eau déversées afin de maîtriser et d'éteindre un éventuel incendie se chargent progressivement en éléments issus de la dégradation, de la décomposition et de la combustion. Cette importante quantité de liquide est alors susceptible de contenir des espèces polluantes et nocives pour l'environnement selon la nature des produits stockés et de leur conditionnement (Dosne, 1994).

Il est difficile de déterminer avec précision cette quantité de produits dangereux qui dépend à la fois de la nature des produits stockés, des volumes déversés et donc des caractéristiques de l'extinction. La caractérisation du terme source de cette pollution est donc généralement difficile à déterminer quantitativement. En tout état de cause, ces eaux d'extinction polluées peuvent se déverser dans les rivières avoisinantes et entraîner des pollutions très importantes. Parmi les accidents passés on peut citer par exemple (Dosne, 1994) :

- L'incendie des entrepôts de produits chimiques de Rhône Poulenc en 1985 qui a entraîné une pollution du Rhône sur 150 km ;
- L'incendie des entrepôts de Sandoz à Bâle en 1985 qui a entraîné une pollution du Rhin et la mort de plus de 50000 poissons ;
- L'incendie de la société Protex en 1988 qui a entraîné une pollution de 25 km de rivière et la privation d'eau pendant 6 jours à 20000 personnes,
- L'incendie des entrepôts de la SANE à Nancy en 1996 qui a entraîné une pollution des eaux fluviales puis de la Meurthe et de la Moselle occasionnant la mort d'une tonne et demi de poissons sur 1,5 km.

1.3.2.4 Pollution des sols et nappes phréatiques

Outre une pollution des rivières, ces eaux d'extinction polluées sont susceptibles de s'infiltrer et de contaminer le sol et éventuellement des aquifères situés à proximité. Afin de limiter le risque de contamination du sous-sol par les eaux d'extinction, il est toutefois prévu de munir les entrepôts de zones de rétention étanches capables de confiner sur le site les eaux d'extinction. Ces eaux peuvent ensuite être purgées, éventuellement retraitées avant d'être rejetées dans le bassin d'orage ou le réseau d'épuration communal (Carrau, 2000).

En plus de toutes les incapacités préexistantes au sein des populations, les effets physiologiques et psychologiques liés à l'exposition aux effluents du feu peuvent affecter de manière significative la capacité des occupants à prendre les décisions efficaces pour accomplir leur propre évacuation ou pour se protéger (Carrau, 2000).

Le développement de l'évaluation des effets des incendies sur son environnement est intimement lié à celui des modèles plus généraux utilisés en ingénierie de la sécurité incendie. Les différents effets présentés ne disposent néanmoins pas tous d'un modèle physique explicite. Tous ne peuvent donc pas être reproduits correctement par le calcul.

1.4 Modélisation d'incendie

Depuis quelques années, le risque incendie a reçu un écho tout particulier auprès des industriels notamment après les différents accidents. La prise de conscience collective de l'importance du risque incendie, en termes de pertes humaines et de coût matériel, a permis d'élaborer un contexte législatif afin d'améliorer la performance et la disponibilité des différents équipements de sécurité.

La prise en compte de ce risque dans les études de sécurité se heurte à un problème récurrent à savoir la difficulté, voire l'impossibilité de réaliser des essais incendies en taille réelle. En effet, les essais incendies sont relativement difficiles à mettre en œuvre et peuvent s'avérer très coûteux : fabrication et utilisation d'un ou plusieurs prototypes qui seront non réutilisables (afin de simuler plusieurs cas de scénarios dangereux), installation de systèmes complexes de mesures (capteurs de température, de concentration de polluants, débitmètres...), dépouillement fastidieux des résultats, mise en place d'une procédure de test particulière à chaque scénario avec soutien logistique (équipes opérationnelles, équipes de secours, ...etc.).

Pour toutes ces raisons, les industriels essaient d'éviter au maximum ce type de procédure sans pour autant dégrader la qualité et la pertinence des études de sécurité. Pour atteindre cet objectif, des outils basés sur la modélisation et la simulation numérique ont été développés depuis quelques années grâce notamment à l'avènement des systèmes informatiques. En effet, de puissants logiciels de simulation permettent d'étudier, en particulier, les phénomènes de propagation d'incendie sur des systèmes complexes et de grandes tailles.

La modélisation d'un système consiste principalement en la description formelle des processus intervenant dans ce système. Cette démarche a pour objectifs la compréhension et la prédiction du comportement du système, pour éventuellement aboutir à son contrôle. C'est

une traduction subjective de la réalité qui peut passer par la mise en œuvre d'outils mathématiques et numériques sur lesquels vient s'appuyer l'analyse du système considéré. Pour représenter les feux se développant, il existe plusieurs catégories de modèles correspondant à différents niveaux d'approximation qui permettent d'évaluer les conséquences des incendies. Le choix du modèle dépend du niveau de précision souhaité dans l'évaluation et également des moyens et du temps disponible pour réaliser les calculs de simulation.

La modélisation des incendies est très certainement un problème d'une extrême complexité, il met en jeu des phénomènes fortement non-linéaires tels que les transferts turbulents dans les basses couches de l'atmosphère et au voisinage immédiat du front d'incendie (interaction écoulement/combustible, combustion en phase gazeuse), les transferts radiatifs entre la flamme, la décomposition par séchage, pyrolyse et combustion hétérogène de la végétation dans le cas des feux de forêt. C'est pour ces raisons que les approches plus ou moins empiriques ont longtemps été privilégiées pour aborder ce problème. Ces outils proposent une évaluation de quelques caractéristiques simples d'un incendie en propagation libre, telles que la vitesse de propagation, la densité linéaire de puissance dégagée par le front d'incendie (intensité du front) et la hauteur de flamme.

Les effets de l'incendie peuvent être étudiés selon différentes approches avec :

• **La réalisation d'essais en grandeur réelle** : Les essais en grandeur réelle peuvent être réalisés pour estimer la dispersion des polluants dus à l'incendie sur un site donné ou approfondir les connaissances sur certains mécanismes de dispersion. D'une manière générale, ces essais sont relativement coûteux du fait de l'importance des moyens dont il faut disposer (systèmes d'acquisition de données, systèmes de rejet, quantités de gaz à rejeter, main d'œuvre, site disponible pour la réalisation de ces essais). A ces contraintes, il convient d'ajouter l'impossibilité de maîtriser les situations météorologiques (CCPS, 1996).

• **La simulation sur maquette (hydraulique ou aéraulique)** : Les essais à échelle réduite se font généralement sur une maquette placée dans une soufflerie ou une veine hydraulique. L'échelle de travail est en général de l'ordre du 1/50e. Pour représenter un phénomène identique à ce que l'on observait dans la réalité, il faut s'assurer de la conservation de grandeurs adimensionnelles de façon à garder le même système d'équations pour les essais en grandeur réelle et ceux à échelle réduite (Couillet et al., 2002).

• **L'utilisation de codes de calcul mathématiques** : La modélisation numérique présente a priori des avantages certains par rapport aux techniques physiques que sont les essais in situ ou à échelle réduite :

- Rapidité de l'étude;
- Possibilité d'envisager un grand nombre de situations.

L'emploi de modèles numériques pour l'évaluation des effets d'un incendie présente de nombreux avantages par rapport à des expérimentations : la rapidité de l'étude et la possibilité d'envisager un grand nombre de cas, d'autre part la modélisation peut être utilisée comme un outil prédictif de test les différents essais qui peuvent être trop coûteux ou risqués (Couillet et al., 2002).

Toutefois, les essais à grande échelle ou sur maquette permettent aussi de connaître les phénomènes à modéliser et par conséquent de participer au développement des outils de calcul.

1.4.1 Classification des modèles d'incendie

Les modèles d'incendie sont répartis entre les modèles déterministes, les modèles statistiques et modèles intuitifs. Les premiers sont décrits par les lois de la physique, de la thermique et de la chimie. Les seconds ne font pas directement appel à ces notions et procurent simplement des prévisions probabilistes concernant tel ou tel événement lié au feu. Au vu de la complexité de ces équations et du grand nombre d'itérations que leurs résolutions impliquent, l'ordinateur est indispensable. Le logiciel de modélisation n'est qu'un outil permettant de résoudre ces équations, qu'elles soient déterministes ou statistiques (Martinez de Aragón et al., 2007).

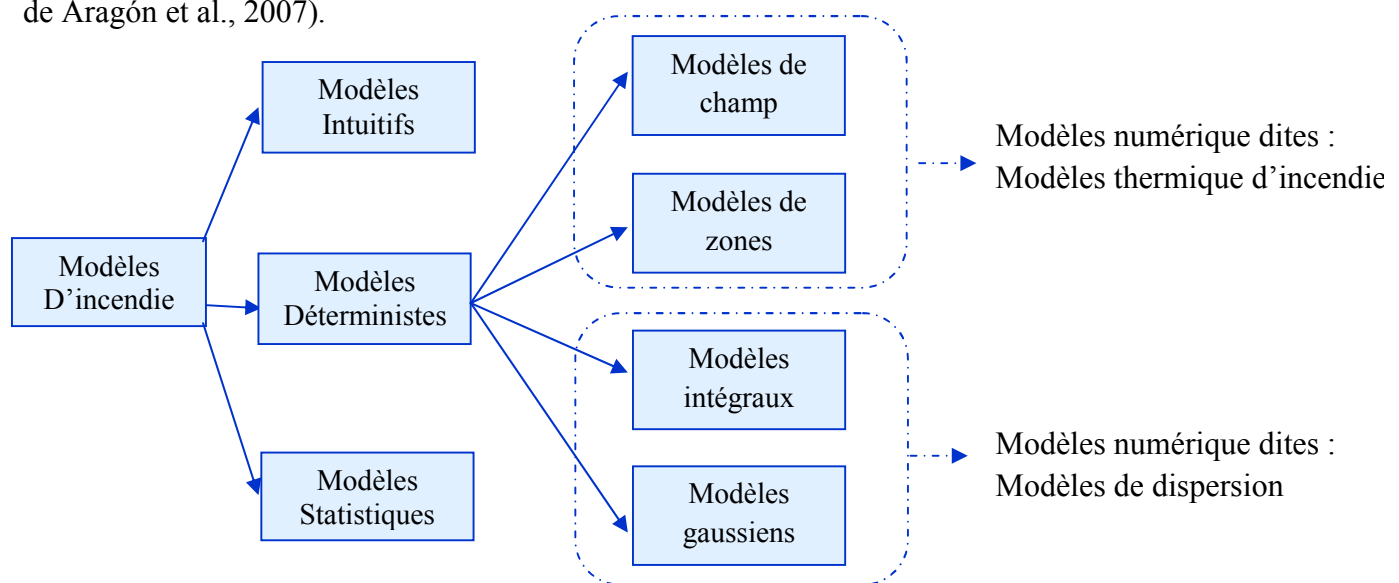


Figure I.2: modèles d'évaluation d'incendie.

1.4.1.1 Modèles statistiques d'incendie

Statistique, stochastique, également appelé les modèles empiriques prévoient un comportement plus probable du feu, les conditions moyennes et l'accumulation reconnaît obtenu à partir du laboratoire et du feu expérimental extérieur, ou des feux historiques. Ces modèles reposent sur des équations algébriques ou des approches analytiques simples et proviennent souvent de corrélations établies à partir de données expérimentales. Ils ont en général été conçus pour un usage spécifique comme par exemple l'estimation de la montée en puissance d'un incendie ou de la température de la couche chaude dans la pièce où a lieu l'incendie.

Ils utilisent des probabilités de certains événements (succès/échec du cloisonnement, naissance d'un incendie dans la vie du bâtiment, etc.). Le traitement des données se fait essentiellement par les méthodes classiques de calcul des probabilités et des statistiques. Les résultats sont des probabilités d'événements redoutés (états du feu, transition d'un état à un autre, échec de l'évacuation, etc.).

Il y a deux modèles empiriques largement en service, Australien et Canadien. En Australie, le modèle le plus employé couramment est le modèle de Mc Arthur pour les feux de forêt. Ces modèles ne font aucune tentative de n'inclure aucun mécanisme physique pour la propagation de feu ; c'est une description purement statistique des feux d'essai (Morvanet al., 2002).

La démarche adoptée par la modélisation statistique est représentée dans la figure ci-dessous :

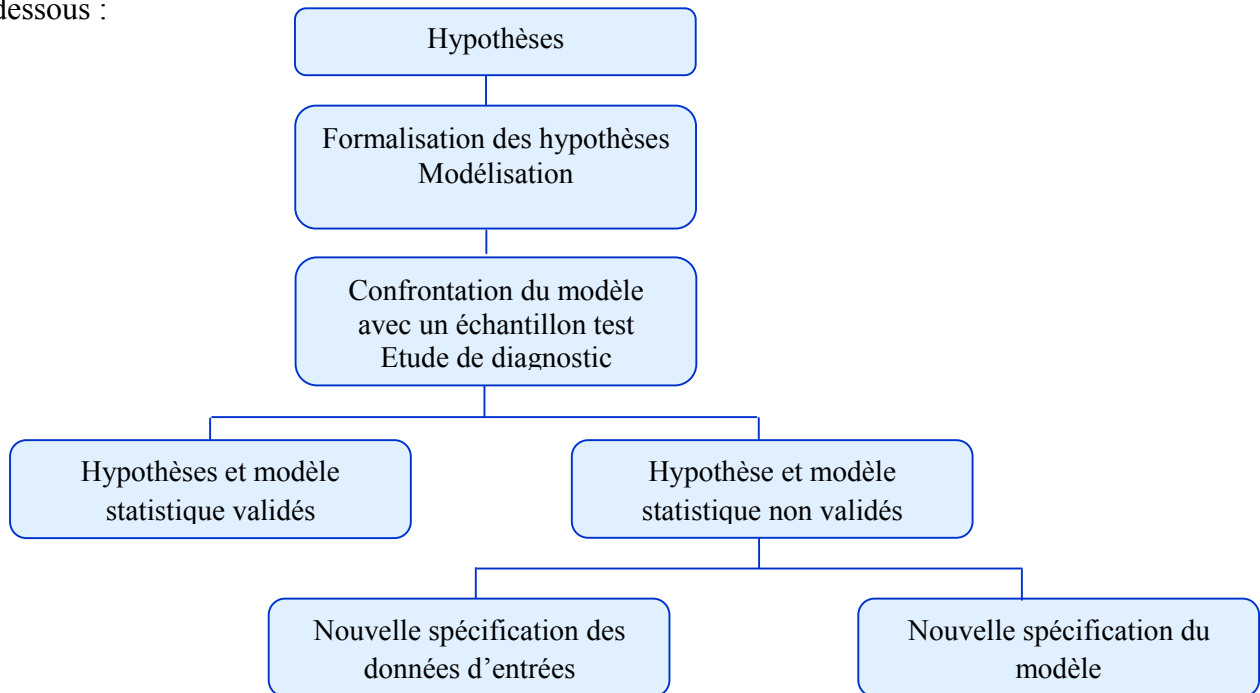


Figure I.3 : la démarche pour la modélisation statistique (Rambaud, 2007).

En s'appuyant essentiellement sur des corrélations empiriques, les phénomènes physiques sont représentés dans leur ensemble. L'intérêt principal de ce type de modélisation est sa grande facilité d'utilisation. En effet, la quantité de calcul nécessaire pour aboutir aux résultats est très faible et l'utilisateur du modèle n'a que très peu d'informations à fournir. Les calculs peuvent être fait « à la main » (Rambaud, 2007). Il peut donc être intéressant d'utiliser les courbes paramétriques au niveau normatif. Cependant, la prise en compte d'un nombre important de phénomènes physiques significatifs avec seulement quelques relations reste très difficile. De plus, le domaine de validité des relations établies est souvent restreint et les hypothèses utilisées ne sont pas toujours bien connues par l'utilisateur. Chaque courbe paramétrique est conçue pour un type d'application bien particulier : une courbe paramétrique s'appliquant à toutes les situations possibles n'existe pas. Ainsi, l'utilisation correcte de ce type de modèle n'est pas aussi évidente qu'il n'y paraît a priori : il existe un risque non négligeable d'aboutir à des conclusions erronées par suite d'un mauvais usage de ces relations paramétriques (Rambaud, 2007).

En guise d'exemple de courbe paramétrique simple, la représentation analytique d'après l'Eurocode 1 (Eurocode 1, 1991) de l'évolution de la température moyenne dans un local en feu est présentée. En phase d'échauffement (Desanghere, 2006), l'évolution de la température s'écrit :

$$\Theta_g = 20 + 1325[1 - 0.324 \exp(-0.2t^*) - 0.204 \exp(-1.7t^*) - 0.472 \exp(-19t^*)]$$

Où t^* désigne un temps virtuel défini par $t^* = t \cdot \Gamma$, le terme Γ valant :

$$\Gamma = \left(\frac{O/b}{3.4 \cdot 10^{-5}} \right)^2 \quad \text{Avec } O = \frac{A_w \sqrt{h}}{A_t} \quad \text{et } b = \sqrt{\rho C_p \lambda}$$

Dans cette expression, le terme O est le facteur de ventilation du compartiment étudié et le terme b est l'effusivité qui prend en compte la nature des parois du compartiment pour estimer les pertes thermiques à travers elles. Le terme A_t représente la surface totale des parois du compartiment. La durée du feu t_{\max} est déterminée en écrivant (Desanghere, 2006) :

$$t_{\max} = \max \left(\frac{2 \cdot 10^{-4} q_{t,d}}{O}, t_{\lim} \right)$$

Où la grandeur $q_{t,d}$ est la densité surfacique de charge d'incendie. Le terme t_{\lim} est un temps de combustion complète de la charge d'incendie. Sa valeur est indépendante de la ventilation du local. Ceci permet de prendre en compte la nature du combustible, qui peut constituer parfois le facteur limitant l'évolution du feu (Desanghere, 2006).

Une fois le combustible entièrement consommé, la température moyenne suit une phase de refroidissement modélisée par une décroissance linéaire au cours du temps, dont la pente dépend des paramètres précédemment évoqués. La figure I.4 montre un exemple de comparaison entre un résultat expérimental et la courbe paramétrique associée. On y observe une montée en température plus franche pour la courbe paramétrique, ainsi qu'une décroissance plus rapide. L'ordre de grandeur de la température moyenne maximale atteinte est correctement reproduit dans ce cas.

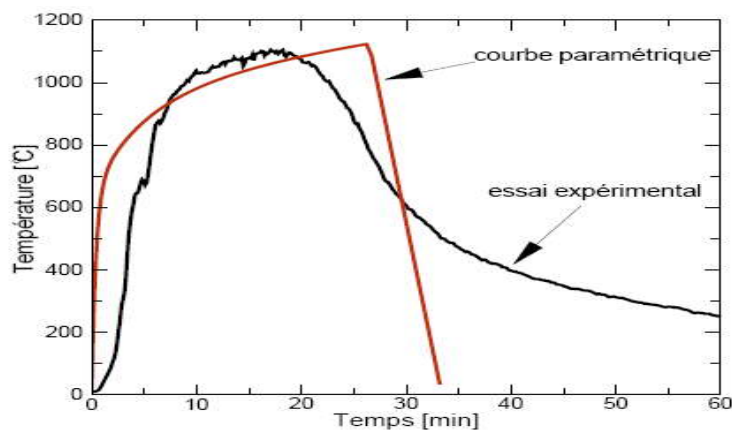


Figure I.4 : Courbe de feu paramétrique selon l'Eurocode 1.

Malheureusement le domaine de validité des modèles empiriques est limité à la gamme des paramètres à partir desquels a été élaborée la relation statistique. Pour les modèles semi-empiriques (tels que BEHAVE), les prédictions sont souvent de qualité médiocre (Hanson et al., 2000), la raison principale de ce manque de fiabilité résulte du fait qu'une grande partie de ces évaluations sont réalisées par extrapolation de feux réalisés à très petite échelle, dans des litières homogènes. (Anderson, 1965).

De nombreux modèles probabilistes peuvent être cités. Nous les présentons par auteurs ou organismes (Curtat, 1989 ; Benouraich, 1986):

THOR et SEDIN	Méthode statistique pour l'aspect coût/bénéfice des moyens de protection des bâtiments industriels ;
FITZGERALD	Etude probabiliste de la propagation d'un incendie à travers un bâtiment ;
NFPA	Plusieurs arbres de défaillances avec prise en compte du temps, Chaînes de Markov modélisant le cheminement du feu dans un espace d'états prédéfinis comme s'il était un phénomène sans mémoire ;
MORISHITA	Modèle à états ;
HOGNON	Réseaux de Pétri temporisés en simulation de Monte-Carlo ;
BECK	Modèle d'états et de transitions sur l'efficacité de la sécurité des personnes et les pertes monétaires ;
WILLIAMSON	Modèle couplant des approches déterministes à des approches probabilistes ;
BALDWIN	Méthode statistique pour la détermination de l'optimum économique de résistance au feu ;
RAMACHANDRAN	Modèles simplifiés de propagation du feu ;
LING	Modèle de propagation par graphe valué pour la détermination du chemin le plus probable de connexion d'un point source à un point cible du bâtiment ;
GSA	Arbre de défaillances

Tableau I.2 : Quelques méthodes probabilistes de sécurité incendie (Curtat, 1989 ; Benouraich, 1986).

1.4.1.2 Modèles déterministes

Ce constat a été à l'origine du développement de modèles plus physiques basés sur la simulation (totale ou partielle) des principaux phénomènes (turbulence atmosphérique, combustion, transferts thermiques entre la flamme et l'environnement, dégradation de la végétation (Bodrožic et al, 2007).

Ceux sont des modèles basés sur des principes physiques et qui ont le potentiel de prévoir exactement les paramètres d'intérêt sur une plus large gamme des variables d'entrée que les modèles empiriques. Ces modèles physiques peuvent également fournir des informations de base pour la description appropriée des processus physiques (c.-à-d., flux de fluide, transfert thermique, et cinétique chimique).

Ces modèles physiques impliquent que le réalisateur doit avoir une compréhension proportionnée des relations physiques fondamentales suffisamment pour atteindre les objectifs désirés et ainsi la physique fondamentale peut être représentée mathématiquement en sorte qu'elle permet la solution numérique.

Les modèles déterministes ont fait l'objet d'une large confrontation avec des résultats expérimentaux obtenus pour des feux à petite échelle, réalisés en laboratoire dans des litières. Les résultats de simulation ont également été comparés aux données collectées par la réalisation des essais en grandeur réelle.

Les modèles les plus communs décrivent le transfert et le transport de la fumée et de la chaleur, sont classés en deux catégories : *modèles numérique de dispersion* et *modèles numériques thermiques* (Figure I.2) (Morvan, 2002).

1.4.1.3 Les modèles intuitifs

Sont ceux qu'il est difficile de classer dans les deux premiers groupes. On peut dire qu'ils sont semi-probabilistes, car ils cherchent tous à nous indiquer dans quelle mesure un incendie aura lieu. Pour y arriver, ils prennent en compte une liste plus ou moins étendue des événements susceptibles d'engendrer ou d'aggraver un incendie. Ces événements sont souvent évalués à partir d'informations statistiques. Mais ces méthodes n'indiquent pas de fréquences d'événements. Les méthodes de calculs utilisées ne sont pas toujours théoriquement établies (d'où la dénomination d'intuitif).

Les modèles (ou méthodes) intuitifs sont nombreux. Citons-en quelques-uns pour information.

DELPHI	Méthode de collecte d'avis d'experts avec traitement statistiques des réponses et feedback;
GRETENER	Détermine le risque incendie en distinguant personnes et biens. L'impact des mesures de prévention et de protection est pris en compte;
SIA	Adaptation de la méthode GRETENER ;
ERIC	Informatisation de la méthode GRETENER;
MALHOTRA	Méthode de cotations calculant un niveau de dangerosité en utilisant des paramètres macroscopiques (activité, occupation, etc.) ;
NELSON	Méthode à cotations
MOSAR	Méthode qualitative opérant par confrontation de sources de dangers théoriques aux sources réelles de danger relevées sur une installation. Elle fait appel à d'autres méthodes (arbres de défaillances, SADT...) pour l'appréciation des dangers.

Tableau I.3 : Quelques méthodes intuitives de sécurité incendie (Scheilds, 1987 ; Cluzel, 1978).

Il existe des méthodes non spécifiques à l'incendie mais qui ont été utilisées dans ce domaine. Il s'agit notamment de :

- Méthodes de simulation (Monte-Carlo) ;

Méthodes de sûreté des systèmes ou de fiabilité prévisionnelle (Jeannette et al., 1985) telles que :

- BDF : Diagramme Bloc de Fiabilité,
- AdD : Arbre de Défaillance,
- AdE : Arbre d'Événements,
- CdM : Chaînes de MARKOV,
- AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.

La méthode DELPHI, déjà citée, n'est pas non plus spécifique à la sécurité incendie.

Les conclusions que l'on peut tirer de ce panorama des méthodes et modèles sont de trois ordres : le champ couvert, les connaissances utilisées et le cadre d'utilisation.

En ce qui concerne le champ couvert, aucun modèle n'est complet. Les aspects traités sont surtout :

- Les phénomènes thermophysiques (évolution de l'incendie en temps et en température, conditions d'enfumage, évolution de la température dans les éléments de structure, propagation du feu de local à local) ;

Les phénomènes psychophysiques (comportements humains au cours d'un incendie (Canter, 1980) mouvements de foules) ;

- l'action des extincteurs automatiques ;
- l'aspect constructif (cloisonnement, stabilité au feu) (Curtat, 1989).

Très peu d'entre eux prennent en compte les moyens de prévention destinés à réduire à la fois la fréquence des incendies et leurs conséquences. Alors qu'il s'agit de moyens qui n'augmentent pas de beaucoup les dépenses de sécurité, car il s'agit pour une grande part d'organisation humaine. Quelques modèles, les intuitifs surtout, essayent de nous dire dans quelle mesure un incendie est à craindre. Ce qui est tout à fait logique avant de commencer à appliquer des mesures.

Peu d'entre eux prennent en compte des facteurs tels que la précocité de la détection, l'arrivée des pompiers, l'implantation du bâtiment.

Du point de vue des connaissances utilisées, nous constatons un vif besoin de tenir compte de l'aspect aléatoire de l'incendie. Malheureusement, l'indisponibilité des probabilités des événements de base constitue la pierre d'achoppement des modèles probabilistes. On a donc souvent recours à des estimations d'experts ou à des techniques de cotation pour palier le fait d'utiliser des données statistiques sur un cas particulier (Curtat, 1989 ; Lamere, 1985)

Le cadre d'utilisation de ces modèles est le plus souvent un compartiment. Cela vaut encore plus pour les méthodes déterministes complexes qui exigent comme données des débits de pyrolyse qui ne peuvent être obtenus que par des essais. Sans parler de l'impact

économique de ces essais, leur caractère incontournable rend les modèles déterministes complexes impraticables en phase de conception.

1.4.2 Utilité de la modélisation d'incendie

Les applications de la modélisation sont multiples, on distingue :

- La reproduction ou l'amélioration de la connaissance d'un processus en précisant les différentes étapes, ce qui est la base d'un processus d'engineering.
- L'atteinte d'un résultat bien déterminé grâce à la modélisation à partir d'un modèle numérique afin de dégager des informations concernant le comportement réel du système

Alors que l'objectif de la modélisation des effets de l'incendie sur l'environnement atmosphérique est la prédiction de l'évolution des concentrations des polluants gazeux en premier lieu dans un milieu fermé, ou celle des paramètres influant sur la transformation des produits, tels que l'existence des parois, qui peuvent jouer un rôle par exemple dans le processus de fixation des polluants ; en deuxième lieu, la modélisation consiste à extrapoler pour un milieu ouvert afin d'avoir des informations sur le cycle de vie de façon réelle et cohérente (Bliefert et al., 2001), ainsi que la prédiction des effets thermiques radiatifs d'un incendie sur une population donnée.

1.5 Conclusion

La maîtrise du feu constitue une étape majeure de l'évolution humaine ainsi plusieurs niveaux de modélisation du feu peuvent être utilisés selon la nature des phénomènes étudiés. Chaque modélisation correspond à un degré de finesse différent dans la représentation des phénomènes réels. En général, le choix d'une modélisation résulte d'un compromis entre sa représentativité et le coût de calcul correspondant. Par exemple, une étude paramétrique est envisageable avec un résultat obtenu en quelques secondes pour chaque simulation. Elle ne l'est évidemment pas avec un résultat obtenu en quelques heures. Il ne faut évidemment pas s'attendre à étudier les phénomènes avec beaucoup de précision en utilisant un modèle simple.

Cependant, l'étude paramétrique peut aider l'utilisateur à trouver certaines configurations typiques sur lesquelles il pourra éventuellement se focaliser avec un modèle plus poussé. Ceci montre que les niveaux de modélisation sont complémentaires. Il n'existe pas de modèle qui domine les autres à tout point de vue. L'ingénierie de la sécurité contre l'incendie dispose donc d'une palette d'outils allant de la formule analytique aux modèles avancés, le recours à ces derniers n'étant pas systématiquement nécessaire. Le choix d'un modèle dépend avant tout de la finesse de représentation recherchée. Une définition correcte des attentes de l'utilisateur est donc un préliminaire incontournable.

Chapitre 2

Modèles numériques d'incendie

<i>II.1 Introduction.....</i>	<i>27</i>
<i>II.2 Modèles numériques d'incendie.....</i>	<i>28</i>
<i>II.3 Conclusion.....</i>	<i>59</i>

Chapitre II

Modèles numériques d'incendie

Dans le présent chapitre, plusieurs modèles numériques d'incendie dans l'espace tridimensionnel sont passés en revue, permettant de préciser le cadre du présent travail. Seuls seront présentés les concepts de base de la méthode de résolution et les équations nécessaires à la simulation, leurs domaines de validité, ainsi que les limites dont les modèles peuvent être définis de plusieurs manières.

II.1 Introduction

Avec l'accroissement de la puissance informatique, il devient désormais possible de modéliser et simuler numériquement, de manière plus ou moins réaliste, de nombreux phénomènes physiques et chimiques se déroulant au cours d'un feu. La modélisation numérique permet de se substituer en première approche à l'investigation expérimentale, en offrant un gain de temps et d'argent considérables par rapport à des essais réels. Elle donne aussi facilement accès à une grande quantité d'informations, contrairement à l'étude expérimentale. Elle apporte donc une aide précieuse à la compréhension et à la prédiction du feu.

Actuellement, les modélisations numériques sont à la portée d'un nombre grandissant de personnes, ce qui augmente naturellement le risque d'un mauvais usage (Shaw, 1992). En effet, la mise en œuvre de la simulation numérique doit être réalisée par un utilisateur expérimenté. Celui-ci doit traduire correctement le problème posé sous forme de données d'entrée pertinentes pour le code de calcul. Ceci suppose de bien connaître le domaine de validité de l'outil et les hypothèses employées. Il faut posséder à la fois les connaissances nécessaires sur la physique du feu et être aussi familier de l'outil utilisé pour tirer le meilleur parti de la simulation numérique (Cox et al., 2002).

Plusieurs niveaux de modélisation du feu peuvent être utilisés selon la nature des phénomènes étudiés. Chaque modélisation correspond à un degré de finesse différent dans la représentation des phénomènes réels. En général, le choix d'une modélisation résulte d'un compromis entre sa représentativité et le coût de calcul correspondant. Actuellement, pour un

même cas, l'obtention de résultats numériques prend de quelques secondes à une centaine d'heures sur un ordinateur personnel. Cette contrainte impose de bien choisir l'outil numérique à mettre en œuvre par rapport aux attentes de l'utilisateur. Par exemple, une étude paramétrique est envisageable avec un résultat obtenu en quelques secondes pour chaque simulation. Elle ne l'est évidemment plus avec un résultat obtenu en quelques heures. Il ne faut évidemment pas s'attendre à étudier les phénomènes avec beaucoup de précision en utilisant un modèle simple.

Cependant, l'étude paramétrique peut aider l'utilisateur à trouver certaines configurations typiques sur lesquelles il pourra éventuellement se focaliser avec un modèle plus poussé. Ceci montre que les niveaux de modélisation sont complémentaires. Il n'existe pas de modèle qui domine les autres à tout point de vue. L'ingénierie de la sécurité contre l'incendie dispose donc d'une palette d'outils allant de la formule analytique aux modèles avancés, le recours à ces derniers n'étant pas systématiquement nécessaire. Le choix d'un modèle dépend avant tout de la finesse de représentation recherchée. Une définition correcte des attentes de l'utilisateur est donc un préliminaire incontournable.

II.2 Modèles numériques d'incendie

Pour l'analyse du risque d'incendie et l'évaluation de ses conséquences sur la sûreté des installations industrielles et l'environnement voisinage, le spécialiste a de plus en plus besoin de faire appel à des outils de calcul validés qui lui permettant de faire des simulations de l'évolution d'un incendie dans un local et de son interaction avec son environnement. Ces outils de calcul, fondés sur l'interprétation de résultats expérimentaux, doivent lui permettre d'apprécier, pour un scénario donné, les marges disponibles avant d'atteindre la rupture ou le dysfonctionnement des équipements, d'apprécier le pilotage de l'installation et d'estimer la fraction de matières dangereuse rejetée dans l'environnement. En fonction du degré de précision souhaité, l'expert peut utiliser :

- Des formules mathématiques simples donnant une estimation de la température moyenne dans le local en fonction du temps, du flux radiatif reçu par une cible, etc. ;
- Des codes de calcul découpant artificiellement le local en deux zones homogènes (zone supérieure contenant les fumées et zone inférieure contenant l'air ambiant du local), réunies par le panache (colonne de gaz chauds au dessus du foyer). Ces codes fournissent une estimation des températures dans les deux zones et des murs, des flux radiatifs et convectifs, de la pression dans le local, des concentrations chimiques en espèces dans les zones (oxygène par exemple), des débits de ventilation.
- Des codes de calcul qui découpent artificiellement le local en dizaines de milliers de petits volumes dans lesquels ils calculent, par résolution du système complet d'équations de la physique, les valeurs précises de la température, de la pression et des différentes concentrations des espèces chimiques.

Un modèle numérique d'incendie est un outil qui simule les événements liés au feu, de la combustion en passant par l'effondrement des structures (il ne s'agit pas seulement d'évaluer la propagation du feu et des fumées). Ces modèles peuvent être déterminés soit d'après un modèle expérimental, soit d'après un modèle mathématique. Les modèles

expérimentaux ne s'appliquent que pour certains domaines physiques et (ou) humains (par exemple un compartiment); tandis que les modèles mathématiques, eux, emploient une série d'équations qui décrivent les phénomènes liés à l'incendie.

Les modèles numériques que l'on peut trouver se différencient selon leur méthode de résolution des réponses thermiques associées au feu. Ainsi, pour une approche par objectif, la classification des modèles d'incendie, (Figure I.2) est la suivante : Les modèles Gaussiens, les modèles intégraux et les modèles de développement de feu avancé ou les modèles thermiques d'incendie qui sont subdivisés en modèle de champs et modèle de zones.

II.2.1 Modèles numériques de dispersion

L'évaluation des effets toxiques d'un panache d'incendie sur l'environnement est extrêmement complexe, et la pertinence des calculs de dispersion atmosphérique effectués dans cette optique passe notamment par la détermination correcte du terme source de pollution. Ce terme source comprend des données relatives à la composition chimique des fumées produites dans le scénario de feu étudié, mais comprend également des données caractéristiques des aspects thermiques de production et d'évolution du panache, ne serait-ce que par le simple fait que les réactions chimiques de combustion sont systématiquement associées à des transferts d'énergie (Marlair, 1998).

L'utilisation des modèles numériques pour l'évaluation des effets des incendies, que se soit dispersion atmosphérique d'un produit ou effets thermiques présente de nombreux avantages par rapport à des expérimentations : la rapidité de l'étude et la possibilité d'envisager un grand nombre de cas (Mouilleau, 2002).

Les modèles numériques destinés à la modélisation des effets d'incendie peuvent se ranger par ordre de complexité croissante en trois principales familles :

- Les modèles gaussiens;
- Les modèles intégraux;
- Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics).

En général, les modèles gaussiens et les modèles intégraux sont dédiés à la modélisation de la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. Les temps de calcul sont courts, de l'ordre de la minute (Mouilleau, 2002).

Le troisième type résout directement le système d'équation décrivant les mécanismes physiques de la dispersion. Les temps de calcul sont plus longs, de l'ordre de l'heure, jusqu'à plusieurs jours, selon la complexité et l'étendue du domaine de calcul considéré (Mouilleau, 2002).

II.2.1.1 Les modèles gaussiens

A. Principes du modèle

Les premiers modèles de dispersion utilisés sur ordinateur sont de type Gaussien. Leur origine remonte aux travaux de Sutton (1932), de Pasquill (1961, 1974), de Gifford (1961, 1968) et en France, de Le Quinio (1964, 1975) et de Doury (1977, 1986). Ces modèles permettent de modéliser la dispersion d'un gaz passif qui va se disperser du fait de la seule

action du fluide porteur, l'air. Le transport et la diffusion du gaz vont alors dépendre du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

En considérant la diffusion moléculaire négligeable, la diffusion turbulente homogène et isotrope et un champ de vent uniforme dans l'espace, la concentration de produit est supposée suivre une distribution gaussienne le long des plans perpendiculaires à la direction du rejet, comme la montre la Figure II.1 ci-dessous (Riou 1989).

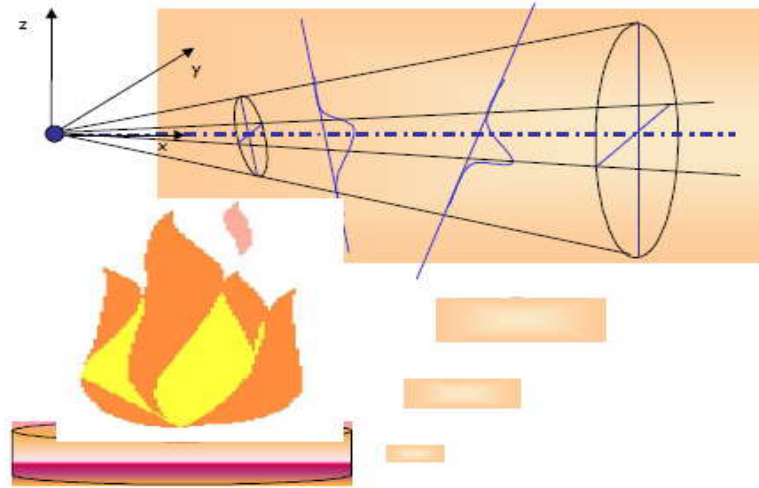


Figure II.1 : Distribution gaussienne des concentrations au sein d'un panache (Cretin, 2002).

La concentration est ainsi une fonction de la distance sous le vent, comptée depuis le point d'émission. Quand la distance augmente, les concentrations au centre du panache diminuent globalement. De plus, la concentration est proportionnelle au débit massique, mais inversement proportionnelle à la vitesse du vent (Cretin, 2002).

B. Equations de base

Pour ces modèles, la distribution des concentrations autour de la trajectoire de l'axe du panache est supposée gaussienne et cela signifie, que la concentration sera plus forte au centre du panache qu'en périphérie, comme le montrent les expressions suivantes (Mouilleau, 2002).

- **rejet ponctuel et instantané d'une masse de gaz M** : Dans ce cas, la concentration C du gaz dans l'atmosphère en un point (x,y,z) est de la forme :

$$C(x,y,z) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-x_0-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + a \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- C : Concentration [kg/m³] ;
- M : Masse de produit libéré [kg] ;
- u : Vitesse moyenne du vent [m/s] ;
- t : Temps depuis l'émission du gaz ;

- α : Coefficient de réflexion au sol ;
- x_0, y_0, z_0 : Coordonnées de la source de produit [m] ;
- x, y, z : Coordonnées du point où l'on calcule la concentration [m] ;
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Ecart-types de la distribution gaussienne de la quantité M de gaz par rapport à sa localisation à l'instant t [m].

- **Rejet continu – Modèle « à bouffées »** : Pour le rejet continu, il est possible de le modéliser en considérant l'émission d'une succession de rejets instantanés qui évolueront de façon gaussienne. Le rejet de débit en fonction du temps Q(t) se décompose en n rejets instantanés de masse M_i tels que (Mouilleau, 2002) :

$$M_i = Q \left(\frac{t_{i+1} + t_i}{2} \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (II.2)$$

Le $i^{\text{ème}}$ rejet instantané, indicé i, est émis à l'instant t_i et a une masse M_i . La concentration C du gaz dans l'atmosphère en un point (x,y,z) est alors de la forme :

$$C(x, y, z) = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left(- \frac{(x - x_0 - u(t - t_i))^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right) + a \exp \left(\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (II.3)$$

Avec :

- M_i : Masse du $i^{\text{ème}}$ rejet instantané [kg] ;
- u : Vitesse moyenne du vent [m/s] ;
- n : Nombre de rejets instantanés considérés ;
- t_i : Instant de fin d'émission du $i^{\text{ème}}$ rejet [s] ;
- t_{i-1} : Instant de fin d'émission du (i-1) $^{\text{ème}}$ rejet et début d'émission du $i^{\text{ème}}$ rejet [s] ;
- α : Coefficient de réflexion au sol ;
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Ecart-types de la distribution gaussienne du $i^{\text{ème}}$ rejet instantané de masse M_i par rapport à sa localisation à l'instant t [m].

- **Rejet continu – Modèle « panache »** : Dans le cas où le rejet est continu et la vitesse de vent est suffisamment importante pour que le phénomène de diffusion dans la direction du vent soit négligeable devant le phénomène de convection, la concentration C du gaz dans l'atmosphère en un point (x, y, z) peut s'écrire (Mouilleau, 2002) :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left(- \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right) + a \exp \left(\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (II.4)$$

C. Domaine de validité

Le modèle gaussien s'applique aux rejets de gaz passifs, le produit rejeté doit donc avoir :

- Une densité à peu près égale à celle de l'air (ou bien il est très dilué);

- Une température identique à celle de l'air ;
- Une vitesse initiale relative nulle.

Il existe cependant des gaussiens « améliorés » qui savent prendre en compte les mécanismes supplémentaires de dépôts de particules et les fumées d'incendie (Mouilleau, 2002).

Les modèles gaussiens s'appuient sur un champ de concentration tridimensionnel généré par une source ponctuelle. La diffusion moléculaire est négligée devant la diffusion turbulente, la vitesse du vent doit donc être d'au moins 1 à 2 m/s. Dans la plupart des cas, le champ de vent est uniforme avec un profil vertical constant, La turbulence atmosphérique est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité, elle est prise homogène et isotrope (Mouilleau, 2002).

Un autre point qu'on doit prendre en considération est le terrain qui doit être homogène et plat. En effet, la présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...) introduirait des perturbations de l'écoulement de l'air importantes de l'écoulement de l'air qui ne sont pas pris en compte par ces modèles. Aussi, de façon pratique, les résultats sont valables au-delà d'au moins 100 m depuis le point de rejet (Richardson, 1920), au-delà de distances de dispersion de l'ordre de la dizaine de kilomètres, les résultats présentent plus d'incertitudes et ne sont plus valables car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés (Mouilleau et al., 2002).

D. Les principaux outils numériques existants

Les modèles gaussiens, traitant de rejets continus sont généralement utilisables sur des ordinateurs type PC. Les temps de calculs sont en général inférieurs à 15 minutes. Les modèles permettant de prendre en compte des conditions de rejet ou des conditions météorologiques variables dans le temps peuvent demander un matériel supérieur au PC et/ou nécessiter un temps de calcul plus long. Parmi les outils gaussiens on peut citer : PHAST, CHARM, HASTE, ALOHA, CAMEO...

E. Limites et écueils à éviter

Il faut rappeler que les modèles gaussiens s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. De fait, la qualité de ce type de modèle est conditionnée par les éléments suivants :

- Pas de présence de reliefs, d'obstacles, donc le terrain doit être plat et de rugosité uniforme, présence éventuelle d'une couche d'inversion; prise en compte d'obstacles à travers le paramètre de rugosité, régime d'écoulement stationnaire et uniforme.

- Pour pouvoir utiliser ce type de modèle, il faut également déterminer la hauteur du panache, une possibilité consiste à utiliser la corrélation de Briggs (1969). Suivant les conditions de stabilité, elle permet de calculer les hauteurs du panache en fonction de la hauteur d'émission, de la poussée initiale, de la vitesse du vent et de la distance de la source.

- Cette corrélation donne les variations suivantes :

- plus la poussée est importante, plus le panache sera élevé ;

- plus la distance par rapport à la source est importante, plus le panache sera élevé, à moins que son niveau de dilution soit tel qu'il devienne passif et poursuive alors sa dispersion à altitude constante ;
- plus la vitesse du vent est importante, moins le panache sera élevé, il sera couché plus rapidement (Briggs, 1969).

- Il est clair également, que plus la hauteur initiale d'émission des fumées est importante, plus le panache se trouvera à une altitude élevée. Il est à noter que ce calcul n'est pas nécessaire pour les deux autres types de modèles décrits par la suite.

- De plus, il est important de rappeler que le domaine de validité des modèles gaussiens se situe entre 100 m et 10 km pour la plupart. Si la limite supérieure se révèle suffisante dans la majorité des cas, la limite inférieure peut s'avérer plus problématique. Dans ce cas, il faut utiliser soit un modèle 3D soit un modèle intégral qui peut prendre en compte la zone proche du rejet où les fumées n'ont pas un comportement de type gaz passif. Ceci étant, conserver une distance de 100 m autour du site dans le cas d'un incendie constitue une approche prudente qui permet de prendre en compte la possibilité de voir le panache rabattu au sol par une rafale de vents plus importants et l'influence des bâtiments.

II.2.1.2 Les modèles intégraux

La limitation du modèle Gaussien s'est vite avérée inacceptable pour bon nombre d'études faisant intervenir des gaz dont la masse volumique était sensiblement plus importante que celle de l'air. C'est ainsi que, les modèles intégraux ont été développés pour simuler le comportement des nuages de gaz plus lourds que l'air. Ils sont plus spécifiquement utilisés pour le champ proche et ils sont raccordés à des modèles gaussiens pour le champ lointain (Mouilleau et al., 2002)..

A. Principes du modèle

L'emploi d'un modèle intégral permet de modéliser les mécanismes physiques suivants qui ne peuvent être considérés avec un modèle gaussien (Mouilleau et al., 2002) :

- Les effets de turbulence dynamique, pour les rejets sous forme de jet à grande vitesse d'émission ;
- Les effets de gravité, pour les rejets de gaz lourds ;
- Les effets de flottabilité pour les rejets de gaz légers (Mouilleau et al., 2002).

Le modèle intégral permet de modéliser ces mécanismes. Ce type de modèle est basé sur les équations de la mécanique des fluides dont le système d'équations est suffisamment dégénéré pour permettre une résolution rapide en introduisant des paramètres représentant globalement les mécanismes non modélisés. A cet effet, les coefficients des modèles intégraux sont « calés » sur des expérimentations (Mouilleau et al., 2002).

Par ailleurs, ces modèles comprennent, dans la plupart des cas, un modèle gaussien pour modéliser des nuages de gaz passifs, un module de calcul permettant de déterminer de façon plus ou moins forfaitaire le terme source de rejet en fonction des conditions de stockage du produit et du type de rejet (rupture guillotine, ruine du réservoir, évaporation de flaque...) (Mavrothalassitis et al., 1995 ; Mouilleau . et al., 1991a ; Witlox , 2000).

B. Equations de base

Pour mettre en place un modèle intégral on doit :

- Paramétriser certaines équations de la mécanique des fluides et la sélection de méthodes numériques de résolution;
- calager des paramètres introduits dans le système d'équations (Mouilleau et al., 2002).

Chaque outil utilise une mise en équation spécifique et qui lui est propre pour chacun des mécanismes physiques modélisés (effets de gravité des gaz lourds, effets dynamiques des jets turbulents...).

Dans ce qui suit on va présenter l'approche globale retenue par la plupart des outils intégraux (Mouilleau et al., 2002).

- **Rejets instantanés** : Pour la modélisation de la dispersion d'un rejet instantané, le modèle suit le nuage dans son ensemble. Les résultats permettent de donner la position et les propriétés au centre du nuage à différents instants après le rejet. Le nuage est généralement supposé avoir une section horizontale circulaire et une section transversale verticale circulaire si le nuage est élevé et de forme elliptique tronquée si le nuage touche le sol et s'effondre (Mouilleau et al., 2002)..

- **Rejets continus**: Dans ce cas, le modèle considère que le produit est encore en train d'être rejeté, par la suite, il donne les caractéristiques des sections transversales situées le long de l'axe de ce panache (dimensions, concentrations, temps nécessaire pour atteindre la section depuis le point de rejet...) (Mouilleau et al., 2002).

La section transversale est toujours considérée comme circulaire si le nuage est élevé ou elliptique si le nuage touche le sol et s'effondre.

Puisque la modélisation d'un rejet continu est seulement valable après que le panache se soit totalement développé, si le rejet est relativement court ou encore de durée limitée, le modèle doit alors considérer le développement partiel du panache et ajuster ses calculs de façon adéquate (Mouilleau et al., 2002).

- **Rejets de durée limitée** : La modélisation des rejets de durée limitée considère ces rejets comme des rejets instantanés, c'est-à-dire comme une masse rejetée au lieu d'un débit de rejet (Mouilleau et al., 2002).

Toutefois, il n'est pas possible de prévoir à partir des données d'entrée si le rejet continu va conduire ou pas à un panache totalement développé. Aussi le modèle commence toujours par une modélisation de rejet continu. A chaque pas de temps après l'arrêt du rejet, il vérifie si le nuage ne présente pas au global les caractéristiques d'un rejet instantané. Si tel est le cas il alors remplace le nuage continu par un nuage équivalent circulaire instantané. Cette approche est qualifiée de quasi-instantanée (Mouilleau et al., 2002).

Les nuages continus et instantanés ont des formes très différentes. Le passage vers une approche quasi-instantanée peut conduire à des discontinuités dans les résultats. La concentration en un point donné peut de ce fait changer de façon abrupte à l'instant du

changement. Il est malgré tout possible de palier à ce problème en utilisant des facteurs de correction pour modifier les résultats du modèle continu en une façon qui reflète l'étalement et l'entraînement de la tête et de la queue du nuage (Couillet, 2002).

- **Déplacement du nuage :** Le déplacement et le développement géométrique du nuage sont calculés en fonction de sa quantité de mouvement. Plusieurs facteurs vont intervenir successivement ou simultanément (Mouilleau et al., 2002):

- Quand le nuage est en contact avec le sol ou atteint une couche d'inversion, la composante verticale de la quantité de mouvement est transformée en composante horizontale, ce qui se traduit par une augmentation de la largeur du nuage (Mouilleau et al., 2002).

- Si le nuage est plus lourd que l'air, il va s'effondrer sur le sol ce qui va générer de la turbulence, entraîner de l'air et changer sa section transversale circulaire en une ellipse tronquée. Le sol exerce une force de frottement sur les zones du nuage qui sont en contact, ce qui diminue la quantité de mouvement du nuage.

- Si un nuage au sol a une densité suffisamment petite par rapport à celle de l'air alors le nuage peut décoller du sol.

- La quantité de mouvement va être perdue progressivement du fait de l'entraînement de l'air et de l'éventuel frottement du nuage avec le sol. Le nuage est par la suite entraîné par le vent (Couillet, 2002).

- **Dilution du nuage :** Plusieurs sources de turbulence vont entraîner de l'air dans le nuage et le diluer. Le modèle considère les sources de turbulence dues :

- À la quantité de mouvement initiale ;
- Au cisaillement du champ de vent ;
- À l'effondrement d'un nuage dense ;
- À la turbulence atmosphérique.

Chacun des mécanismes participe à la dilution du nuage avec une intensité différente et variable selon l'évolution des caractéristiques du nuage. A chaque étape de la dispersion, le modèle évalue les mécanismes actifs et calcule un taux d'entraînement d'air total (Couillet, 2002).

- **Concentration dans le nuage :** L'air est entraîné par les bords du nuage et se déplace graduellement dans le corps du nuage (Couillet, 2002).

Le profil de concentration dans une section du nuage va changer avec le temps. Le profil de concentration varie de façon franche dans les premiers instants de la dispersion pour prendre des variations régulières et monotones au fur et à mesure que la dilution s'opère. Le profil de concentration tend ainsi vers une forme gaussienne lorsque la dispersion devient passive.

Certains modèles donnent comme résultat de concentration une valeur moyennée temporellement au centre de gravité du nuage pour une hauteur fixée, ou encore à la moyenne des concentrations à la verticale du centre de gravité. D'autres modèles plus élaborés fournissent l'évolution de la concentration au sein du nuage (Couillet, 2002).

C. Domaine de validité

Ce type de modèle s'applique aux gaz neutres, aux gaz denses et parfois aux gaz légers (pour les versions les plus récentes des logiciels). La turbulence atmosphérique est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité atmosphérique, pour éviter une modélisation lourde de la turbulence (Mouilleau et al., 2002).

Le terrain est supposé homogène et idéalement plat afin de ne pas introduire des perturbations complexes de l'écoulement de l'air. La présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...) introduirait des perturbations de l'écoulement de l'air complexes. Les caractéristiques du terrain sont définies sous la forme d'une seule hauteur de rugosité pour toute la région du rejet (Mouilleau et al., 2002).

Le champ de vent est uniforme, le profil vertical du vent est retenu comme constant, la vitesse du vent, la température de l'air et de la densité de l'atmosphère sont considérées variables avec l'altitude. Une couche d'inversion de température peut parfois aussi être prise en compte (Couillet, 2002).

Comme pour les modèles gaussiens, au-delà de la dizaine de kilomètres, les résultats ne sont plus valables car d'autres phénomènes de turbulence et de diffusion doivent être considérés (Couillet, 2002).

D. Les principaux outils numériques existants

Parmi les outils de simulation basés sur les modèles intégraux on peut citer : DENZ, CIGALE 2, DENZ-EDF, EIDSVIK, EOLE, GALON, CRUNCH - VAR - EDF, HEGADAS, DEGADIS, HASTE, MIDAS, SLAB, MATHEW/ADPIC, DRIFT

E. Limitations et écueils à éviter

Outre les limitations citées précédemment pour les modèles gaussiens, le choix et l'établissement des paramètres utilisés pour simplifier les équations de la mécanique des fluides conditionnent la qualité de ce modèle. Un inconvénient majeur est de supposer de fait des terrains soit plats et libres, soit caractérisés par leur seule rugosité ; ceci ne permet pas de modéliser les interactions nuage / sillage d'obstacle.

Le calage et la validation de ces modèles repose sur la comparaison entre les concentrations mesurées lors des campagnes d'essais (notamment Thornley Island) et les concentrations calculées par le modèle. Le nombre de campagnes d'essais n'est malheureusement pas très important et l'augmentation du nombre de paramètres dans ces modèles peut poser des difficultés de calage difficilement surmontables.

Par ailleurs, cette comparaison n'est pas toujours aisée puisque les calculs donnent une seule valeur de concentration dans le nuage, pouvant correspondre à une concentration moyennée temporellement au centre de gravité du nuage pour une hauteur fixée, ou encore à la moyenne des concentrations à la verticale du centre de gravité... L'essai expérimental fournit par contre une valeur de concentration en un ou plusieurs points de l'espace et dans le temps.

Enfin, il faut souligner que des erreurs issues du code où une mise en équation des mécanismes physiques non réalistes peuvent être masqués par l'utilisation de ces paramètres (Couillet, 2002).

II.2.2 Les modèles numériques thermiques

Les modèles thermiques d'incendie les plus communs décrivent le transfert et le transport de la fumée et de la chaleur dans un compartiment. Ces modèles sont appelés « modèles de zones » et « modèles de champs ». Mais les modèles diffèrent selon leurs domaines d'applications ; par exemple, la résistance des structures au feu ou les modèles de détection d'incendie. La classification adoptée par Olenick et Carpenter est subdivisée en six types d'application : Résistance au feu des structures, modèle de zone, modèle de champs, évacuation des personnes, réponse des systèmes de sécurité et enfin les divers. Nous réduisons ici le nombre de catégories à cinq en regroupant les modèles de zones avec les modèles de champs dans une nouvelle catégorie que nous appelons « modèle thermique d'incendie ». De cette manière, les modèles sont classés strictement selon leur domaine d'application et non plus sur les méthodes mathématiques qu'ils emploient.

Dans cette classification, nous pouvons distinguer deux groupes :

- Le premier donne la réponse thermique et mécanique de la structure durant le feu ;
- Le second s'intéresse à la détermination des exigences que la structure doit satisfaire en cas d'incendie.

II.2.2.1 Modèle de zones

Les modèles à zones ont été massivement utilisés depuis de nombreuses années pour étudier les feux de compartiment, principalement parce qu'ils nécessitent une faible puissance informatique. Un calcul effectué avec un tel modèle ne prend aujourd'hui que quelques dizaines de secondes sur un ordinateur courant de bureau. Cette technique peut être considérée comme une macro-approche pour la modélisation des problèmes d'incendie (Desanghere, 2006).

A. Principes du modèle

Un modèle de zones est un modèle numérique, son principe est de découper le volume du contrôle en un nombre très réduit de volumes encore appelés zones au sein desquelles les grandeurs caractéristiques sont supposées uniformes. Pour la plupart des modèles, une zone correspond à une pièce d'un bâtiment, un bureau ou un hall industriel. Toutefois, certains modèles décomposent une pièce en zones dont les frontières ne correspondent à aucune barrière réelle mais essaient de prendre en compte les phénomènes physiques de façon à ce que chaque zone ait des propriétés homogènes (Chow, 2006).

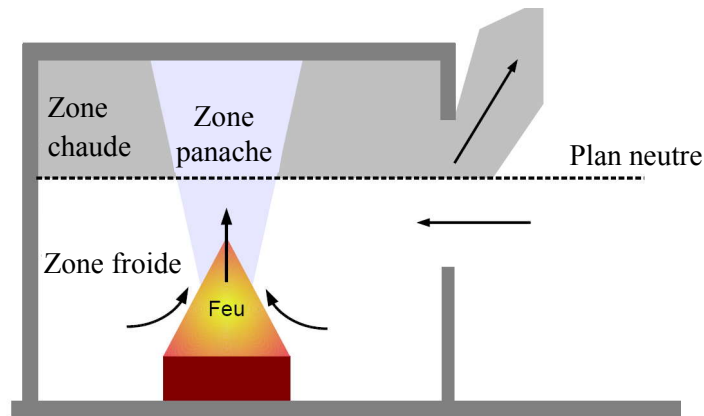


Figure II.2 : Schématisation de l'approche utilisée par les modèles à zones. Les flèches indiquent le sens des écoulements (Desanghere, 2006).

Le plus commun des modèles de zone découpe un volume en deux parties : une zone chaude et une zone froide. Ce modèle fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de stratification dans le compartiment simulé (cas de l'incendie généralisé) et que les grandeurs du problème sont homogènes (Janssens, 1992).

Dans le cas où le feu est de puissance réduite comparativement aux dimensions du local, on sépare classiquement le volume du compartiment en une zone « chaude » sous le plafond et une zone « froide » au niveau du sol. On utilise ainsi deux zones pour décrire l'intérieur du local. La figure II.2 représente cette approche qui tient compte de l'accumulation de fumées en partie haute du compartiment. Lorsque le feu est suffisamment puissant par rapport à la taille du local, la température et la composition des gaz deviennent homogènes et il n'existe plus de distinction entre couche chaude et couche froide. Il est alors possible de n'utiliser qu'une seule zone pour décrire le contenu du compartiment (Manuel de l'utilisateur 1999).

D'autre part les ingénieurs de la sécurité incendie doivent faire de nombreuses hypothèses pour simplifier les équations qui régissent la base de cette modélisation. Les principales hypothèses sont :

- La fumée forme une couche chaude dans la partie supérieure du compartiment (ce qui est le cas dans les incendies réels). La couche chaude (fumée) et la couche froide (air) sont supposées avoir des propriétés physiques homogènes, ce qui n'est pas vraiment le cas dans la réalité. Cependant, cette approximation est raisonnable puisque les variations des propriétés physiques dans une couche sont faibles devant les variations des mêmes propriétés à l'interface entre les deux zones (Desanghere, 2006).

- Le panache conduit les fumées et la chaleur dans la couche chaude. Le volume du panache est supposé petit en comparaison avec le volume de la zone chaude et on néglige son effet dans la stratification des fumées. On considère ainsi que toutes les fumées montent de manière uniforme dans le compartiment et non pas, comme dans la réalité, c'est-à-dire dans le panache, juste au dessus du foyer (Desanghere, 2006).

- Le mobilier dans la pièce n'est pas compté ; la chaleur s'évacue uniquement par transfert thermique aux parois et aux ouvertures du compartiment. (Certains modèles de zones peuvent néanmoins déterminer la propagation des flammes à quelques meubles).

Les paramètres d'entrée des modèles de zones sont généralement la géométrie du compartiment, les propriétés thermique des parois (tous les murs, le sol et le plafond), le nombre et la taille des ouvertures (fenêtres, portes ouvertes, vitrage brisé, ventilations), la nature et le débit calorifique du combustible.

Les grandeurs de sortie des modèles de zones sont, principalement, les temps de réponse du système de sécurité (détecteur, alarme et sprinklers), la durée minimale avant flash-over, les propriétés thermochimiques dans les deux couches (température, pression, concentration des espèces) et enfin la hauteur de l'interface.

Le modèle de zone ne peut correctement prendre en compte le re-rayonnement provenant des parois. Le débit calorifique n'est pas une sortie (grandeur de sortie), des essais d'incendie réels standards sont nécessaires pour quantifier la taille du feu et pour que les experts de l'incendie modélisent de manière correcte chaque cas d'étude.

- Modèles à une zone

Les modèles à une zone sont des modèles numériques qui calculent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps, en intégrant les équations différentielles ordinaires exprimant les bilans massiques et énergétiques. Ils supposent que la température est uniforme dans le compartiment. Un exemple en est donné à la figure ci-après (Guillaume, 2006).

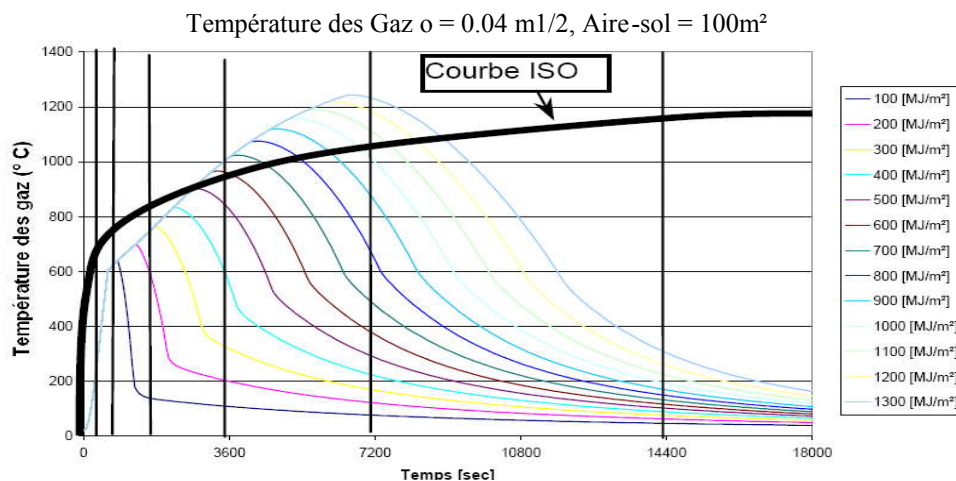


Figure II.3 : exemple de courbe obtenue par un modèle de zone pour différentes charges au feu pour un compartiment de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, avec des parois de 12 cm de béton recouvertes de $1,5 \text{ cm}$ de plâtre dans le cas d'un RHRf de 250 kW/m^2 .

- Modèles à deux zones

Les modèles à deux zones sont des modèles numériques qui calculent l'évolution de la température des gaz en fonction du temps dans la couche inférieure et supérieure, à l'aide des bilans massiques et énergétiques écrits pour chacune des deux couches au sein desquelles la température est supposée uniforme (Guillaume, 2006).

Un incendie peut être appréhendé par un modèle à deux zones qui lui même basculera vers un modèle à une zone au moment du flashover. Ces modèles ont été développés plus particulièrement par l'Université de Liège, notamment au sein du programme OZONE.

Ces modèles sont utilisés lorsque l'incendie est de petite taille comparée à celle du local. L'épaisseur de la couche inférieure reste à température assez basse et ne contient pas de produits de combustion. Elle est très importante pour apprécier les conditions de survie des occupants dans le compartiment (Guillaume, 2006).

B. Equations de base

Des bilans de conservation de la masse et de l'énergie permettent de traduire les échanges se produisant entre ces zones. Des corrélations empiriques sont également utilisées pour décrire globalement certains phénomènes physiques comme l'entraînement d'air dans le panache par exemple. La structure des écoulements n'est pas explicitement représentée, si bien que l'on peut qualifier ce type d'approche de modèle à zéro dimension.

Les modèles de zone prévoient comment l'état des couches supérieures et inférieures de gaz changent avec le temps en résolvant les équations de conservation de la masse et de l'énergie avec les conditions appropriés aux limites. Pour illustrer la technique du modèle de zones, un ensemble générique d'équations sera développé, et une procédure pour résoudre les équations sera présentée ci-dessous.

Lorsque le feu est de taille suffisamment importante par rapport aux dimensions du local dans lequel il se trouve, il est possible de supposer que les grandeurs sont homogènes au sein de celui-ci. Cette description n'utilise qu'une seule zone pour décrire le contenu du local et elle est employée notamment pour la modélisation de la phase de feu pleinement développé dans un compartiment. Ce type d'approche a été initialement proposé par Kawagoe (Kawagoe, 1958).

Les équations utilisées dans le modèle de zones ont la forme mathématique d'un système d'équations différentielles ordinaires (ODE). Ces équations sont établies à partir de la conservation de la masse, la conservation de l'énergie (la première loi de la thermodynamique), la loi de gaz parfaits et diverses relations pour la densité et l'énergie interne.

Ces équations permettent de calculer en fonction du temps des quantités comme la pression, la taille de la couche de fumées et les températures engendrées par l'accumulation de masse et d'enthalpie dans les deux couches de fumée. Le modèle de zones se compose alors de l'ensemble des équations différentielles pour calculer l'environnement de chaque compartiment. Beaucoup de formulations basées sur ces hypothèses peuvent être établies sur la base des définitions de la densité, de l'énergie interne et de la loi idéale de gaz. Bien qu'analytiquement équivalentes, ces formulations diffèrent dans leurs propriétés numériques. Chaque formulation peut être exprimée en termes de débits de masse et d'énergie, représentant les échanges entre les zones du fait de phénomènes physiques.

Ces phénomènes peuvent être :

- Le transfert de chaleur par rayonnement ;
- L'entraînement d'air et le transport d'énergie par le panache. Un panache entraîne de l'énergie et de l'air vers la couche chaude de fumées ;
- Les ventilations naturelle ou forcée. Par exemple, une ouverture échange de la masse et de l'enthalpie entre les zones connectées par celle-ci ;
- La convection. Celle-ci entraîne un échauffement des parois du local étudié à partir de la température des fumées.

La modélisation du feu par zone implique l'utilisation d'équations différentielles ordinaires raides, c'est à dire que de grandes variations temporelles sont présentes dans les solutions. Dans la situation, les variations de pression sont plus rapides que celles des paramètres comme les températures de couche ou les hauteurs d'interface. Des solveurs adaptés sont requis pour résoudre les équations différentielles ordinaires utilisées dans les modèles de zone, du fait de leur raideur.

Les méthodes de Runge-Kutta ou de Prédicteur/Correcteur comme Adams-Bashforth ou Adams-Moulton requièrent des pas de temps réduits prohibitifs en temps de calcul, pour appréhender les phénomènes de faible amplitude temporelle comme la pression. Les méthodes qui calculent le Jacobien (ou qui l'approchent) ont une stabilité beaucoup plus grande pour des problèmes raides et sont ainsi plus aptes à déterminer une solution.

Dans un compartiment recevant des fumées issues d'un compartiment adjacent, l'entrée est calculée comme une zone de panache équivalent. Pour un compartiment, et donc deux couches de gaz, le système est alors représenté par 11 variables liées entre elles par le volume, les bilans massique et énergie, et la loi des gaz parfaits (Van Niel, 2007):

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (II.5)$$

$$E_i = c_v \cdot m_i \cdot T_i \quad (II.6)$$

$$P = \mathfrak{R} \cdot \rho_i \cdot T_i \quad (II.7)$$

Avec :

- E_i : Energie interne du gaz de la couche i ;
- m_i : Masse du gaz de la couche i ;
- T_i : Température du gaz de la couche i ;
- ρ_i : densité d'une couche de gaz ;
- P : pression dans l'ensemble d'un compartiment.

Pour les équations :

- La première équation traduit la densité d'une couche de gaz ;
- La seconde équation décrit l'énergie interne du gaz de la couche i ;
- La troisième la loi des gaz parfaits appliquée à une couche de gaz.

Le volume total correspond à la somme des volumes des deux couches de gaz :

$$V = \sum V_i = V_U + V_L \quad (II.8)$$

La capacité thermique à volume constant est obtenue à partir des relations thermodynamiques de base suivantes (Van Niel, 2007) :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (II.9) \quad \text{et} \quad \Re = C_p - C_v \quad (II.10)$$

Dans l'air ambiant, $C_p = 1 \text{ kJ/kg.K}$ et $\gamma = 1,4$. De ces relations, quatre équations supplémentaires peuvent être définies. Les équations différentielles de la masse dans chaque couche de gaz s'écrivent :

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i \quad (II.11)$$

Avec:

\dot{m}_i : Débits massiques (transferts de masse en kg/s)

En écrivant le bilan énergie de la couche chaude, la première loi de la thermodynamique décrit que la somme du débit d'accumulation d'énergie interne et du travail correspondant à l'expansion de la couche chaude correspond au débit entrant d'enthalpie dans la couche chaude. Cela signifie que l'augmentation volumique et de température de chaque couche proviennent de l'énergie qui y est amenée ou retirée (Van Niel, 2007). Dans le système instationnaire constitué par le compartiment unitaire, cette relation s'écrit:

$$\dot{h}_i = \frac{dE_i}{dt} + P \frac{dV_i}{dt} \quad (II.12)$$

- \dot{h}_i : l'enthalpie de la couche i.
- Le premier terme de l'équation de droite désigne le débit d'énergie interne
- Le second le travail représenté par la variation de volume $P.dV$. En considérant une capacité thermique massique C_p constante, le terme d'enthalpie s'écrit alors :

$$\dot{h} = \sum \dot{h}_i = \sum C_p \cdot \dot{m}_i \cdot T_i + \sum \dot{E}_i \quad (II.13)$$

A partir de cette expression de l'enthalpie, par substitution des deux équations précédentes pour les deux couches de gaz, il est possible d'écrire une équation différentielle pour la pression et pour le volume :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\sum h_i) \quad (II.14)$$

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{P - \gamma} \left((\gamma - 1) h_i - V_i \frac{dP}{dt} \right) \quad (II.15)$$

A partir de cette équation du volume, la relation issue de la première loi de la thermodynamique peut s'écrire :

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left(\dot{h}_i + V \frac{dp}{dt} \right) \quad (II.16)$$

Pour la densité, l'équation différentielle du volume permet d'écrire, à partir de la relation

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_i}{V_i} \right);$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot T_i \cdot V_i} \left((\dot{h}_i - C_p \cdot \dot{m}_i \cdot T_i) - \frac{V_i}{\gamma - 1} \cdot \frac{dP}{dt} \right) \quad (II.17)$$

Les équations différentielles correspondant à la température de chaque couche de gaz s'écrivent alors :

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho_i \cdot V_i} \left((\dot{h}_i - C_p \cdot \dot{m}_i \cdot T_i) - V_i \cdot \frac{dP}{dt} \right) \quad (II.18)$$

C. Les principaux outils existants

La plupart de ces logiciels existants reposant sur des modèles à zone ont été développés pour évaluer la propagation des fumées et le transport de la chaleur. Leur utilisation pour l'ingénierie des structures au feu est limitée à la détermination de la température des gaz chauds (afin de déterminer ensuite la température des éléments de structure). Parmi ces logiciels on peut citer: FIRM, NAT, SmokePro, CFAST/FAST, MAGIC, Ozone V2...

D. Les avantages des modèles à zones

Les codes à zones ont été développés pour prédire les hauteurs des interfaces entre les couches ainsi que leurs caractéristiques. Ils sont en général basés sur des modèles itératifs simples et procurent l'avantage d'obtenir des résultats très rapidement, minimisant ainsi les coûts de calculs.

E. Domaine de validité et limites

Les modèles à zones reposent sur de nombreuses hypothèses et sur des relations semi-empiriques pour décrire les principaux paramètres du comportement d'un incendie. Comme ceux-ci dépendent du scénario incendie, en particulier de la configuration géométrique, un modèle à zones a un domaine d'application restreint. Il faut donc prendre connaissance des limites de validité du modèle, données en principe par le développeur (Desanghere, 2006). Les validations effectuées, soit par les développeurs soit les utilisateurs, donnent aussi une appréciation de la performance du modèle. Si un modèle est utilisé en dehors de son domaine de validation, il est conseillé d'effectuer soi-même un contrôle des résultats en comparant avec des mesures.

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

Il est à noter que l'application d'un modèle à zones requiert une connaissance préalable du comportement de l'incendie pour définir correctement les zones du modèle et donc même un modèle validé pour un cas proche de l'application qui en est faite peut donner de mauvais résultats si le problème a été mal défini par l'utilisateur. Les modèles à zones ont été utilisés avec succès pour étudier les feux dans des compartiments de taille modeste et un important travail a été fourni pour améliorer la fiabilité des relations empiriques utilisées.

Cependant, ce type d'approche présente plusieurs inconvénients majeurs. Les modèles à zones restent en effet des représentations assez approximatives de la réalité. Parce que la structure des écoulements ne sont pas représentés, les effets physiques à petite échelle sont mal pris en compte et la sensibilité des résultats à la géométrie du problème ou aux variations de paramètres extérieurs est plutôt mal reproduite. Les hypothèses employées, telles que la modélisation des zones comme des réacteurs parfaitement mélangés par exemple, sont relativement fortes et plus ou moins vérifiées en pratique. Ces contraintes font que les modèles à zones ne peuvent être utilisés que dans des configurations pour lesquelles leur fiabilité a été validée (Novozhilov, 2001).

Il faut enfin souligner le fait que les modèles à zones sont aujourd'hui arrivés à une certaine maturité et ne pourront pas être beaucoup plus prédictifs que ce que l'on connaît actuellement (Desanghere, 2006).

En effet, le facteur limitant l'amélioration de leurs performances est intrinsèquement lié à la manière dont ils sont conçus. À l'opposé, les modèles CFD présentés maintenant offrent un potentiel de développement beaucoup plus vaste (Desanghere, 2006).

II.2.2.1 Modèles de champs - Simulation Numérique (CFD)

Les modèles de champs, les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics), également appelés modèles numériques tri-dimensionnels sont des Modèles de combustion dans lesquels une modélisation détaillée de la structure spatiale de la combustion est recherchée. Les inconnues sont les champs de vitesse, de température... Dans un modèle de champ, les vitesses, températures... sont des fonctions des coordonnées d'espace x , y , z et sont obtenues par résolution approchée d'équations différentielles. Par opposition le modèle de zone suppose la température constante par grandes zones et prend en compte des équations de bilan zone par zone.

Le domaine de la CFD a connu une expansion significative au cours de ces dernières années, qui a mené à la modélisation de phénomènes de plus en plus complexes, à des couplages vers des disciplines connexes et au développement de codes sophistiqués qui tirent partie de la puissance de calcul actuelle.

Ce code a été en premier lieu développé dans le but de modéliser les conséquences d'incendie de taille industrielle. On peut penser qu'à terme avec l'amélioration croissante de la puissance de calcul il sera possible d'obtenir une résolution permettant une simulation de plus en plus proche de la réalité. Deuxièmement il est destiné à prévoir les conséquences d'un incendie dans de très diverses géométries. Il est à l'heure actuelle au cœur d'un programme entre le NIST (National Institute of Standards and Technology) et les industriels américains pour améliorer la prédiction des moyens de protection (influences entre sprinklers, cantonnements et événements).

A. Principes du modèle

Les modèles de champ sont des modèles qui divisent le domaine étudié en un grand nombre de volumes de contrôle ou « mailles » au niveau desquels les grandeurs sont supposées uniformes. À chaque maille sont attribuées des inconnues représentant les valeurs des grandeurs physiques recherchées. Il s'agit alors de résoudre numériquement, de manière

locale et instationnaire, les équations de Navier Stokes traduisant les lois d'échange et de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie. Pour cela, de nombreuses techniques numériques ont été développées ces cinquante dernières années (Peyret et al., 1982 ; Schiestel et al., 1991 ; Ferziger et al., 1999).

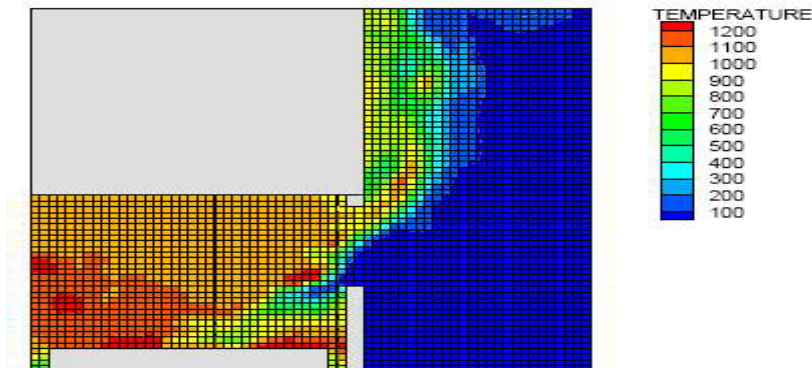


Figure II.4 : Exemple de discrétisation utilisée par un modèle à champ (Desanghere, 2006).

Les mailles sont ici colorées uniformément pour montrer que les grandeurs réellement manipulées par le modèle sont constantes au sein de chacune d'entre elles (Desanghere, 2006).

Comme ces dernières ne peuvent pas être résolues directement car ce sont des équations différentielles non linéaires et couplées, elles sont tout d'abord discrétisées. Pour ce faire, le volume du domaine de calcul est subdivisé en un nombre d'éléments de volume beaucoup plus petit. Le nombre de ces éléments dépend du scénario et des modèles physiques et numériques utilisés mais son ordre de grandeur est de quelques dizaines de milliers pour une pièce de 10 m³. L'utilisation d'un modèle champ requiert un maillage de qualité. Le maillage retenu doit être assez fin pour qu'une résolution inférieure ne montre pas d'effets significatifs. La taille minimale de la maille doit toutefois être supérieure au millionième de la taille du domaine, pour la représentativité des échelles calculées (McGrattan et al., 2003).

Pour construire un modèle CFD il y a plusieurs étapes :

- **Construction de la géométrie et du maillage** : Elle est représentée par un ensemble de surfaces qui correspondent au confinement de l'espace, c'est-à-dire représentent les murs des pièces, les sols, les plafonds, les escaliers, mais aussi les objets ou obstacles dans les pièces comme les meubles, les ouvertures extérieures seront représentées par des surfaces sur lesquelles seront imposées des conditions aux limites qui décriront l'influence de ce qui se passe à l'extérieur du domaine de calcul sur ce qui se passe à l'intérieur de ce dernier (Debray et al., 2007).

D'autres types de maillage peuvent exister, ils correspondent à des mailles ou éléments de formes différentes. D'une part, il y a des maillages structurés composés d'éléments hexagonaux dites maillages rectilignes qui permettent de présenter approximativement les formes curvilignes (Figure II.5.a) et des maillages « body-fitted » qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie (Figure II.5.b). Un autre type de maillage est le maillage non structuré qui comprend des éléments de formes diverses,

qui peuvent être complexes. En conséquence, il n'apparaît pas de lignes directrices dans les maillages non structurés (Figure II.5.c) (Gobeau et al., 2007).

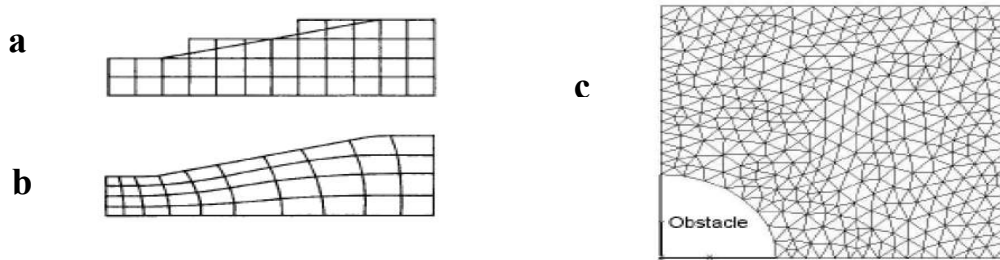


Figure II.5: Maillages 2D - structurés: rectiligne (a) et 'body-fitted' (b)

et non structuré (c) (Debray et al., 2007).

Les maillages non structurés sont d'usage plus flexible: ils peuvent suivre les courbures des surfaces définissant la géométrie et donc être appliqués à tout type de bâtiment; aussi, il est possible de diminuer la taille des mailles à certains endroits, comme par exemple où se trouve l'incendie, sans trop augmenter le nombre des mailles dans le reste du domaine. (Gobeau et al., 2007).

Il est possible aussi d'utiliser différents types de maillage pour un même domaine de calcul et en général ce qui va permettre la possibilité de faire varier la taille des mailles sachant que la flexibilité et la précision avec laquelle l'utilisateur peut contrôler la taille et forme du maillage varie d'un outil à l'autre (Debray et al., 2007).

- **Modèles physiques:** Les modèles CFD se basent généralement sur des équations approchées qui sont proposées pour décrire les phénomènes physiques et l'ensemble de ces équations constitue un modèle, car la résolution des équations exactes de Navier-Stokes est très onéreuse en temps de calcul comme c'est le cas pour la turbulence et la combustion. (Gobeau, 2002).

- **Conditions aux limites :** Elles permettent de déterminer tous les événements qui se produisent aux frontières du volume, ou à l'extérieur de ce dernier et qui influencent ce qui se passe dedans. Dans le cas d'incendie, les conditions aux limites peuvent inclure :

- Les écoulements d'air, gaz et fumées qui entrent ou sortent du domaine par les ouvertures. (Sinai, 2004).

- Les transferts de masse, quantité de mouvement et chaleur au niveau des parois. Pour spécifier les transferts de chaleur aux parois, en général, soit la température des parois, soit le flux de chaleur aux parois est fixé (Debray et al., 2007).

- Les événements qui se déclenchent à l'intérieur du domaine, tels l'incendie lui-même (Debray et al., 2007).

- **Méthodes numériques :** Le principe de la méthode numérique réside en une approximation des dérivées spatiales par des différences centrées du second ordre. Un schéma prédicteur-correcteur explicite du second ordre est appliqué pour l'incrémentation en temps des variables.

Une discrétisation temporelle est aussi nécessaire si le problème est transitoire, ce qui est généralement le cas pour un incendie si l'on s'intéresse à la propagation de l'incendie

et/ou souhaite évaluer le temps disponible pour évacuer les occupants. Il s'agit de fixer un pas de temps qui soit compatible avec le maillage et avec les modèles physiques choisis et permette de résoudre les mécanismes physiques auquel on s'intéresse (Debray et al.,2007).

- **Traitement des résultats :** La simulation faite par le code CFD fournit un grand nombre de données, car le calcul se fait pour un volume de contrôle qui contient des dizaines de milliers de mailles et pour chacune de ces mailles obtenues dans le cas d'un incendie au moins les valeurs de température, les trois composantes de vitesse et la concentration des fumées. D'autres variables peuvent aussi être calculées en fonction des besoins et des modèles choisis : concentrations en CO, NO ou autres produits toxiques, énergie cinétique turbulente et sa dissipation, etc...

Un post-processeur permet de traiter ces données, ce dernier se différencie d'un outil CFD à un autre. Il permet au moins de visualiser les contours des variables et les vecteurs vitesses dans des plans. Il peut aussi éventuellement, selon le post-processeur, permettre d'identifier les enveloppes correspondant à une valeur donnée d'une variable, calculer le volume d'un nuage toxique, évaluer la valeur moyenne de concentration en fumées et de température dans un espace donné ; calculer la visibilité d'un occupant évoluant dans l'espace, extraire les valeurs de température des parois pour transmettre à un code d'analyse de résistance des structures (Debray et al.,2007).

- **Méthode de résolution :** Plusieurs méthodes de résolution existent et sont caractérisées par les différents paramètres :

- Le type de modèle, eulérien / lagrangien / pré-processeurs météorologiques ;
- Le schéma général de résolution, éléments, différences ou volumes finis ;
- Les méthodes de résolution locales : gradient conjugué, Gauss Seidel...

– **Modèles eulériens :**

Les modèles eulériens sont basés sur les équations de la mécanique des fluides et du transport des produits. Le point de vue eulérien en mécanique des milieux continus est celui qui consiste à se placer dans un repère fixe et à observer les déformations du milieu. Les mouvements des deux phases en présence (gaz-liquide, gaz-solide) sont décrits par un système d'équations différentielles qui privilégie peu ou ne privilégie pas l'une des phases par rapport à l'autre. On résout ainsi deux équations de bilan de masse, deux équations de bilan de quantité de mouvement, deux équations de bilan d'énergie. (Les mots de combustion, 2004.).

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{k,j}}{\partial t} = \Gamma_k \quad (II.19)$$

$$\frac{\partial U_{k,j}}{\partial t} + U_{k,j} \frac{\partial U_{k,j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x_i} + \frac{1}{\alpha_k \rho_k} \frac{\partial \alpha_k T_{k,ij}}{\partial x_i} + g_i - \frac{1}{\alpha_k \rho_k} \frac{\langle \rho U_i'' U_j'' \rangle_k}{\partial x_j} + \frac{1}{\alpha_k \rho_k} F_{k,i} \quad (II.20)$$

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial H_k}{\partial t} + \alpha_k \rho_k U_{k,j} \frac{\partial H_k}{\partial x_j} = \text{div} \left(\frac{\lambda}{\alpha_k} \frac{\overline{\alpha_k T_k}}{\alpha_k} \right) - \frac{\partial \langle \rho U_j'' h_j'' \rangle}{\partial x_j} + \Pi_k - H_k \Gamma_k \quad (II.21)$$

Par rapport à la modélisation lagrangienne, le traitement des situations de fort couplage entre phases est facilement traité, les transitoires sont facilement calculés, l'extension aux lits fluidisés est possible, le mode d'emploi pour un utilisateur est plus facile. Par contre, la prise en compte de granulométries étendues est malaisée. Le système d'équations type est le suivant, où :

- L'indice k prend les valeurs 1 ou 2 pour l'une ou l'autre des phases,
- α désigne le taux de présence de chaque phase,
- ρ, U et H sont respectivement la masse volumique moyenne, la vitesse moyenne et l'enthalpie moyenne de chaque phase, e
- PU la pression moyenne de la phase continue.
- Γ, F et Π représentent des termes d'échange de masse, quantité de mouvement, énergie entre phases, qu'il faut modéliser, en général à partir de l'analyse du comportement d'une inclusion isolée. Les termes entre crochets $\langle \dots \rangle$ sont des corrélations entre fluctuations qui tiennent compte notamment des fluctuations turbulentes (Les mots de combustion, 2004).

Pour résoudre les équations en tenant compte de la turbulence, le modèle doit décomposer les composantes de la vitesse en la somme d'une moyenne et de fluctuations, générant ainsi de nouvelles inconnues. Il faut alors de nouvelles équations pour fermer le système. Ces équations correspondent à des hypothèses semi-empiriques plus ou moins complexes, qui représentent plus ou moins bien les phénomènes physiques. Afin de résoudre le système, le modèle doit discrétiser numériquement les équations à résoudre. Ceci se fait par l'intermédiaire d'un maillage qui peut être plus ou moins complexe. De ce point de vue, les modèles eulériens diffèrent également suivant le schéma de résolution numérique qu'ils adoptent :

- **Éléments finis** : Le maillage est défini par des lignes de nœuds qui épousent à une homothétie près, la forme du relief. Le principal inconvénient des différences finies réside dans le manque de souplesse dans le dessin du maillage.
- **Différences finies** : C'est la méthodologie la plus utilisée, essentiellement du fait de la facilité de mise en œuvre.
- **Volumes finis** : Cette méthode plus élaborée, permet d'améliorer la convergence et évite la diffusion numérique.

Les grandeurs physiques sont déterminées aux nœuds du maillage (sommets, centre de gravité, milieux des côtés... des éléments). Les différences de taille et de forme des éléments peuvent conduire à envisager différentes représentations des phénomènes physiques. Il est alors important de garder à l'esprit que la manière dont le maillage a été conçu influe sur les résultats (Les mots de combustion, 2004).

Il convient aussi de fixer correctement les conditions aux limites du maillage : l'entrée et la sortie des produits dans le domaine défini. Des conditions aux limites inadaptées peuvent conduire à des résultats erronés voire aberrants (Les mots de combustion, 2004).

Enfin, les méthodes de résolution locale (résolution des systèmes linéaires, interpolations...) jouent un rôle important puisqu'elles doivent minimiser les erreurs systématiques, être compatibles les unes avec les autres et enfin ne pas avoir un coût de fonctionnement prohibitif (Les mots de combustion, 2004).

- **Modèles lagrangiens**

Les modèles lagrangiens utilisent, pour modéliser le mouvement du fluide, une approche particulière : la dispersion est évaluée par le calcul de plusieurs milliers de trajectoires de particules partant d'une même source. Les concentrations sont alors données par sommation du nombre de particules présentes dans un volume donné. Les particules sont supposées indépendantes et le modèle néglige donc les interactions entre les trajectoires des particules, ce qui ne rend que partiellement compte du champ de turbulence.

Par rapport aux modèles nécessitant un maillage, l'approche lagrangienne évite la diffusion artificielle initiale des sources ponctuelles dans la maille correspondante et les erreurs dues à la diffusion numérique. Elle permet de plus de n'effectuer les calculs que là où cela est nécessaire.

L'équation de base est celle du bilan de quantité de mouvement d'une inclusion, où l'indice 2 se rapporte à la vitesse ou à la masse volumique de l'inclusion, l'indice 1 à la phase continue. \vec{V}_r est la vitesse relative de l'inclusion par rapport au fluide qui occuperait la même position géométrique en l'absence de l'inclusion. Une force correspondant à l'historique des mouvements de la particule, appelée force de Basset, a été négligée ici. V est le volume de l'inclusion (Les mots de combustion, 2004).

$$\rho_2 V \frac{d\vec{U}_2}{dt} = V(\rho_2 - \rho_1) \vec{g} - \frac{1}{2} \rho_1 C_D S_D \vec{V}_r |V_r| - V \nabla P^* - \rho_1 V C_m \frac{d\vec{V}_r}{dt} + \vec{F}_p \quad (II.22)$$

Avec :

- g est la gravité ;
- C_D est la traînée ;
- P^* est la pression ;
- $M \gamma$ est la masse ajoutée ;
- \vec{F}_p est la portance.

- **Couplage Eulérien-Lagrangien**

Certains modèles choisissent de coupler ces deux approches : un modèle lagrangien est utilisé pour les environs proches de la source, puis un modèle eulérien prend le relais lorsque l'on s'éloigne de celle-ci. Plus souvent encore, le calcul de la météo est confié à un modèle eulérien, le calcul de la dispersion étant alors effectué par un modèle lagrangien (Mouilleau et al., 2002).

- **Pré-processeurs météorologiques**

L'utilisation de classes de stabilité est réservée aux modèles les plus simples ne permettant pas une prise en compte fine de l'orographie, comme les modèles gaussiens ou intégraux. Des modèles plus élaborés peuvent déduire la distribution du champ des vents par un calcul ou en faisant appel à un pré processeur météo. Signalons que le calcul se fait en amont du calcul de la dispersion. Il est en général particulièrement complexe de résoudre à la fois les équations de la météo et celles de la dispersion. Ainsi, toute modélisation mettant en œuvre des logiciels tridimensionnels élaborés se décompose en deux étapes : une première étape qui calcule la météo du site et une deuxième qui traite la dispersion.

Il existe deux grands types de modèles météorologiques qui interviennent en tant que pré processeur dans les logiciels tridimensionnels : les modèles diagnostics et les modèles pronostics (Mouilleau et al., 2002).

- **Modèles diagnostics**

Les modèles diagnostics utilisent simplement des données météorologiques afin de créer un champ de vent 3D par interpolation sous des contraintes de continuité mais, sans passer par la résolution des équations d'écoulement. Bien entendu, cette méthode demande un nombre de données conséquent pour permettre une bonne corrélation avec la réalité.

Malheureusement, les données météorologiques sur le site à étudier ne sont pas toujours disponibles et les modèles diagnostics sont alors beaucoup moins performants (Mouilleau et al., 2002).

- **Modèles pronostics**

Les modèles pronostics résolvent directement les équations de la mécanique des fluides. Certains modèles, les modèles dits hydrostatiques, font l'hypothèse d'une pression hydrostatique dans la direction verticale pour résoudre les équations. Ainsi, le calcul se fait totalement dans le plan horizontal et une équation empirique permet de simplifier la détermination de la composante verticale. Il faut toutefois préciser que cette hypothèse semble difficile à utiliser dans le cas d'un relief important, il faudra alors préférer les modèles météorologiques non hydrostatiques qui résolvent le système dans les trois dimensions (Mouilleau et al., 2002).

Les modèles de champ utilisent les équations de la thermique et de la mécanique des fluides. Les écoulements sont en général turbulents. Ces modèles s'attachent donc à résoudre directement le système d'équations physiques qui gouverne la dispersion sans le dégénérer comme dans la démarche des modèles de type intégral.

Le système d'équations du modèle physique est composé de :

- La conservation de la quantité de mouvement ;
- La conservation de l'énergie ;
- La conservation de la masse d'air ;
- La conservation de la quantité de produit ;
- L'équation d'état du mélange gazeux ;
- L'équation donnant la masse molaire du mélange.

A ces équations peuvent bien sûr être ajoutées d'autres équations afin de tenir compte de l'humidité, ou encore d'éventuelles réactions chimiques... (Mouilleau et al., 2002).

B. Equations de base

• Modèle de combustion

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

Dans tous les cas, le modèle de combustion est un point critique à considérer, car il introduit le terme source de chaleur ainsi que la production de nouvelles espèces chimiques. La modélisation du processus de combustion est une étape délicate. Trois grandes familles de modèles de combustion ont été développées à ce jour :

- **Le modèle global (mixture fractions)** : La cinétique des réactions chimiques de la flamme n'est pas prise en compte, les réactions étant présumées instantanées et totales. Pour décrire la répartition des espèces chimiques, on associe alors des coefficients stœchiométriques arbitraires et une enthalpie de combustion unique par matériau. Ces modèles simplifiés utilisent habituellement des lois de type «Arrhenius» et ne peuvent donc décrire des phénomènes violents ou explosifs (réactions radicalaires) (Guillaume, 2006) ;

- **Le modèle « Flammelettes »** : Ce modèle décrit la combustion de produits parfaitement connus. Deux calculs préliminaires sont alors nécessaires :

. Une première étape consiste à évaluer la composition d'une flammelette laminaire à partir des données d'enthalpie (composition en fonction de la température et du flux thermique du milieu), de fractions molaires de combustible et de comburant et du taux de contrainte, qui décrit les effets de la flamme sur elle-même. Les modèles de Bray-Moss-Libby-Champion ou de la flamme cohérente sont fréquemment utilisés (Guillaume, 2006);

. La seconde étape consiste alors à appliquer des fluctuations turbulentes à cette flamme à l'aide de lois probabilistes (en général fonctions Bêta) représentant les variations de la flamme par l'intermédiaire de variations des fractions molaires de comburant et de combustible. A ce stade, l'une des approches est la démarche PPDF (Presumed Probability Density Function), par exemple selon la technique de Dopazo et O'Brien (Guillaume, 2006);

- **Les modèles EDM (Eddy Dissipation Model) ou EBU (Eddy Break-Up)** : Dans ce cas, la composition chimique de la flamme n'est pas connue. Ce modèle est basé sur la présence de monoxyde de carbone comme intermédiaire (type à deux étapes) ou de monoxyde de carbone et d'hydrogène (type à quatre étapes). Les réactions concurrentes entre H_2 , CO , CO_2 et H_2O , ainsi que la variation des différentes constantes d'équilibre correspondantes en fonction de la température sont alors considérées (Guillaume, 2006).

- **Modèle de rayonnement**

Le modèle de rayonnement doit traduire les échanges de chaleur entre mailles concomitantes ou en regard. La flamme est un corps gris défini par sa luminance, son émissivité et sa température moyenne. L'éclairement énergétique qu'elle induit sur toutes les surfaces de l'environnement est alors calculable, et ainsi la température de surface des matériaux (en prenant en compte la chaleur qu'ils évacuent à leur tour). Cette température conditionne leur inflammation, et par là-même le développement de l'incendie (Guillaume, 2006).

Les phénomènes de transfert radiatif sont généralement décrits en termes de luminance énergétique dont la décomposition spectrale s'écrit :

$$L(x, s) = \int_0^{\infty} L_{\lambda}(x, s) d\lambda \quad (II.23)$$

Où :

- $L_{\lambda}(x, s)$ est la luminance monochromatique à la longueur d'onde λ .
- x et s sont respectivement les vectrices positions et direction de propagation

Les échanges d'énergie par rayonnement thermique dépendent des caractéristiques des différents milieux. Chaque cellule fluide ou solide délimitée par le maillage échange avec toutes les autres cellules du domaine de calcul.

En particulier, les échanges radiatifs pris en compte doivent concerner :

- Les flux radiatifs entre les zones chargées en suie ;
- Les flux radiatifs entre les zones chargées en suie et les éléments solides (parois) ;
- Les flux émis et absorbés entre les éléments solides (parois).

L'équation de base utilisée pour les transferts thermiques radiatifs dans les fluides est l'équation RTE :

$$s \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma(x, \lambda)] I_{\lambda}(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_{\lambda}(x, s') d\Omega' \quad (II.24)$$

Avec:

- s Représente le vecteur directeur de l'intensité ;
- $I_{\lambda}(x, s)$ Désigne l'intensité du rayonnement à la longueur d'onde λ ;
- $\kappa(x, \lambda)$ Désigne le coefficient d'absorption local à la longueur d'onde λ ;
- $\sigma(x, \lambda)$ Désigne le coefficient de diffusion local à la longueur d'onde λ ;
- $B(x, \lambda)$ Désigne terme-source d'émission à la longueur d'onde λ .

$\frac{\sigma(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_{\lambda}(x, s') d\Omega'$ décrit la diffusion provenant des autres directions de l'espace.

La modélisation du rayonnement émis ou reçu peut être réalisée plus simplement par la loi de Stefan- Boltzmann. Dans le cas de la modélisation, une telle formulation simplifiée

en T^4 est délicate, particulièrement au sein de la flamme, car une faible erreur sur la température a des effets très importants. Il est préférable de définir le flux radiatif comme une fraction du débit calorifique ramené au volume de chaque maille interne à la flamme (Guillaume, 2006).

Deux modèles sont alors à distinguer : une formulation locale, apte à traiter le rayonnement au niveau de la flamme et une formulation apte à traiter le rayonnement au niveau des fumées. Les absorptions et émissions de rayonnement par les surfaces solides ne doivent en outre pas être négligées. Pour les parois, une émissivité moyenne hémisphérique équivalente peut être considérée (Guillaume, 2006).

Pour les cellules fluides, un coefficient d'absorption dépendant de la fraction massique de suie peut être introduit. L'émissivité des suies peut alors être assimilée à celle du coke en suspension dans un gaz (données de la littérature). En fait, un modèle plus détaillé peut prendre en compte les effets des différentes espèces présentes sur le rayonnement. En particulier, l'eau et le dioxyde de carbone peuvent avoir une importance considérable dans le bilan radiatif (Guillaume, 2006).

Plusieurs méthodes de résolution de l'équation de rayonnement existent :

- La méthode de Monte-Carlo, qui fait appel à des rayons tirés entre cellules de manière aléatoire ;
- La méthode des volumes finis (FVM), qui dissipe l'énergie émise par un point dans une direction selon un angle solide prédéfini ;
- Les méthodes de flux, qui répartissent sommairement le flux dans les directions du maillage.

- **Modèle de turbulence**

Le modèle de turbulence traduit la principale évacuation de matière. Il permet de caractériser à grande échelle les mouvements tourbillonnants et à plus petite échelle la dissipation d'énergie cinétique. Plusieurs types de modèles existent. Les modèles de type $\kappa-\varepsilon$ sont adaptés à des écoulements canoniques (écoulement cisailé, aérodynamique) et ont été développés depuis de nombreuses années. Les modèles LES (*Large Eddy Simulation*), d'origine universitaire et en fort développement, semblent mieux traduire les écoulements turbulents dans les cas considérés (Guillaume, 2006).

Pour modéliser correctement une combustion, le modèle de turbulence doit intégrer un terme source dans l'équation de l'énergie turbulente lié à la flottabilité (ou poussée d'Archimède). Une sous-évaluation des mouvements turbulents peut entraîner une stratification des champs thermiques qui modifie la description du tirage thermique (Guillaume, 2006).

Les équations de Navier-Stokes traduisent trois phénomènes physiques fondamentaux :

- La conservation de la masse et des espèces ;
- La conservation de la quantité de mouvement ;
- La conservation de l'énergie totale ;

Dans le cas d'un écoulement tridimensionnel, la forme conservative de ces équations s'exprime par:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \gamma}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{\partial \delta}{\partial z} = S \quad (II.25)$$

Avec:

$$\xi = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho T \end{pmatrix}, \chi = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho uT \end{pmatrix}, P, \Psi = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho vT \end{pmatrix}, \delta = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho w^2 + p \\ \rho vw \\ \rho wT \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_x \\ \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_y \\ \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_z \\ \frac{\lambda}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T \end{pmatrix} \quad (II.26)$$

- ρ : désigne la masse volumique ;
- u, v et w : sont les composantes de vitesse selon les axes x, y et z ;
- P : représente la pression totale ;
- T : représente la température ;
- λ et μ : sont les coefficients de viscosité de Lamé ;
- C_p : est la capacité calorifique à pression constante ;
- S_x, S_y, S_z et ST : sont des termes liés à des sources comme la convection naturelle.

Les équations de Navier-Stokes peuvent être :

- **Moyennées (RANS : Reynolds-Averaged Navier-Stokes)** : La diffusivité interne à la maille n'est pas calculée. Dans les équations de Navier-Stokes, on fait ainsi apparaître le tenseur de Reynolds :
 - Modèles κ - ε 1, adaptés aux écoulements à turbulence bien développée, supposant un profil de vitesse au-niveau des interfaces. En général, les modèles κ - ε font appel à de nombreuses constantes numériques ;
 - Modèles κ - ε Bas-Reynolds, adaptés pour traiter les détails de l'écoulement aux interfaces fluide/solide ;
 - Modèles RNG, variantes des modèles κ - ε pour les forts gradients de vitesses ;
 - Modèles κ - ω 2, basés sur une fréquence de turbulence. Ces modèles sont adaptés aux parois, en particulier pour traiter les échauffements par convection, mais inadaptés au sein du fluide ;
 - Modèles SST (*Shear Stress Transport*) et RSM (*Reynolds Stress models*), ajoutant encore des niveaux de finesse aux modèles κ - ε .

• **Filtrées** : c'est la technique des simulations grandes échelle (SGE ou LES). Dans ce cas, les échelles de turbulence sont toutes résolues, hormis celles relatives à la dissipation

d'énergie cinétique qui sont modélisées. Cette technique requiert des puissances de calcul relativement importantes. Dans ce cas, diffusion turbulente et viscosité sont reliées à la composition et la température des mailles par une grandeur numérique. Deux grandes familles de modèles de LES sont développés actuellement (Guillaume, 2006) :

- Les modèles LES à constante de Smagorinsky. Dans ce cas, la grandeur permettant de relier la viscosité du milieu d'une maille à la densité de celle-ci, et par là-même à sa composition et sa température prend la forme d'une constante, dont la valeur est comprise entre 0,10 et 0,23. Une telle formulation permet de définir la diffusivité interne à la maille, et donc les turbulences de faible amplitude, à cette viscosité et donc à la température et la composition de la maille. (Shear, 2006; Mc Grattan, 2001).
- Les modèles plus récents peuvent utiliser une variable numérique et non une constante pour la grandeur définie par Smagorinsky. Dans ce cas, la variable permet d'ajuster le taux de diffusion des espèces et la viscosité en fonction de la divergence de l'écoulement (Yoshizawa, 1991).

• **Résolues sans autres hypothèses** : c'est la Simulation Directe ou DNS. Dans ce cas, la viscosité et la diffusion turbulente ne sont pas dépendantes. Les dimensions spatiales et temporelles étant très petites, la viscosité d'une maille est fonction de la somme des viscosités partielles des espèces présentes dans cette maille. La diffusion turbulente est calculée d'une espèce dans l'autre en fonction d'intégrales de collision, c'est à dire de fonctions arbitraires de la température et de la forme des molécules constituant le mélange. Pour simplifier, en général, l'estimation est faite dans la combustion que toutes les espèces diffusent dans le diazote. Outre la qualité du maillage, en DNS, le calcul impose une équation de transport par espèce chimique considérée. Cette méthode est donc la plus gourmande en calcul. De ce fait, à l'heure actuelle, elle n'est applicable qu'à de très petites structures (Guillaume, 2006).

D'autres techniques de traitement de la turbulence se développent actuellement, combinant les avantages de la LES et des modèles RANS. C'est par exemple le cas des modèles DES (*Detached Eddy Simulation*), qui traitent les couches limites comme un modèle RANS et les tourbillons en LES quand le maillage est suffisamment fin et décollé des surfaces solides (Guénot et al., 2003).

Les équations de Navier-Stokes peuvent être :

- Discrétisée à partir de leur forme conservative (conservations des grandeurs aérodynamiques à travers des discontinuités de type choc ou surface de glissement) ;
- Intégrées à partir de leur forme conservative par une technique de volumes finis et ensuite discrétisées ;
- Résolues dans l'espace de Fourier ;
- Résolues par la méthode des éléments finis.

Néanmoins, aucun des modèles de turbulence ne permet de calculer dans toutes les situations et à toutes les échelles les effets des tourbillons dans le cas de la combustion. La modélisation de la turbulence est encore très élémentaire. Par exemple, dans le cas de la combustion, si un modèle κ - ε est choisi, il est souhaitable d'utiliser un modèle de turbulence

de type κ - ε bas Reynolds afin de bien modéliser l'écoulement près des parois. Il faudra en outre avoir conscience que, dans les mailles gazeuses, la diffusion turbulente interne aux mailles n'est pas calculée (Guillaume, 2006).

C. Exemple d'outils numériques existants

Il existe des codes CFD dits généraux qui incluent un choix de modèles suffisant pour permettre l'application de ce code à une grande variété de problèmes : aérodynamisme des voitures et avions ; combustion des engins ; dispersion atmosphérique des polluants, incendies en milieux confinés et ouverts. Des outils CFD ont aussi été développés plus spécifiquement pour l'application aux incendies, parmi ces logiciels on cite : FLUENT, CFX, FDS, ALOFT-FT, JASMINE, SOLVENT, PHOENICS...

La plupart des ces logiciels s'intéressent au transport de la fumée et de la chaleur dans l'incendie. Leur utilisation pour l'ingénierie des structures s'arrête dans le meilleur des cas au calcul de la température dans les éléments structuraux. Les descriptions en gras réfèrent à des codes CFD généralistes qui sont utilisés dans de nombreux domaines autres que l'incendie.

Le logiciel utilisé lors des études prend en compte :

- Les propriétés de l'air et des fumées : viscosité, dilatation thermique, capacité calorifique, compressibilité...
- La turbulence de l'écoulement ;
- Les propriétés thermiques des constituants solides ;
- Les caractéristiques géométriques tridimensionnelles de l'environnement et du système de distribution d'air ;
- Les conditions climatiques extérieures (froid, chaud, rayonnement solaire).

D. Domaine de validité

Du point de vue théorique, la validation des modèles tridimensionnels est plus facile à faire que celle des modèles de type intégral car les résultats se présentent sous la forme de variations spatio-temporelles des grandeurs physiques.

La modélisation tridimensionnelle apporte des informations qualitatives en plus des résultats quantitatifs : elle permet d'observer très facilement l'évolution du nuage que se soit en perspective ou dans des coupes.

Enfin, d'autres grandeurs telles que la température, la vitesse ou la pression peuvent servir aux validations (Mouilleau, 2002).

E. Avantages et inconvénients

Les modèles CFD donnent accès à une grande quantité d'informations comparativement aux autres approches qui viennent d'être décrites. Les écoulements sont représentés jusqu'à des échelles de l'ordre de la taille des mailles utilisées. De nombreuses grandeurs peuvent être extraites des simulations, ce qui fournit une aide précieuse pour la compréhension de phénomènes physiques complexes en interaction les uns avec les autres. Ce type de modélisation n'a virtuellement pas de limite puisqu'il est toujours théoriquement possible de raffiner encore la discrétisation et de prendre en compte de manière détaillée des phénomènes de plus en plus fins.

Cependant, la représentativité d'un modèle à champ, aussi précis soit-il, se heurte aux incertitudes sur les conditions aux limites réelles : plus la modélisation est fine et plus les conditions aux limites doivent être connues avec précision et ici il faut signaler que les résultats ne dépendent toutefois pas seulement de l'outil utilisé mais aussi des choix qui sont faits par l'utilisateur. Pour le moment, les moyens informatiques n'autorisent qu'une prise en compte relativement sommaire des conditions aux limites, principalement parce que la finesse du maillage est limitée par la puissance de calcul. Mais ce point n'est pas trop pénalisant, car les conditions aux limites ne sont généralement pas connues avec une très grande précision pour la simulation d'une situation réelle d'incendie.

L'utilisation des modèles CFD pour la simulation numérique des incendies est particulièrement délicate, car les couplages entre les phénomènes physiques sont importants. La représentativité des résultats doit donc être considérée avec précaution, ce qui nécessite une solide expérience de l'utilisateur.

Les modèles CFD permettent ainsi de palier à de nombreuses limitations identifiées pour d'autres types de modèles tels les modèles gaussiens, intégraux ou les modèles de zones:

- Le modèle prend en compte la réalité du terrain, les obstacles, même près de la source ;
- Il est permis une grande liberté de choix quant aux types de sorties que l'on peut obtenir : champ de concentrations en temps réel pour quelques points particuliers, champ de concentration dans tout l'espace.

Toutefois, Cette approche utilise moins d'empirisme que les modèles à zones précédemment présentés car les phénomènes sont modélisés à une échelle beaucoup plus petite. La discrétisation des équations, liée au choix des maillages utilisés, induit inévitablement des imprécisions par rapport aux solutions exactes des équations régissant les écoulements. Par ailleurs, la résolution des systèmes algébriques obtenus demande beaucoup de puissance informatique et de place mémoire sur les calculateurs, ainsi que des temps de calcul longs (plusieurs heures voire plusieurs jours) (Desanghere, 2006).

II.3 Conclusion

La modélisation numérique ne peut prétendre à remplacer totalement l'expérimentation car elle présente encore de nombreuses lacunes qui peuvent nuire à la fiabilité des résultats obtenus. Chaque modèle mis en œuvre n'est qu'une traduction subjective et bien souvent incomplète de la réalité. Par ailleurs, la résolution numérique des systèmes d'équations résultant de la modélisation est elle-même source d'imprécisions, car elle fait appel à des approximations plus ou moins importantes. Il paraît donc impératif de confronter le plus souvent possible les résultats des simulations avec des mesures expérimentales comparables. L'outil numérique ne peut être employé dans un but prédictif uniquement dans des contextes où la pertinence de ses résultats a déjà été contrôlée. Utilisée dans de telles conditions, la modélisation numérique constitue un outil désormais incontournable pour l'étude des incendies.

Description des l'outils

Chapitre 3 numérique : FLUENT, ALOHA

<i>III.1 Introduction.....</i>	<i>59</i>
<i>III.2 Simulation numérique d'incendie</i>	<i>60</i>
<i>III.3 Présentation générale du code FLUENT.....</i>	<i>64</i>
<i>III.4 Présentation générale du code ALOHA.....</i>	<i>77</i>
<i>III.5 Conclusion</i>	<i>83</i>

Chapitre III

Description des l'outil numérique : *FLUENT, ALOHA*

Le calcul de haute performance est devenu un outil incontournable si l'on souhaite étudier un phénomène physique, chimique, biologique ou même prévoir avec précision certaines propriétés mécaniques, optiques, électroniques des matériaux ou molécules. Dans le domaine l'incendie, il existe un grand nombre de logiciels dédiés à l'étude des différents phénomènes du feu en commençant par son ignition (flamme) jusqu'à l'évacuation et la prédiction des pertes probables.

Dans ce chapitre, on commence en premier lieu par une présentation de la simulation numérique dans le domaine de l'incendie puis on passe à la description des outils numériques choisis parmi les nombreux outils de simulation numérique existants, sélectionnés selon leurs catégories, pour faire leurs applications dans la suite de ce mémoire.

III.1 Introduction

Aujourd'hui, la simulation numérique est utilisée dans de nombreux domaines de recherche et développement : mécanique des fluides, science des matériaux, astrophysique, physique, nucléaire, aéronautique, climatologie, météorologie, physique théorique, biologie, chimie et environnement. L'utilisation d'outils numériques avancés pour la simulation des

incendies est relativement récente du fait de la grande complexité de ce type de problème. Plusieurs raisons expliquent les difficultés rencontrées. Pour commencer, il existe un très grand nombre de scénarios d'incendie possibles, étant donné la nature accidentelle du phénomène. Ensuite, notre compréhension des phénomènes physico-chimiques mises en jeu est encore incomplète et la puissance informatique disponible pour la simulation est limitée. Pourtant, une étude exhaustive des incendies doit passer par la prise en compte de nombreux phénomènes physiques complexes plus ou moins imbriqués tels que l'aérodynamique autour des obstacles (cas des incendies de compartiments), l'étude des écoulements multiphasiques, du mélange et de la combustion turbulente, des transferts radiatifs et convectifs, des transferts de chaleur dans les solides, etc.

Dans ce mémoire on a présenté un ensemble de modèles adaptés à la modélisation numérique d'incendie et il s'est posé alors le problème de choisir quel modèle utiliser pour modéliser et classer au mieux un jeu de données spécifique. Le but était donc de trouver un modèle parmi l'ensemble des modèles disponibles dont on puisse estimer correctement les paramètres avec les observations disponibles et qui soit suffisamment flexible pour modéliser correctement les données.

Les outils numériques sur lesquels s'appuie ce travail sont : le logiciel FLUENT Version 6.3 : code CFD (Computational Fluid Dynamics) qui utilise la méthode des volumes finis et le logiciel ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) : code intégrale qui modélise la dispersion des polluants.

III.2 Simulation numérique d'incendie

La simulation numérique est une approche qui permet au chercheur et à l'ingénieur d'analyser des phénomènes qui par leur complexité échappent au calcul « traditionnel ». Sans prétendre à une description exhaustive, on peut dire que les simulations numériques peuvent permettre de comprendre (recherche fondamentale ou appliquée), prédire (météorologie, climatologie, épidémiologie, ...) ou concevoir (automobile, aéronautique, génie civil,..) (Guide informatique, 2006).

III.2.1 Définition de la simulation numérique d'incendie

La simulation numérique (ou expérience numérique) permet de reproduire sur un ordinateur un phénomène physique complexe dont on souhaite étudier l'évolution.. Elle repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques (intégration des équations du mouvement, d'équations différentielles, ...etc.) qui sont adaptés aux moyens numériques. Ces simulations informatiques sont devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale pour lesquels les expériences sont difficiles, coûteuses voire impossibles.

III.2.2 Principes de la simulation numérique d'incendie

Depuis une dizaine d'années, les performances des ordinateurs et l'évolution des logiciels permettent de simuler les systèmes physiques, chimiques et mécaniques au plus près du réel. La finesse des modèles permettent d'accroître la précision des résultats, avec des

temps de calculs de plus en plus réduits. D'autre part, l'étude des problèmes couplés (thermo – mécanique, fluide - structure, mécanique,...) est devenue abordable grâce à des logiciels plus performants, plus conviviaux, mieux couplés et à des ordinateurs plus rapides (fréquence et mémoire élevées).

- **Première étape : modéliser et discrétiser le volume contrôlé :** Quand on cherchera à modéliser le système qu'on veut analyser, on commencera par définir le type d'analyse (statique, dynamique, thermique, couplée, ...) qu'on va utiliser. Ensuite, on discrétisera le volume, chaque volume, dans le cas d'un assemblage en éléments simples. Cette première étape est le plus souvent réalisée automatiquement mais peut être adaptée. De sa qualité dépend la précision (fin signifie précis), le temps de calcul et la place mémoire (qui grossissent avec la finesse globale du modèle). A ce niveau on cherchera un bon compromis qualité / coût / délai.

- **Seconde étape : appliquer les forces extérieures :** Consiste à définir le chargement c'est à dire les appuis et les forces (les pressions, les températures, ...). C'est ici que le savoir faire est le plus important car le passage de la réalité au modèle numérique se fait par des estimations (hypothèses du spécialiste). De cette étape dépend la pertinence des résultats.

- **Troisième étape : résoudre son problème :** La troisième étape est la résolution. Il ne s'agit, ici, que de définir les bonnes options du logiciel et lancer la résolution qui s'effectue automatiquement. C'est un problème complexe de mathématiques appliquées, principalement du calcul matriciel.

- **Quatrième étape : visualiser et exploiter les résultats :** C'est la dernière étape est le post-processeur. On y observe les résultats sous une grande variété de formes. La structure déformée est celle que tout le monde peut appréhender, mais on a besoin d'observer bien d'autres variables (contraintes, déformations, réactions des appuis, températures,...). Notre premier souci est de chercher les résultats qui nous indiqueront la pertinence des notre choix et, éventuellement, quoi modifier dans notre modèle pour relancer une nouvelle (meilleure) étude. Ensuite, on transmettra nos résultats sous une forme explicite (justification du modèle et résultats directement exploitables) à nos partenaires car les modèles sont à remettre en question à l'issue de chaque calcul. Elle est affaire de spécialiste.

III.2.3 Les évolutions en matière de simulation numérique

L'évolution rapide de la puissance des PC permet d'accéder aujourd'hui à tout industriel aux techniques de calculs par de s différentes méthodes, ce qui n'était possible auparavant que sur de très grosses machines, donc réservé aux grands groupes industriels. Aujourd'hui, ces outils se « démocratisent » donc de plus en plus avec des degrés de précision tout à fait satisfaisants dans la plupart des cas.

Afin d'améliorer encore plus les performances des outils de simulation, beaucoup de possibilités de développement demeurent. Elles concernent principalement les points suivants:

- Au niveau des bases de données matériaux : intégration de nouvelles lois de comportement ;

- Accroissement de l'espace mémoire nécessaire au calcul et diminution des durées de calcul. La parade retenue jusqu'alors consistait à utiliser des lois de comportement simplifiées, elle n'est plus accessible. On demande toujours plus de précision dans les résultats et les comportements sont de plus en plus complexes à formaliser. En particulier, à ce jour la modélisation des micro-défauts et porosités présents dans les matériaux (non-homogénéité) n'est pas encore prise en compte dans les logiciels commerciaux et les paramètres liés à l'endommagement sont inexistantes. A ce niveau, des outils spécifiques sont développés dans les laboratoires de recherche, notamment à l'Université de Savoie. Les pistes recherchées reposent sur le développement des architectures parallèles comme le clustering sur Linux et l'arrivée des premiers codes développés en langage objet ;

- Faciliter la préparation et l'exploitation des résultats issus des logiciels de simulation numérique qui représente actuellement 80% du temps de l'expert ! (20% en préparation des données, 20% en chargement, 40% en récupération).

III.2.4 Intérêts et apports de la simulation numérique

La physique beaucoup de problèmes ne sont pas étudiés parce qu'il n'existe pas de solution analytique ou parce que celle-ci est trop complexe pour être présentée en une durée raisonnable. Pour d'autres problèmes, la simulation numérique permet une meilleure visualisation des phénomènes que les méthodes traditionnelles (Guide informatique, 2006).

- Elle peut être liée au nombre d'objets à prendre en compte. Ainsi, en utilisant les lois de la physique, de la chimie, de la thermodynamique... etc., seule la simulation numérique peut permettre de l'étudier ;

- On a aussi recours à la simulation numérique lorsqu'un très grand nombre de paramètres doit être incorporé dans un calcul. La propagation et le transfert de chaleur d'un incendie est gouvernée par la dynamique des fluides et il est possible de calculer la température ainsi que la vitesse de propagation dans des situations simples, idéalisées.

La complexité d'un problème peut aussi provenir du nombre de phénomènes qui interviennent. Ainsi l'évolution d'incendie intégrer la modélisation de phénomènes thermiques, chimiques et géographiques... De plus, souvent, les sources de « complexité » que nous avons évoquées peuvent se cumuler (Guide informatique, 2006).

Sans prétendre à une description exhaustive, on peut dire que les simulations numériques peuvent permettre de :

- Comprendre ;
- Prédire;
- Concevoir.

Dans le domaine d'incendies, les outils traditionnels que sont devenus l'expérimentation, les tests, les maquetages, etc. sont devenus très coûteux en temps ou en argent, parfois insuffisamment représentatifs (une maquette ne permettra pas à un ingénieur de choisir les matériaux les mieux adaptés en cas d'une situation d'incendie) ou tout simplement impossible pour diverses raisons. (Guide informatique, 2006).

Au-delà des ordinateurs, les outils de la simulation numériques sont :

- Des modèles mathématiques (ensemble d'équations) qui décrivent les phénomènes étudiés (physiques ou autres) ;
- Des méthodes ou algorithmes qui permettent à la machine de résoudre ces équations ;
- Des données sur les composants utilisés (par exemple pour chaque pièce d'une automobile sa densité, son coefficient de dilatation, son élasticité, etc ...).

III.2.5 Outil de simulation numérique

A ces ingrédients, il faut ajouter les moyens d'acquérir ces données, de valider les modèles mathématiques utilisés et lorsque c'est possible de vérifier les résultats des simulations.

En amont d'une simulation numérique, les physiciens établissent les équations décrivant les phénomènes à analyser. Ces équations ne pouvant être résolues « à la main », des numériciens les transcrivent sous forme adaptée au calcul par ordinateur. Le plus souvent, cela consiste à découper le domaine de calcul en un grand nombre de petites zones qu'on appelle des mailles. Les équations mises en forme doivent permettre de calculer comment chaque maille va évoluer sous l'influence de ses voisines durant un court intervalle de temps (ou pas en temps). Le problème est alors dit « discrétisé ». La précision du calcul augmente en général avec le nombre de mailles et donc avec la puissance de la machine (Guide informatique, 2006).

Une simulation menée à son terme génère ainsi une très grande quantité de données (par exemple la densité, la température, ...etc. à chaque intervalle de temps et dans chaque maille), qu'il ne serait pas possible d'exploiter sous la forme de simples colonnes de chiffres. Il faut donc également disposer d'outils spécifiques permettant de mettre en forme et de visualiser les résultats pour pouvoir les interpréter.

La qualité d'une simulation numérique est bien sûr liée à la qualité des « ingrédients » évoqués plus haut. Sa fiabilité dépend de la qualité des moyens de validation, globale ou par parties. Du fait de la complexité des problèmes traités, il est assez difficile d'évaluer le degré de précision d'une simulation. C'est un domaine qui fait l'objet de recherches tout comme l'amélioration des modèles et des algorithmes.

La composante humaine a aussi une importance. Un risque pourrait être que les utilisateurs, chercheurs ou ingénieurs, considèrent que les résultats de leurs simulations « sont » la réalité. Leur « savoir faire » est donc aussi un aspect essentiel (Guide informatique, 2006).

Le domaine d'incendie requiert de bons outils, et un utilisateur possédant une bonne compétence scientifique dans de nombreux domaines. La facilité croissante d'utilisation et les interfaces graphiques des outils de modélisation ne doivent pas faire oublier les besoins considérables de formation des utilisateurs. La personne qui mène une simulation doit posséder avant tout une excellente connaissance de la physique et de la chimie du système étudié. De plus, elle doit maîtriser certains aspects numériques, car des choix doivent être faits quant aux méthodes de résolution des équations ou aux constantes numériques. Enfin, elle doit connaître parfaitement les limites de ses outils, et éventuellement l'effet « falaise » si les

simulations sont réalisées à proximité de ces limites. En effet, dépasser la limite d'un outil peut avoir peu de conséquences ou des effets énormes selon la variable considérée. (Guillaume, 2006).

Les premiers documents relatifs à la validation des outils et spécialement les CFD sont principalement la norme ASTM E 1355 : *Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models*. Cette norme est un guide générique fournissant une méthodologie pour évaluer les possibilités prédictives d'un modèle du feu pour un usage spécifique. L'intention est de couvrir la gamme entière des modèles numériques déterministes pouvant être employés pour évaluer les effets des feux dans et sur des structures. La méthodologie est présentée en quatre secteurs d'évaluation :

- Définition du modèle et des scénarios pour lesquels l'évaluation doit être conduite ;
- Vérification de la convenance de la base théorique scientifique et des approximations inhérentes au modèle étudié ;
- Vérification de la robustesse mathématique et numérique du modèle ;
- Mesure de l'incertitude et de l'exactitude des résultats du modèle dans la prévision du cours des événements dans des scénarios semblables du feu.

Cette norme ne prétend pas répondre à toutes les situations liées à son utilisation. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'établir les pratiques appropriées et de déterminer l'applicabilité et les limitations de cette norme avant son utilisation. Elle n'est pas adaptée pour fournir des mesures quantitatives.

La norme ISO 16730 - Fire safety engineering - Assessment, verification and validation of calculation methods, a été développée au sein de l'ISO TC92 SC4 « Fire Safety Engineering ». Cette norme est en cours de parution, et détaille les différents aspects relatifs à la caractérisation d'un modèle. Elle permet en outre une appréciation quantitative des écarts entre modèles ou entre des modèles et des données expérimentales.

III.3 Présentation générale du code « FLUENT »

« FLUENT » est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans transfert thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles structurées et non structurées, quelque soit la complexité de la géométrie, avec une facilité relative. Les mailles supportées en 2D sont de types triangulaires ou quadrilatérales, elles sont tétraédriques, hexaédriques ou pyramidales en 3D, ou des mailles (hybrides) mélangées. Le code « FLUENT » est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un seul PC de travail ou sur des machines en parallèles, pour une exécution plus efficace (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

« FLUENT » facilite à l'utilisateur sa manipulation à travers la simplicité de son interface graphique. Le code n'est limité uniquement par ces propres fonctions, mais il offre à l'utilisateur la possibilité d'y injecter sa propre fonction et définir toutes particularités de son

problème. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en programmant en langage C ou C++ ces propres macros et fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures (condition aux limite, périodique ou autres) par le moyens des UDF (User Defined Functions) sous forme de programme écrits en langage C, qui va être compilé par le compilateur intégré du code «FLUENT », pour être exécuter après (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

III.3.1 Les domaines d'utilisation de logiciel

Le solveur FLUENT a la possibilité de modéliser les phénomènes suivants:

- Ecoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés ;
- Ecoulement incompressible ou compressible, stationnaire ou instationnaire ;
- Ecoulement non visqueux, laminaire, et turbulent, newtonien ou non newtonien ;
- Transfert de chaleur par convection, naturelle ou forcée, transfert de chaleur couplé conduction/convection, transfert de chaleur par rayonnement ;
- Repère de références inertiels (stationnaire) ou non inertiels (en rotation) ;
- Multiples Repère de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans de mélange ;
- Mélange et réaction chimiques d'espèce, incluant des modèles de combustion et réaction de surface de dépôt ;
- Sources volumétriques arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques ;
- Calculs lagrangiens de trajectoire pendant une phase dispersée de particules/gouttes/bulles, incluant le couplage avec la phase continue ;
- Ecoulement avec les matériaux poreux, écoulement biphasique, incluant la cavitation et écoulement à surface libre avec surfaces complexes (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Ces possibilités donnent l'avantage à FLUENT d'être employé pour une grande variété d'applications, incluant ce qui suit:

- Production d'électricité, huile/gaz et applications environnementales ;
- Applications d'espace et de turbomachine ;
- Applications d'automobile ;
- Applications d'échangeur de chaleur ;
- Applications de traitement des matériaux ;
- Conception architecturale et la recherche dans le domaine d'incendie (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

Les principales caractéristiques des versions actuelles du code FLUENT sont résumées dans le tableau III.1 :

Solveur Stokes	<ul style="list-style-type: none"> - Écoulements à faible nombre de Mach ; - Discrétisation par volumes finies ; - Précision du second ordre en temps et en espace ; - Méthode prédicteur/correcteur ; - Solveurs du type : Coupled-Implicit, Coupled-Explicit, ou Segregated-Implicite; - Simulation aux grandes échelles LES, modèle de Smagorinsky ;
Modèle de combustion	<ul style="list-style-type: none"> - Flamme de diffusion ; - Concept de fraction de mélange ; - Combustion contrôlée par le mélange ; - Équation de réaction chimique globale unique ; - Chimie infiniment rapide ; - Consommation basée sur le gradient de fraction de mélange.
Modèle de rayonnement	<ul style="list-style-type: none"> - Équation de transfert radiatif ; - Rayonnement diffus ; - Gaz gris non dispersif ; - Résolution numérique par volumes finis ; - Utilisation d'une centaine d'angles discrets.
Conditions aux limites	<ul style="list-style-type: none"> - Transfert thermique 2D au niveau de chaque maille ; - Propriétés thermiques dépendant de la température ; - Transferts d'énergie basés sur des corrélations empiriques.

Tableau III.1 : Caractéristiques principales du code FLUENT.

III.3.2 Structure de programme

Le paquet FLUENT inclut les produits suivants (figure III.1):

- **GAMBIT** :le pré- processeur pour modéliser la géométrie et réaliser le maillage ;
- **FLUENT** : le solveur ;
- **pre PDF** : le pré- processeur pour modéliser la combustion de PDF dans FLUENT ;

- **TGrid** : un pré-processeur additionnel qui peut produire des mailles de volume de frontière existante.

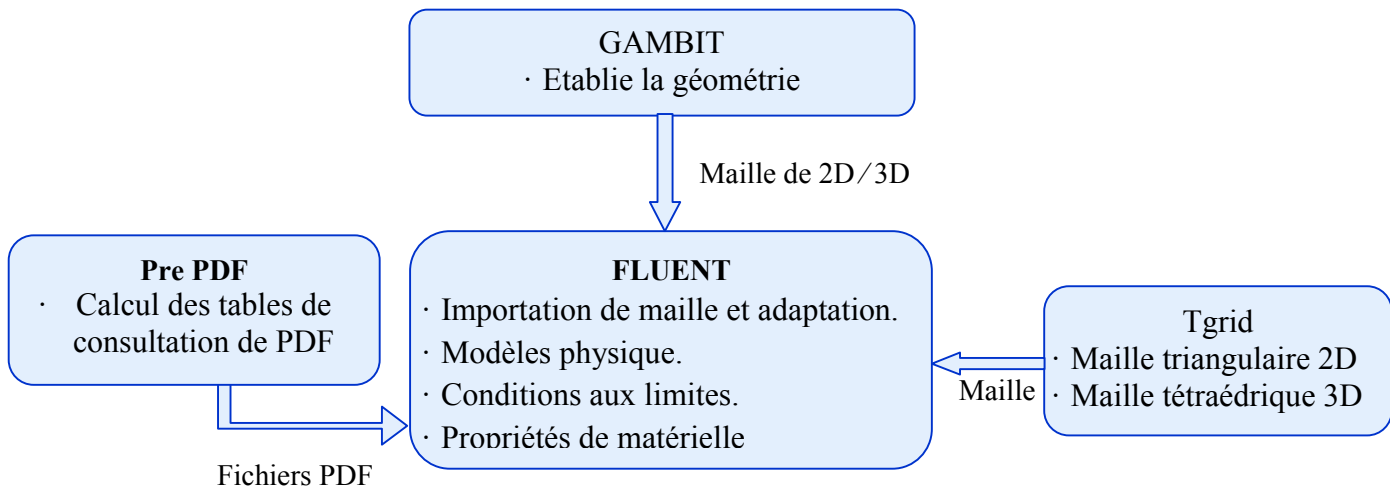


Figure III.1 : Structure d'organisation de FLUENT (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

III.3.2.1 Gambit : Pré- processeur de (CFD)

GAMBIT est le logiciel de génération de la géométrie et de maillage de Fluent. Le mailleur Gambit est conçu pour aider des analystes et des concepteurs à construire des modèles de maille pour CFD et d'autres applications scientifiques. La manipulation de Gambit sera principalement au moyen d'Interface Utilisateur - Graphique (Graphic User Interface 'GUI') (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

A. La structure du GUI

La structure de GUI comporte plusieurs parties qui sont (figure III.2) :

- **La fenêtre de graphe:** C'est la région du GUI dans lequel le modèle est affiché ;
- **Principale Barre De Menu.(main menu bar):** . Elle contient quatre rubriques de menu. Chacune des rubriques est associée à son propre menu des commandes qui permettent d'effectuer de diverses opérations (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);
- **Opération Toolpad:** Il se compose d'un champ des boutons de commande, dont chacun exécute une fonction spécifique associée au processus de créer et d'engrener un modèle (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);
- **subpads:** Chaque subpad contient les boutons de commande qui effectuent des opérations liées au but global du subpad (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);
- **Commandes Globales Toolpad :** Leur but est de permettre de commander les opérations de la fenêtre de graphique et celles du modèle (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);

- **Fenêtre De Description:** Elle affiche les messages décrivant les divers composants de GUI, les champs, les fenêtres, et les boutons de commande (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);
- **fenêtre de transcription et de textes de commande:** Son but est de montrer une notation des commandes exécutées et des messages montrés par GAMBIT pendant la session courante de modélisation (GAMBIT Command Reference Guide, 2000);

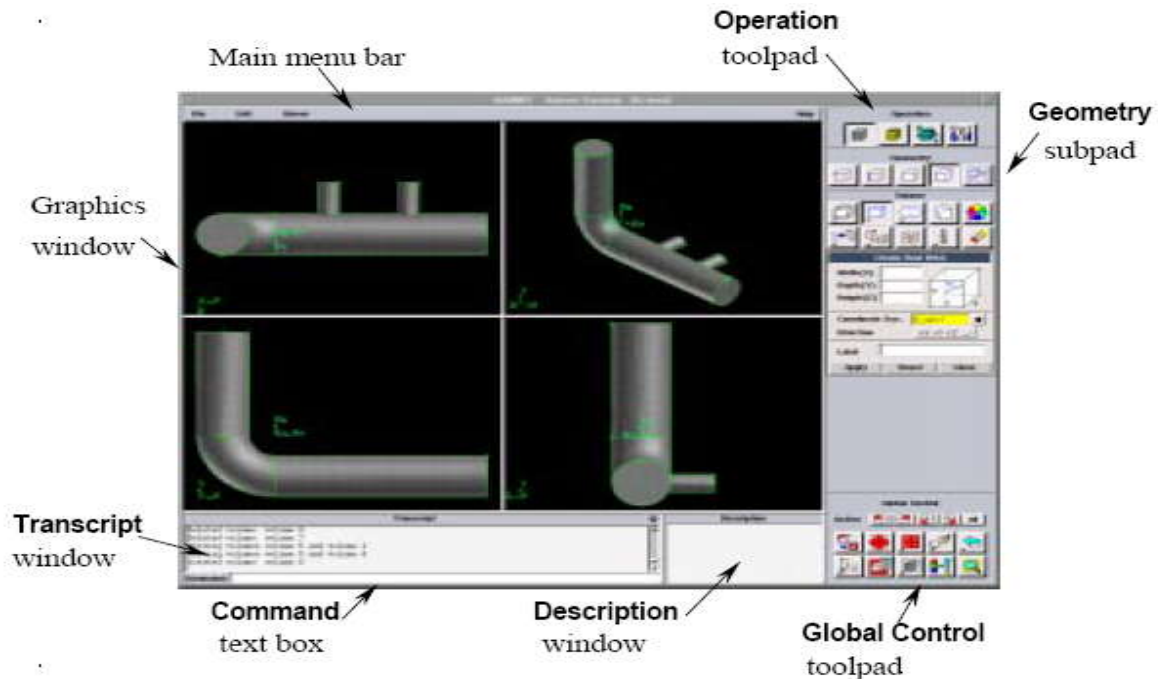


Figure III.2 : L'Interface Utilisateur – Graphique (GUI) (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

B. Génération du maillage

la création du maillage passe par trois étapes essentielles sont :

- La saisie des dimensions nécessaires à la géométrie 2D (x ,y) pour créer le volume de contrôle ;
 - a. Le maillage de base de la géométrie : on a deux type de maillage :le maillage des faces (figure III.3).
 - b. Le maillage des segments (figure III.4).

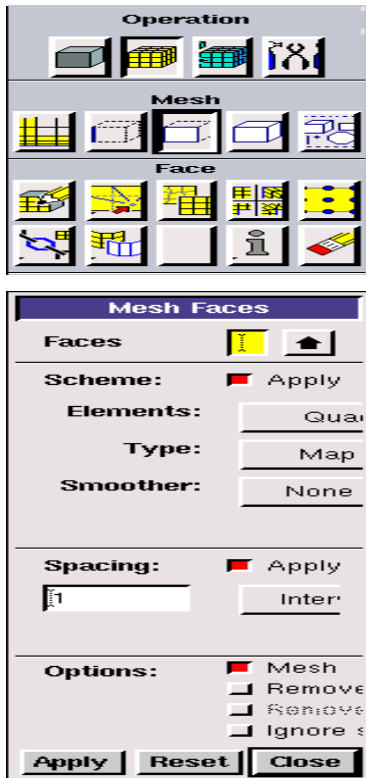


Figure III.3 : Le maillage des faces
(GAMBIT Command Reference Guide, 2000).



Figure III.4 : Le maillage des segments
(GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

Le résultats des opérations précédentes seront affichés dans l'interface de maillage (figure.III.5) (GAMBIT Command Reference Guide, 2000) :

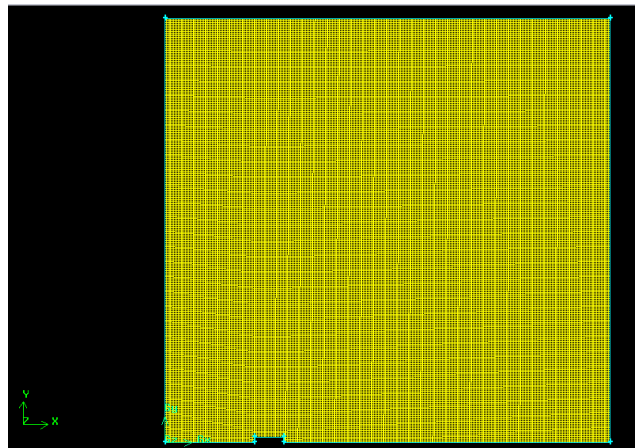


Figure III.5 : Le maillage de base (GAMBIT Command Reference Guide, 2000).

III.3.3. Les principales étapes de résolution du FLUENT

Pour résoudre un problème quelconque, FLUENT facilite la tâche à l'utilisateur à travers la succession d'étapes présentées par les interfaces du menu principale. La procédure de résolution est présentée ci-dessous (FLUENT 5 User's Guide, 2000)..

1. Charger la géométrie par Fluent. File→Read→Case

2. Vérification du maillage. Grid→Check ;
3. Afficher le maillage. Display→Grid ;
4. Définir le Model de solution. Define→Solve ;
5. Définir le Model de Turbulence. Define→Models→Viscous ;
6. Définir la Matière. Define→Materials ;
7. Définir les conditions aux limites. Define→Boundary→Conditions ;
8. Choix du control de solution. Solve→Controls→Solution ;
9. Enregistrer les informations liées au problème. File→write→Case & dat ;
 Le fichier Case (regroupe toutes informations liées à la géométrie).
 Le fichier dat (contient tous les paramètres et données des calculs).
10. Initialiser le calcul. Solve→Initialize→Initialize;
11. Vérifier les résidus des calculs. Solve→Monitors→Residual ;
12. Choisir du nombre des itérations et lancer les calculs. Solve→Iterate ;
13. Post traitement des résultats. (Display, Plot, Report...etc).

Remarque : la même démarche pour le calcul de chaque configuration et les étapes précédentes seront répétées dans n'importe quel test provisoire ou calcul définitif (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

A. Choix de la méthode de résolution

Le solveur permet d'indiquer les divers paramètres associés à la méthode de résolution pour les employer dans le calcul, tel que les dimensions du domaine, le type d'écoulement qu'il soit stable ou instable et la formulation de vitesse (figure III.6).

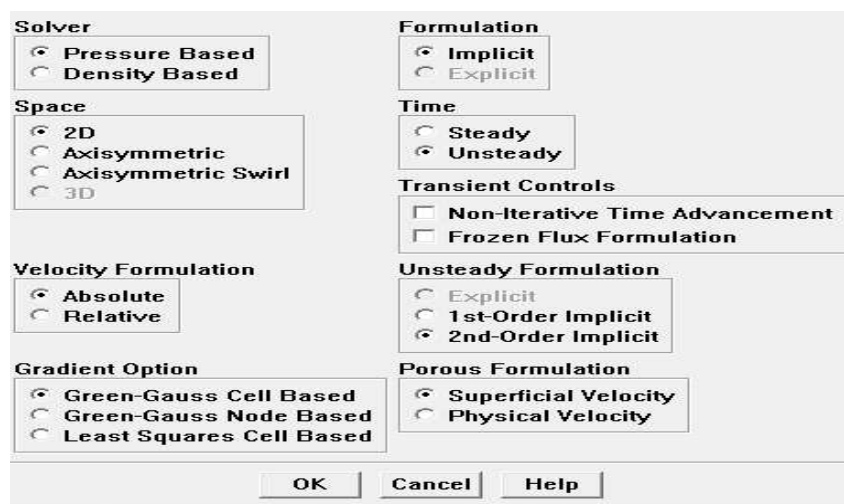


Figure III.6 : Les différentes options du solveur (FLUENT 5 User's Guide, 2000)..

Par les méthodes numériques utilisées par le solveur de FLUENT et qui permettent de résoudre les équations différentielles régissant la conservation de masse, mouvement, d'énergie et autres, on a :

- Méthode isolée (segregated) ;
- Méthode couplée (coupled).

- **La méthode isolée**

Le solveur isolé est l'algorithme de résolution utilisé par les premières versions FLUENT 4. Les équations régissantes sont non linéaires, couplées et exigent plusieurs itérations de la boucle de résolution avant qu'une solution convergée soit obtenue (figure III.7) d'où la nécessité de les résoudre d'une manière séquentielle (C'est à dire, isolé les uns des autres) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

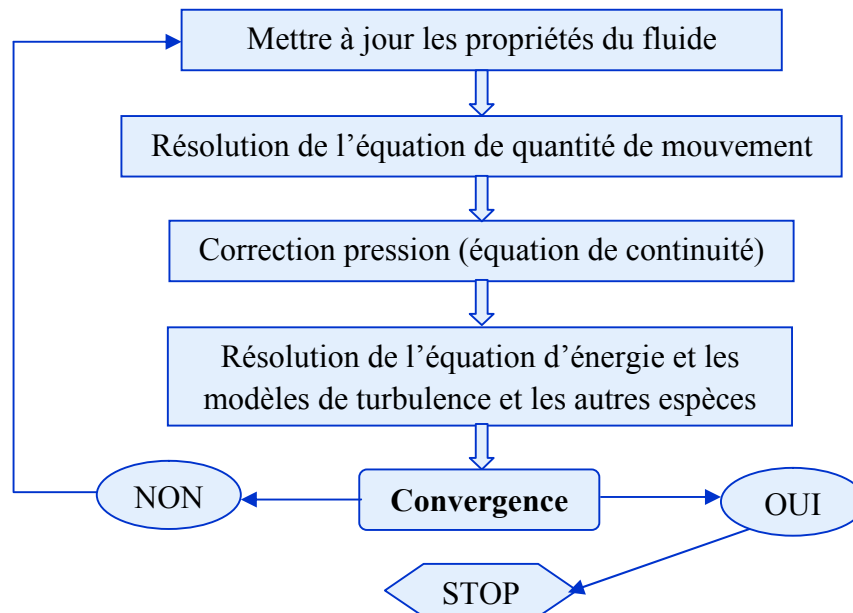


Figure III.7 : Le principe de résolution de la méthode isolée.

- **La méthode couplée (coupled)**

Le solveur couplé résout les équations régissantes de la continuité, mouvement, et (le cas échéant) l'énergie et des espèces simultanément (C'est à d, ensemble couplé). Plusieurs itérations de la boucle de résolution doivent être effectuées avant qu'une solution convergée soit obtenue. Chaque itération comprend les étapes illustrées sur la figure III.8 (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

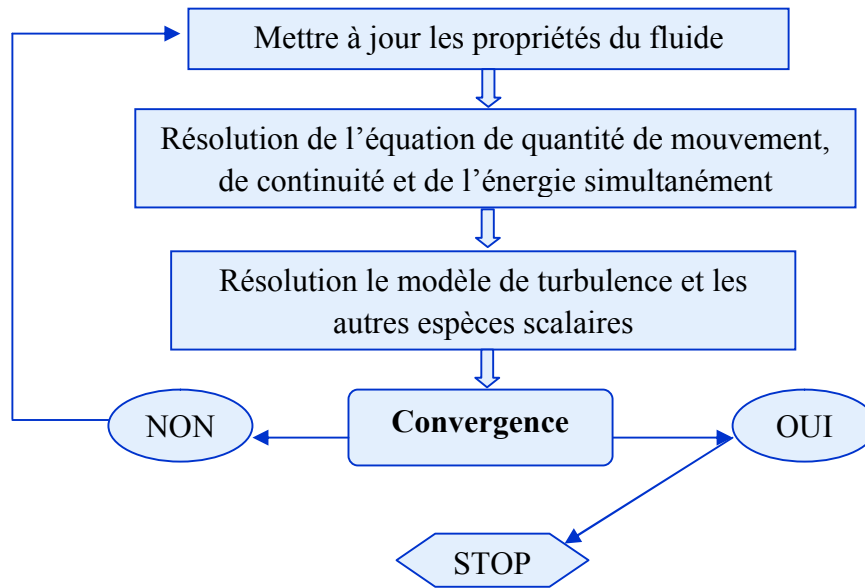


Figure III.8 : Le principe de résolution de la méthode couplée.

- **La discrétisation des équations**

Dans les méthodes de résolution isolée et couplée, les équations discrètes et non linéaires sont linéarisées pour produire un système d'équations, pour les variables dépendentes en chaque cellule de la grille, par l'un des schémas, explicite ou implicite. Le système linéaire résultant est alors résolu pour rapporter une solution mise à jour de champ d'écoulement.

- **Schéma implicite:** Pour une variable indiquée, la valeur inconnue en chaque cellule est calculée en utilisant une relation qui inclut des valeurs connues et inconnues des cellules voisines. Par conséquent chaque variable inconnue apparaît dans plus d'une équation dans le système, et ces équations doivent être résolues simultanément pour donner les valeurs inconnues ;
- **Schéma explicite:** Pour une variable indiquée, la valeur inconnue en chaque cellule est calculée en utilisant une relation qui inclut seulement des valeurs connues. Par conséquent chaque variable inconnue apparaît dans une seule équation dans le système. Dans chaque cellule, ces équations peuvent être résolues séquentiellement, pour donner les valeurs voulues. Dans la méthode de résolution isolée, chaque équation régissant discrète est linéarisée implicitement. Mais la méthode couplée, nous donne le choix d'utiliser une linéarisation implicite ou explicite.

B. Paramètres caractérisant le problème étudié

Pour bien présenter le problème, quelques caractéristiques exprimant ses phénomènes sont à définir, telles que :

- l'équation d'énergie qui permet de prendre en considération les effets et le transfert thermiques (figure III.9) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

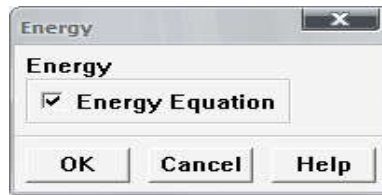


Figure III.9 : Interface d'équation d'énergie.

- La nature de l'écoulement : non visqueux, laminaire ou turbulent (figure III.10).

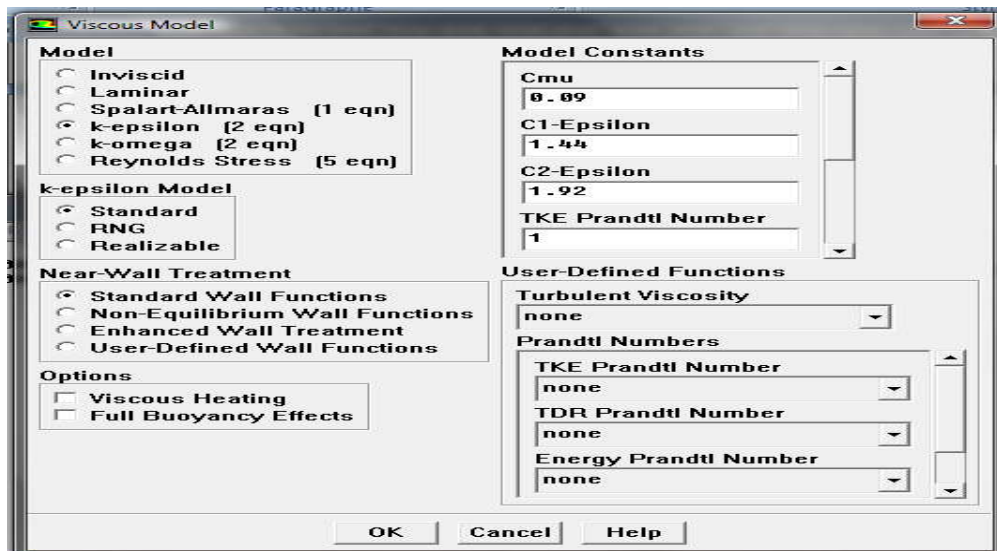


Figure III.10 : Paramètres caractérisant la nature de l'écoulement.

- Modèle des espèces

FLUENT permet de placer des paramètres liés au calcul de la combustion , le mélange et le transport de l'espèce chimique en résolvant des équations de conservation décrivant la convection, la diffusion, et les sources de réaction pour chaque espèce. (figure III.11) (FLUENT 5 User's Guide, 2000).

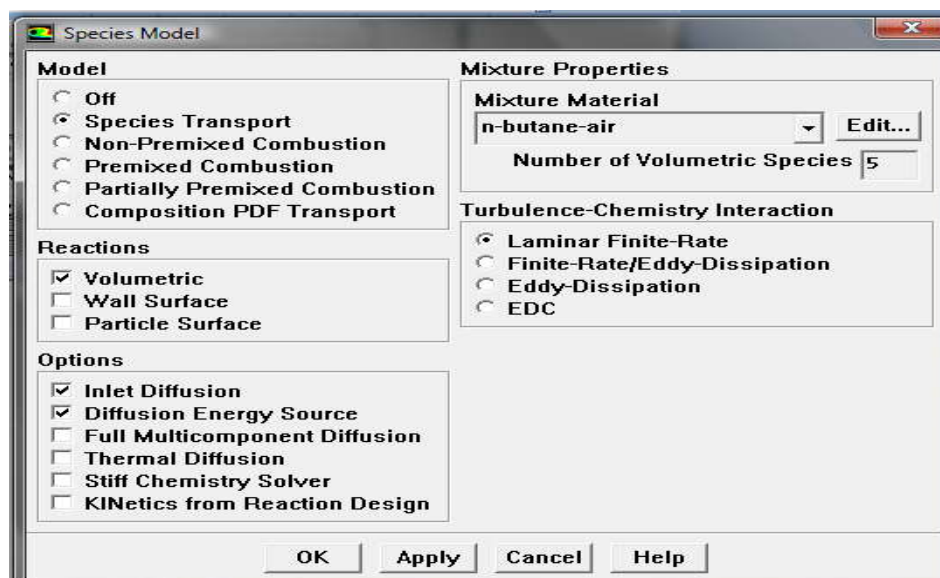


Figure III.11: Modèle des espèces.

- Les caractéristiques du milieu étudié (fluide) qui peuvent être téléchargés à partir de la base de données globale du FLUENT ou être saisies par l'utilisateur (figure III.12).

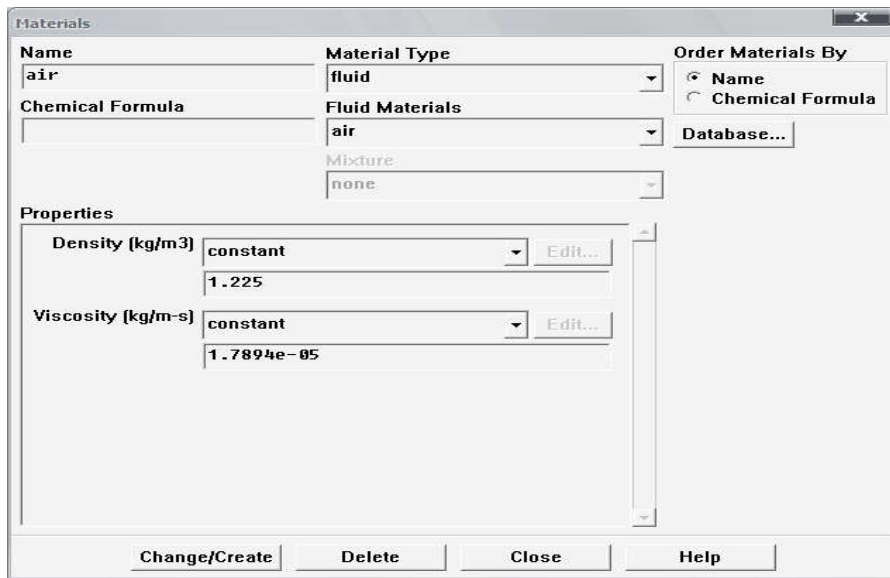


Figure III.12 : Caractéristiques du milieu d'étude.

C. Les conditions initiales et aux limites

Dans cette étape , on doit définir les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites de la configuration étudiée (figure III.13, III.14).

On peut utiliser l'option «compute from » pour déterminer soit les valeurs initiales d'une zone particulière, ou les valeurs moyennes calculées dans le domaine entier.

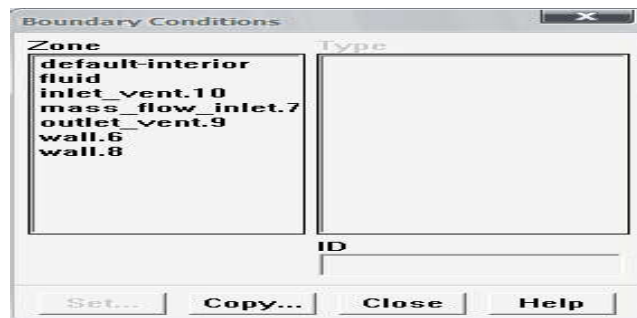


Figure III.13 : les conditions aux limites du domaine.

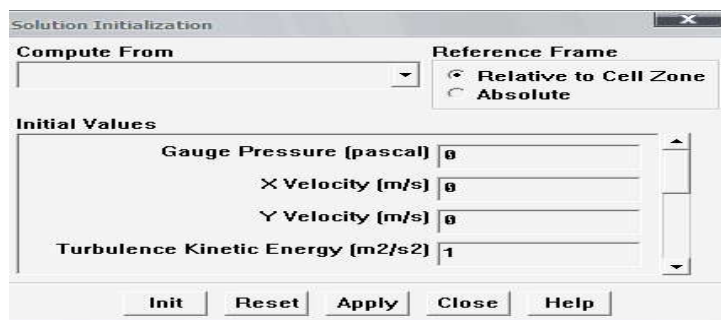


Figure III.14 : les conditions initiales du problème.

Toutes les données saisies peuvent être enregistrées dans des fichiers dont l'extension est « .cas » (figure III.15).

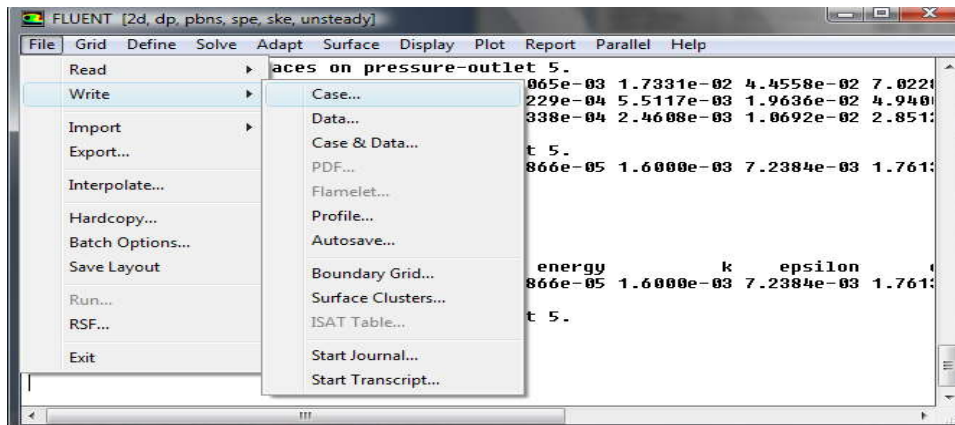


Figure III.15 : Enregistrement des données saisies.

D. Les résultats de simulation

En introduisant le nombre d'itération et suivant une procédure de convergence bien établie, on obtient les résultats de simulation du problème, présentés en terme de champs de vitesse, pression , température...(figure III.17).



Figure III.16 : Le nombre d'itérations de simulation.

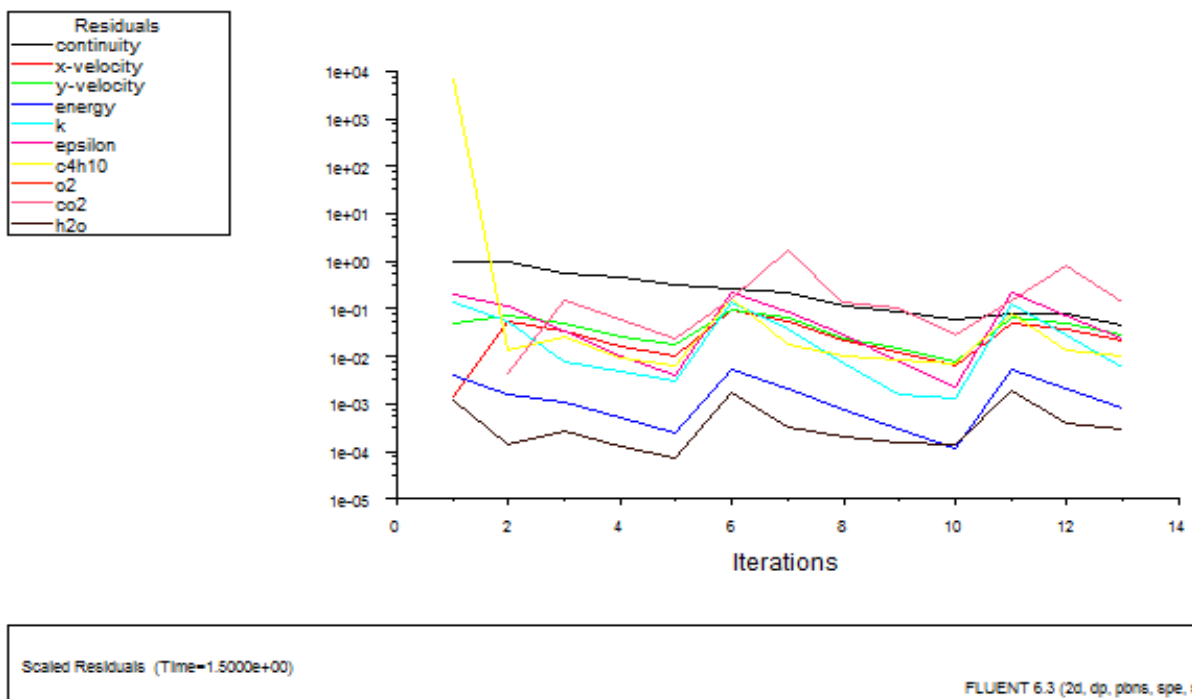


Figure III.17 : le résiduel des itérations .

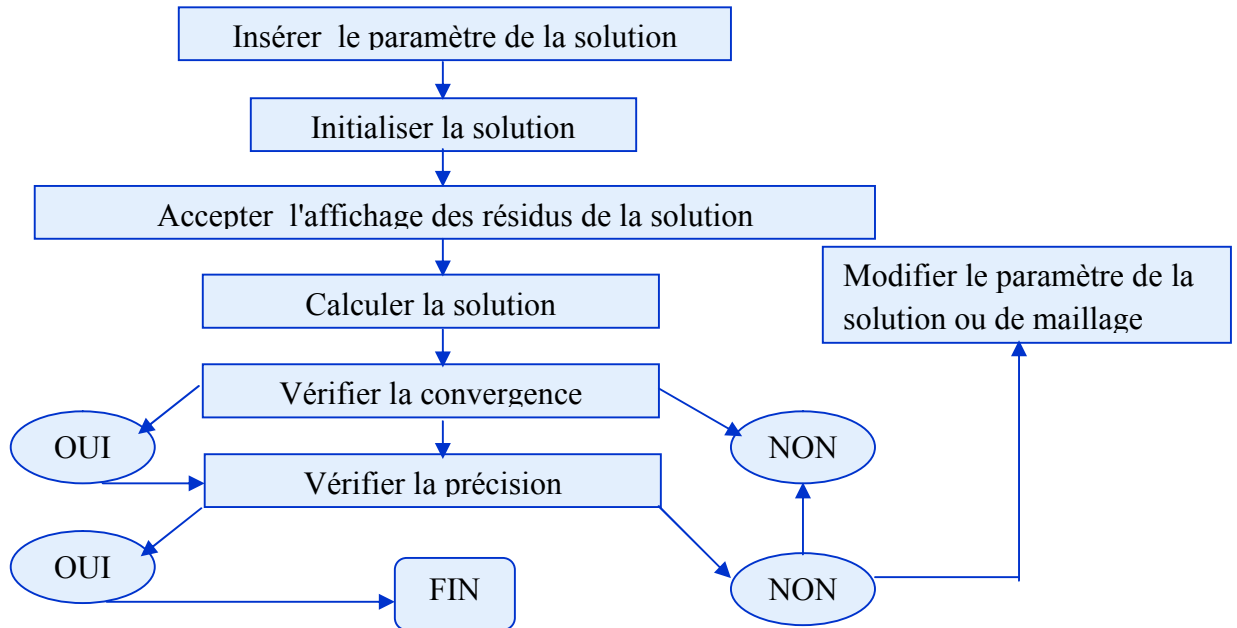


Figure III.18 : la procédure de convergence du programme FLUENT.

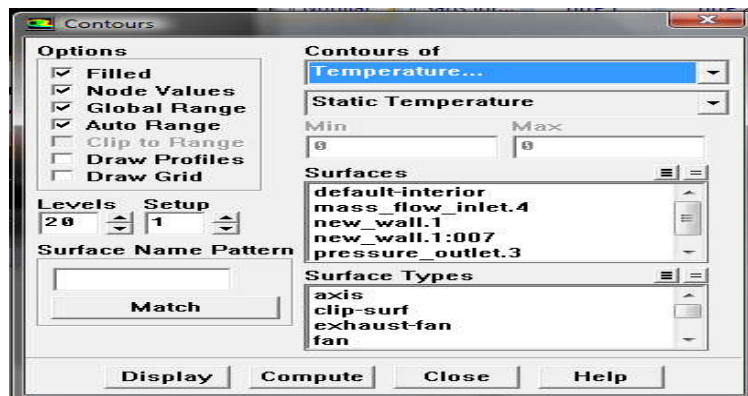


Figure III.19 : Les résultats de simulation.

Ces résultats seront enregistrés dans des fichiers data figure (III.20)

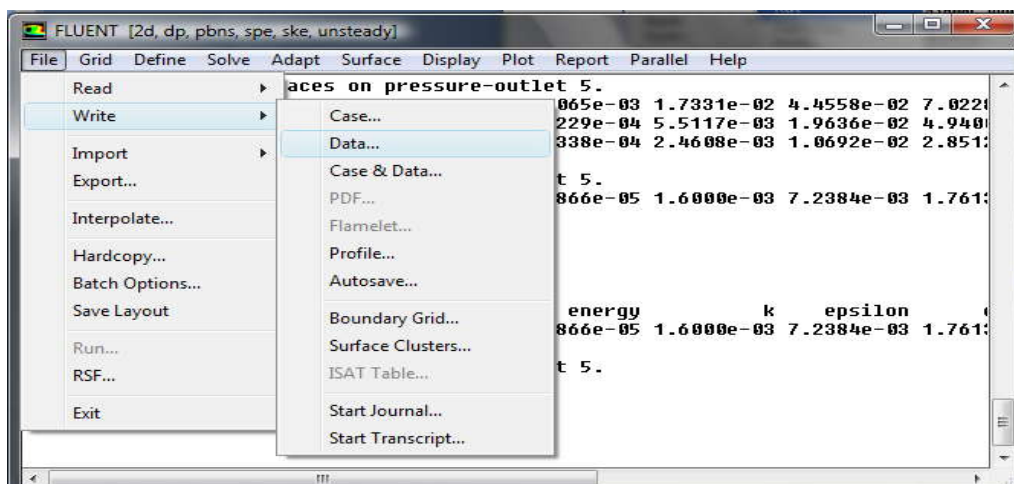


Figure III.20 : Enregistrement des résultats de simulation.

III.4 Présentation générale du code «ALOHA»

III.4.1 Généralités

Il existe de nombreux logiciels qui permettent de modéliser la dispersion dans l'atmosphère de divers produits chimiques et d'estimer leurs concentrations à différentes distances de la source de rejet. Certains d'entre eux s'adressent plus particulièrement aux situations d'urgence. Nous avons choisi d'utiliser parmi ceux-ci le modèle ALOHA en raison de sa facilité d'utilisation, de la possibilité de contrôler plusieurs variables et de la possibilité de l'obtenir gratuitement auprès d'EPA.

CAMEO – ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) est un logiciel de modélisation qui estime des zones de menace liées aux dégagements chimiques dangereux, y compris des nuages de gaz toxique, des Incendies, et des explosions. Une zone de menace est un secteur où un risque (tel que la Toxicity, l'inflammabilité, le rayonnement thermique, ou la suppression préjudiciable) a dépassé un niveau personnalisé par l'utilisateur du souci (LOC). Il a été développé conjointement par les 2 entités américaines suivantes : l' "Environmental Protection Agency's Office of Emergency Prevention, Preparedness and Response" (EPA) et le "National Oceanic and Atmospheric Administration's Office of Response and Restoration" (NOAA)(NOAA, 2006).

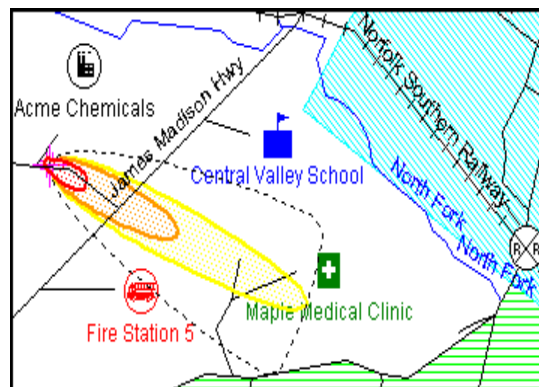


Figure III.21 : Une modélisation par le logiciel ALOHA, zone parcelle affichés sur une carte MARPLOT.

Le rouge, l'orange, et jaune indiquent les zones spécifiques et le niveau des atteintes de chacune.

Le logiciel se compose de :

- Module **CAMEO** qui contient principalement des bases de données chimiques et toxicologiques ;

- Module **ALOHA** ("Areal Locations of Hazardous Atmospheres") qui est un programme informatique permettant d'évaluer, dans des situations d'urgence, la dispersion atmosphérique, de composés rejetés dans des conditions accidentelles. Il prend en compte les propriétés toxicologiques et physiques des polluants, et les caractéristiques du site telles que les conditions atmosphériques et les conditions de rejets. Ce module comprend une bibliothèque de 700 substances chimiques¹ et permet un affichage graphique des résultats ;

- Programme de cartographie électronique appelé **MARPLOT**.

Ce logiciel fonctionne sur des ordinateurs équipés du système Microsoft Windows ou Apple Macintosh (NOAA, 2006).

III.4.2 Caractéristiques clés du programme

- Génère une variété de scénarios de sortie spécifique, y compris la zone menacée de la menace à des endroits précis, source et force graphiques.

Figure III.22 : Situation géographique de la zone concernée.

- Calcul des taux de libération pour les produits chimiques échapper, des flaques d'eau (sur les terres et l'eau), et de gazoducs et de prédire comment ce taux de change avec le temps.

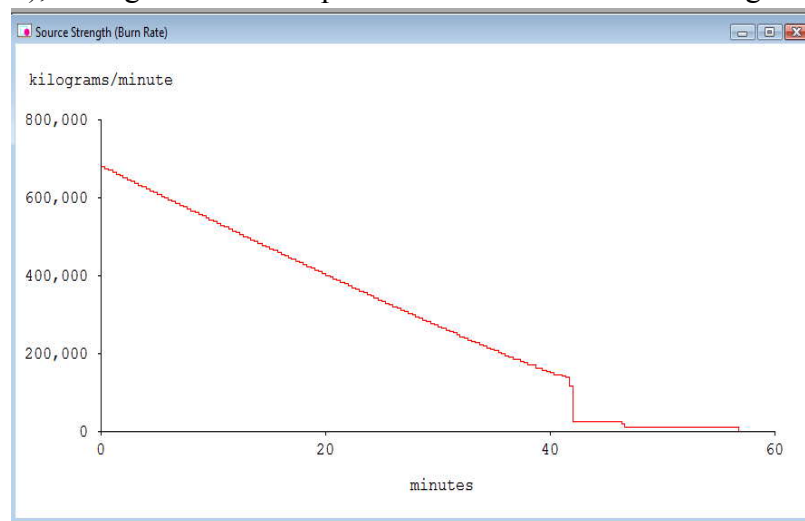


Figure III.23 : Taux de décroissance du polluant brule par rapport au temps.

- Libération de nombreux modèles de scénarios: des nuages de gaz toxiques, BLEVE (Boiling Liquid Expanding explosions de vapeur), jet d'incendies, les explosions de nuages de vapeur, et de mettre en commun les incendies.

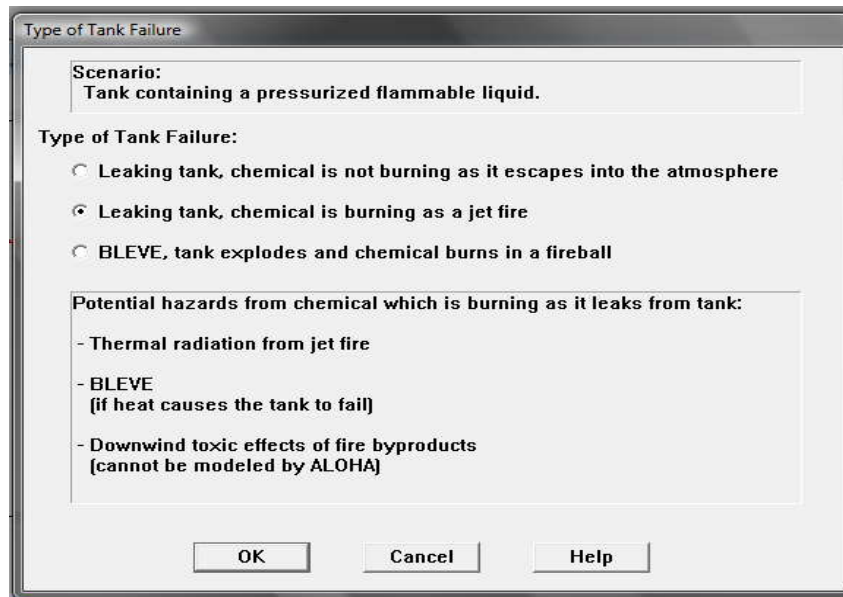


Figure III.24 : Les différents scénarios modélisés par ALOHA.

- Évalue les différents types de risque (selon le scénario de dégagement): toxicité, inflammabilité, le rayonnement thermique, et la surpression.

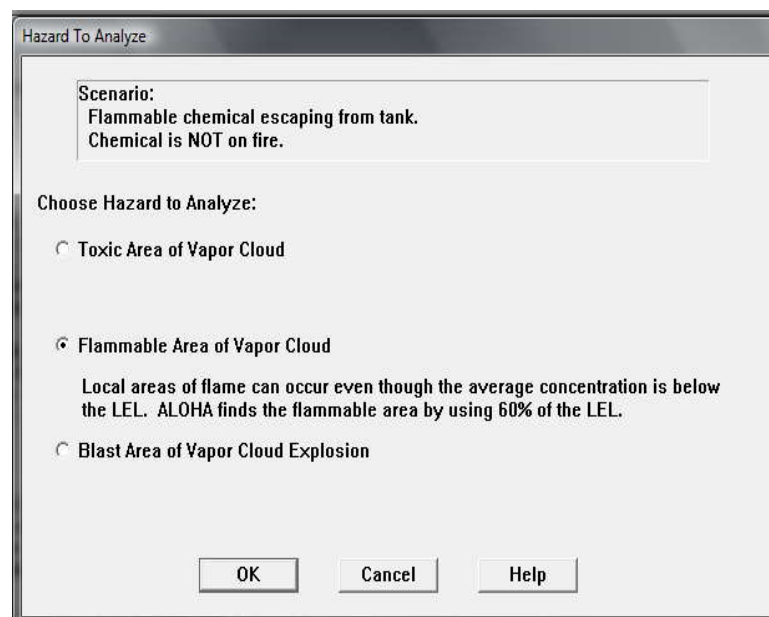


Figure III.25 : Les différents types de risque évalués par ALOHA.

- Affiche menace sur les zones MARPLOT cartes (et sur ArcView et ArcMap avec l'Arc d'outils extensions).

- Fonctionne de façon transparente avec les programmes complémentaires et CAMEO MARPLOT, mais il peut aussi être utilisé comme un programme autonome.

À l'aide de ce logiciel de dispersion et du scénario normalisé d'accident nous avons déterminé les zones d'impact pour différentes quantités relâchées. Afin de déterminer les zones d'impact, on se doit d'utiliser les valeurs de références toxicologiques pour chacune des matières dangereuses toxiques. Les valeurs de références toxicologiques privilégiées pour la

réalisation des scénarios normalisés d'accident sont les valeurs ERPG (*Emergency response planning guideline*). Pour chacune des substances étudiées nous avons modélisé des relâchements impliquant les quantités suivantes : 10, 50, 100, 200, 500, 1 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000 kg sur une période de 10 minutes. Le logiciel évalue également l'évolution des concentrations d'une substance à l'intérieur des résidences. Il permet donc de déterminer de façon générale le facteur de protection d'une résidence lors d'une recommandation de confinement (Lefebvre et al., 2004).

III.4.3 Domaine de fonctionnement d'ALOHA - principales limitations

ALOHA utilise, suivant le type de polluant, deux modèles de dispersion atmosphérique :

- Un modèle gaussien pour les gaz neutres au niveau de la suspension dans l'atmosphère ;
- Un modèle de gaz lourd, basé sur le modèle DEGADIS 2.1 (Spicer, Tom and Jerry Havens, 1989) qui a été simplifié par souci de rapidité de calcul.

Ils supposent un terrain plat, sans réaction chimique, avec un terme source d'émission stationnaire. Leur avantage principal est le temps rapide de calcul.

Le module a été conçu afin :

- Qu'il puisse être installé sur des ordinateurs portables ;
- Qu'il respecte des critères de convivialité et d'ergonomie indispensables aux situations d'urgence ;
- Que l'interface minimise les erreurs de l'utilisateur en vérifiant la cohérence physique des données d'entrée (OEM, 2007).

Ce que fait ALOHA :

ALOHA permet la modélisation d'émissions à partir :

- De flaques en ébullition ou non ;
- De réservoirs sous pression de gaz ou de liquide, de réservoirs liquides non pressurisés, de réservoirs contenant des gaz liquéfiés, de conduite de gaz sous pression.

ALOHA modélise la dispersion atmosphérique de gaz neutre, par un module basé sur l'approche gaussienne, et de gaz plus lourd que l'air au moyen d'un module de gaz dense. Il propose à l'utilisateur le choix entre les deux modules, et de définir lui même le module. Plus précisément les critères du logiciel sont la masse molaire du produit, la taille du rejet et la température du nuage (OEM, 2007).

Les principales limitations sont les suivantes :

- La topographie et la présence d'obstacles ne sont pas prises en compte ;
- La dispersion de particules n'est pas modélisée ;
- L'élévation des gaz chaud ou légers n'est pas prise en compte ;

- Certains des phénomènes qui se situent au niveau du point de rejet ou dans le champ proche ne sont pas pris en compte, tel les phénomènes de jets, par conséquent ALOHA n'affiche pas de résultats à des distances inférieures à 100 m ;
- Les rejets à partir de conduite liquide ne sont pas modélisés ;
- Les aérosols (ex. : lors de rejets d'ammoniac,...) ne sont pas modélisés par ALOHA, qui suppose leur évaporation immédiate aux abords de la fuite ;
- ALOHA ne calcule pas la réactivité chimique, il avertit cependant l'utilisateur et décrit le type de réactions et les produits attendus ;
- ALOHA peut calculer le terme source et la dispersion à partir de composés purs ou de solutions liquides mais ne modélise pas les mélanges gazeux ;
- La réactivité chimique au sein d'un panache de fumées n'est pas modélisée (OEM, 2007).

III.4.4 Utilisations d'ALOHA

ALOHA est conçu pour donner des résultats assez rapidement pour être utiles aux intervenants au cours d'une intervention en cas d'urgence chimique. Les utilisateurs d'ALOHA peuvent aider à évaluer rapidement l'ampleur d'un incident chimique - est que, si la publication de voyage 10, 100 ou 1000 mètres.

Pour obtenir les informations sur les dangers dont on a besoin rapidement, ALOHA permet :

- De réduire les erreurs de saisie de données en vérifiant les valeurs d'entrée et on alerte si la valeur est peu probable ou pas physiquement possible. ALOHA offre également des valeurs par défaut lorsque cela est possible ;
- ALOHA a sa propre bibliothèque chimiques avec des propriétés physiques pour environ 1000 produits chimiques dangereux afin de ne pas avoir à entrer ces données. Utilise des calculs qui sont un compromis entre précision et vitesse.

En outre l'intervention d'urgence, ALOHA a la capacité de modélisation les risques et peut également être utilisé pour la planification, de formation et les objectifs académiques (NOAA, 2006).

Pour modéliser les risques avec ALOHA, on doit entrer le scénario de l'information (voir ci-dessous). L'interface d'ALOHA est facile à utiliser par l'intermédiaire du processus de saisie des données en utilisant une série de boîtes de dialogue. Aide détaillée est fournie avec chaque boîte de dialogue.

On fait entrer les informations scénario de base (comme la date, l'heure et l'emplacement), on choisit un produit chimique de l'ALOHA chimiques bibliothèque, Entrer l'information atmosphérique (tels que vitesse et direction du vent, température de l'air, et de la couverture nuageuse) à la main ou automatiquement en utilisant une station portable pour des mesures atmosphériques (SAM), on choisie une source directe, flaque, gazoduc, ou de la citerne, puis on entre les sources d'information (comme la libération montant, réservoir dimensions, et si le produit chimique est de brûlure), on précise les niveaux préoccupants (lettres de crédit) qu'on souhaite, ALOHA les utiliser pour estimer les zones menacées ou

utiliser les lettres de crédit par défaut, ensuite on choisit le type de risque (comme un nuage de vapeurs toxiques ou une explosion des nuages de vapeur) ALOHA qu'on veut les utiliser pour estimer les zones menacées, comme on entre des informations, ALOHA affiche les informations clés dans un texte Résumé écran. Une fois tous ALOHA les calculs sont terminés, on peut afficher les résultats dans une variété de produits graphiques (y compris une zone menacée) (NOAA, 2006).



Figure III.26: Une modélisation par le logiciel ALOHA zone parcelle affichés sur une carte Google Earth (NOAA, 2006).

Le rouge, orange, jaune et indiquent les zones où les zones spécifiques niveau de préoccupation les seuils ont été dépassés.

Note: Pour afficher une zone menacée sur Google Earth, vous devez d'abord importer la zone menacée à ArcGIS en utilisant les outils ALOHA Arc extension, puis l'exporter comme un fichier KML (en utilisant une extension disponible sur le site ESRI). Une zone menacée ALOHA s'affiche sur une carte Google Earth. Le rouge, orange, jaune et indiquent les zones où les zones spécifiques niveau de préoccupation les seuils ont été dépassés.

III.4.4.1 Utilisation d'ALOHA a un cas d'incendie

Le calcul de la dispersion atmosphérique de fumées d'incendie ou de vapeurs chaudes n'est pas réalisable par la seule utilisation d'ALOHA. En effet un module de calcul de sur-hauteur de panache ou d'élévation de gaz chaud fait défaut au logiciel (Evans, 1994).

III.4.4.2 Utilisation d'ALOHA a un cas rejet de gaz léger

La dispersion atmosphérique d'un gaz léger a été testée au moyen d'un rejet gazeux d'hydrogène, dont les caractéristiques du terme source sont données dans le tableau ci-dessous. ALOHA détermine des concentrations au sol de 2000 ppm à des distances supérieures à 400 m. Ce résultat irréaliste a été obtenu par le logiciel qui a choisi d'utiliser le module passif, soit l'approche gaussienne simple sans tenir compte de l'élévation de gaz du fait de sa faible densité (Evans, 1994).

III.4 Conclusion

Dans le domaine l'incendie, il existe un grand nombre de logiciels dédiés à l'étude des différents phénomène d'incendie, en commençant par son ignition (flamme) jusqu'à l'évacuation et la prédiction des pertes probables. Les outils numériques utilisés dans le cadre du présent travail ont été présenté dans ce chapitre, en faisant référence aux modèles classiquement employés déjà présentés dans le second chapitre, ceci a permis de situer les codes FLUENT et ALOHA en montrant leurs points forts, leurs faiblesses, et ce qui fait leurs originalités.

Globalement, ces codes constituent des outils attrayants pour la simulation des incendies car ils sont faciles à mettre en œuvre. Il nécessite en effet une puissance informatique relativement modeste, grâce à l'emploi d'un maillage cartésien permettant l'utilisation d'un solveur rapide.

Les concepteurs de ces codes ont cherché à mettre à la disposition des utilisateurs des outils numériques à la fois robustes et rapides. C'est la raison pour laquelle les modèles employés sont généralement simples et peu coûteux. Cette démarche pour la simulation numérique correspond au niveau de précision actuellement attendu par les utilisateurs pour traiter des problèmes d'ingénierie de la sécurité contre l'incendie.

Notre choix était principalement basé sur les phénomènes modélisables par ces deux outils ; la dispersion atmosphérique et l'apport de chaleur qui sont les principaux effets générés par les incendies et ainsi on pourra par le code FLUENT déterminer l'effet thermique au cœur du feu et son entourage sa vitesse de réaction et bien d'autres facteur.

Alors qu'avec l'utilisation du logiciel ALOHA on peut cerner les zones touchées par la pollution due à l'incendie, les zones de pression due aux ondes de choc ainsi que le dimensionnement de la boule du feu en donnant la quantité exacte du fuel consommé.

En combinant les résultats des deux logiciels, on peut avoir une image approximative de la situation lors du phénomène étudié.

Chapitre 4

Application des outils numériques

<i>IV.1 Introduction.....</i>	<i>85</i>
<i>IV.2 Application des outils de modélisation numérique à un cas réel.....</i>	<i>86</i>
<i>IV.3 Conclusion.....</i>	<i>106</i>

Chapitre IV

Application du FLUENT et ALOHA pour la modélisation des effets de l'incendie sur l'environnement atmosphérique

Les incendies en milieu industriel constituent un problème complexe. Il est en effet impossible de décrire et de prédire tous les développements spécifiques possibles d'incendie. Toutefois, sur la base de l'accidentologie et du retour d'expérience, il est possible d'identifier différentes phases types de développement. En effet, en fonction des produits combustibles mis en jeu, de leur agencement, de l'infrastructure et de la ventilation, il est possible d'observer différentes évolutions possibles de l'incendie conduisant chacune à des phénomènes particuliers ; feu de nappe, Boilover, BLEVE...et ainsi une variété de conséquences.

IV.1 Introduction

L'incendie dans l'entreprise est un sujet très préoccupant et d'actualité permanente. Il est souvent question de sinistres graves faisant parfois des victimes et causant d'importants dégâts matériels. Toutes les parties prenantes doivent être conscientes de la gravité du problème et ainsi la sécurité est devenue une des préoccupations majeures du milieu industriel. Aussi bien pour la pérennité de l'entreprise que pour son image. Il est donc nécessaire pour une entreprise d'être capable d'anticiper et de prévoir les sinistres auxquels elle est susceptible de faire face. C'est pourquoi un grand nombre d'entreprises utilise des outils

de prédiction dont font partie les logiciels de simulation tels qu'EffectGIS®, Aloha®, Phast®, Fluent et bien d'autres encore.

Dans le cadre ce travail, on a opté pour la modélisation d'un accident qui eu lieu au terminal de Skikda, Algérie en octobre 2005, afin d'évaluer les effets qu'il a généré sur l'environnement du coté de l'effet thermique ainsi que la dispersion atmosphérique du polluant dans l'atmosphère et son impact sur l'homme. On a également fait une comparaison entre les logiciels utilisés.

IV.2 Application des outils de modélisation numérique à un cas réel

IV.2.1 Description de l'accident

Le 4 octobre 2005, à 10 h 00 du matin, un incendie s'est déclaré sur le bac de pétrole brut S106 au terminal de stockage de Skikda (Figure III.27) et celui-ci s'est étendu plus tard au bac S105 voisin. Le "Boilover" qui s'est produit aurait éjecté la totalité du contenu du bac. Une boule de feu de centaines de mètres d'hauteur aurait été aperçue qui aurait tué tout le personnel présent à proximité.

La cuve S106 était en cours de remplissage depuis 21 h 40 la veille au soir et le niveau était de 10,72m (pour un maximum de 13m), ce qui correspond à un taux de remplissage d'environ 82.46% par rapport au volume total

de 50 000 m³ de la cuve. La spécification de TVR maximale est de 0.75 kg/cm² pour un bac à toit flottant. La TVR correspondant aux conditions atmosphériques du 11 octobre et celle du 13 octobre (soit 7 et 9 jours après l'arrêt) étaient respectivement de 0,91 et 0,94 kg/cm² et l'estimation du contenu en GPL était de 3 % (mol) à 0.75 kg/cm² et 5 % mol à 0.95 kg/cm². Pour un bac, cela équivaut à une masse de 75 tonnes évaporées, le volume occupé par ce gaz à une concentration de 100% est alors de 60 000 m³.

L'étude qui a été réalisée par le groupe d'experts "Richard Whitehead DNV et al." a montré que parmi les polluants émis lors de cet incendie, figurent principalement les NO_x et des COV.

Les logiciels proposés ; FLUENT (code CFD) et ALOHA (modèle gaussien) permet de suivre le profil de concentration des polluant, l'évolution de la température et la vitesse par rapport au temps ainsi que le calcul des taux de libération pour les produits chimiques échappés vers l'atmosphère.



Figure IV.27: Photo de la boule de feu résultante du Boilover lors de l'accident (DNV CONSULTING, 2005).



Figure IV.28: Conséquences des effets de l'incendie (DNV CONSULTING, 2005).

IV.2.2 Modélisation par le code FLUENT

Étant donné la nature des écoulements mis en jeu, les simulations sont réalisées en supposant que le problème est instationnaires bidimensionnel. Les temps de calcul s'en trouvent considérablement réduits. Il est alors possible de comparer des simulations correspondant à différentes tailles de mailles. Le maillage est quadratique généré par le préprocesseur Gambit avec le logiciel « FLUENT » qui résout les équations de Navier Stokes par la méthode des volumes finis. L'objectif de ce travail est surtout de tester la capacité du code à reproduire les observations expérimentales (l'accident qui a eu le 4 octobre 2005 à la raffinerie de Skikda), mais il faut signaler que cette modélisation concerne le phénomène du Boilover qui avait lieu exactement le 5 octobre 2005 et qui a duré 58 s (temps de formation de la boule du feu) (Medrharhet, 2008).

IV.2.2.1 Conditions aux limites

Les simulations numériques ont été effectuées dans un domaine correspondant au volume de contrôle allant de la position $x=0$ m jusqu'à la position $x=1000$ m. La source de pollution thermique (foyer de l'incendie) est graduellement limitée entre deux points inclus entre les positions 0 et 1000m. Le volume de contrôle représentant le domaine de notre étude est schématisé dans la figure IV.29.

La simulation numérique de cette configuration utilise le maillage $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ uniforme présenté sur la figure III.5. Le domaine s'étend sur 1000 m selon x, 1000 m selon y. La taille des mailles est de 1m selon x et y.

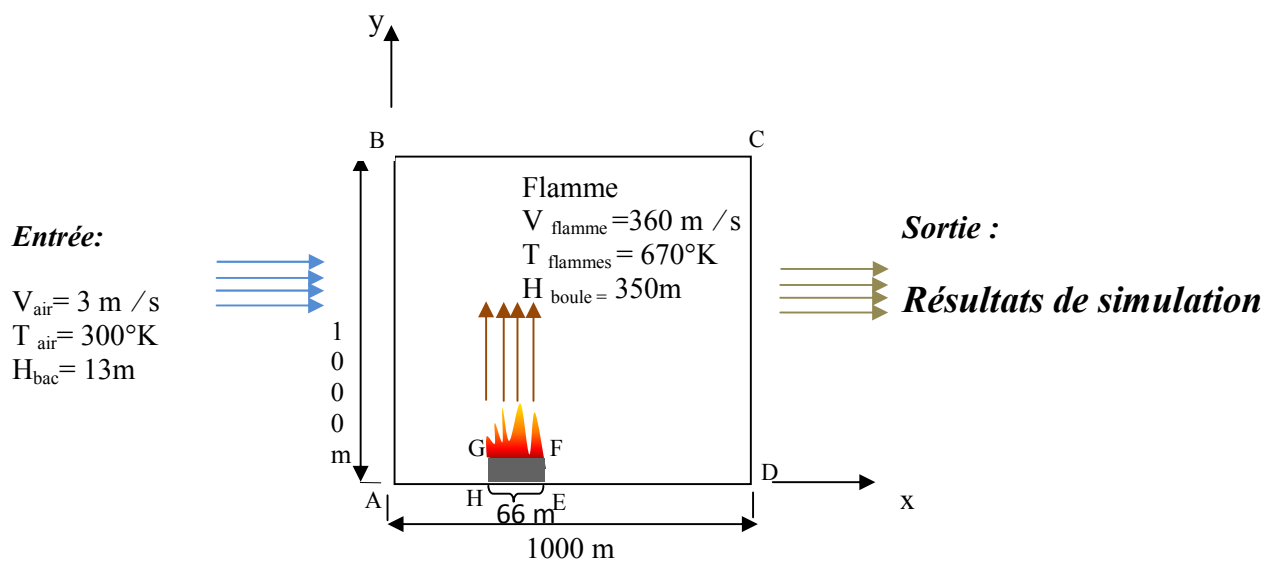


Figure IV.29 : Représentation schématique du domaine de l'étude.

En plus d'un maillage adéquat, les conditions aux limites sont très importantes pour obtenir une solution précise avec une convergence rapide. Ce paragraphe présente de façon succincte les conditions aux limites disponibles. Afin de définir un problème avec une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Spécifier les flux de masse, quantité de mouvement, énergie, ... etc. Définir les conditions aux limites implique:

- Identifier la position des frontières (e.g. entrées, parois, symétrie) ;

- Donner les informations sur ces frontières.

Les données dépendent du type de conditions aux limites et des modèles employés. On doit connaître l'information nécessaire aux frontières et positionner ces frontières où l'information est connue ou peut être correctement approchée. Les mauvaises conditions aux limites ont toujours un impact sur les résultats.

Les types de conditions aux limites disponibles sur le code de calculs Fluent sont comme suit :

- Types de conditions limites pour les surfaces externes : External Faces
 - General: Pressure inlet, Pressure outlet ;
 - Incompressible: Velocity inlet, Outflow;
 - Écoulement compressible: Mass flow inlet, Pressure far-field;
 - Spécial: Inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan ;
 - Other: Wall, Symmetry, Periodic, Axis.
- Types de conditions limites pour les cellules : Cell Boundaries.
 - Fluide et Solide.

Le logiciel « Fluent » offre la possibilité de changer le type de conditions aux limites et de régler les données suivant nos besoins (e.g. définir par des UDFs).

Les conditions limites de notre problème sont définies sur le code Fluent comme suit :

Condition d'entrée [AB]: On choisit le type vitesse à l'entrée : Velocity Inlet,

- Magnitude, Normale à la frontière ;
- Les composants ;
- Magnitude et Direction.

Le profil de vitesse est uniforme par défaut. Pour les écoulements incompressibles, la pression statique s'ajuste afin de correspondre à celle de la vitesse demandée, les propriétés globales (stagnation) varient aussi et la conservation de la masse doit être vérifiée si plusieurs entrées sont utilisées. Donc, à l'entrée, on a définie une vitesse moyenne 3 m/s avec l'addition d'une perturbation de façon aléatoire.

Condition de sortie [CD]: De type Pression à la sortie : Pressure Outlet.

Ce type de condition est spécifiée par un niveau statique de pression, elle est interprétée comme étant la pression statique de l'environnement extérieur. Elle est utilisable avec les écoulements compressibles ou incompressibles. La pression est ignorée si l'écoulement est localement supersonique, peut être utilisé comme frontière libre dans un écoulement externe ou non confiné.

Condition de paroi [DE, EF, GH, HA]: On a choisi le type : Wall pour les parois. Dans ce type de condition, différents paramètres peuvent être spécifiés nous citons :

- Limite (fluide/solide).

Avec les écoulements visqueux, conditions de non glissement à la paroi (enforced at walls) :

- Vitesse tangentielle de fluide égale à la vitesse de la paroi ;
- Composante normale de vitesse = 0 ;
- Le cisaillement peut être spécifié ;
- Conditions thermiques (Plusieurs possibilités), le matériau du mur et son épaisseur peuvent être définis pour des calculs de transferts ;
- La rugosité du mur peut être définie pour les écoulements turbulents ;
- Une vitesse de translation ou de rotation peut être affectée au mur.

Pour les parois de notre géométrie, nous les avons considérées adiabatiques à température constante (sans aucun transfert thermique).

Condition du jet [FG] : On choisi le type vitesse à l'entrée : Velocity Inlet, (Mass flow inlet).

A ce niveau la vitesse du jet peut être définie comme étant celle de détonation (explosion), donc on a définie une vitesse moyenne approximative égale à 671,4 m/s avec l'addition d'une perturbation de façon aléatoire.

Condition de l'atmosphère ouvert [BC] : De type : Pressure Outlet.

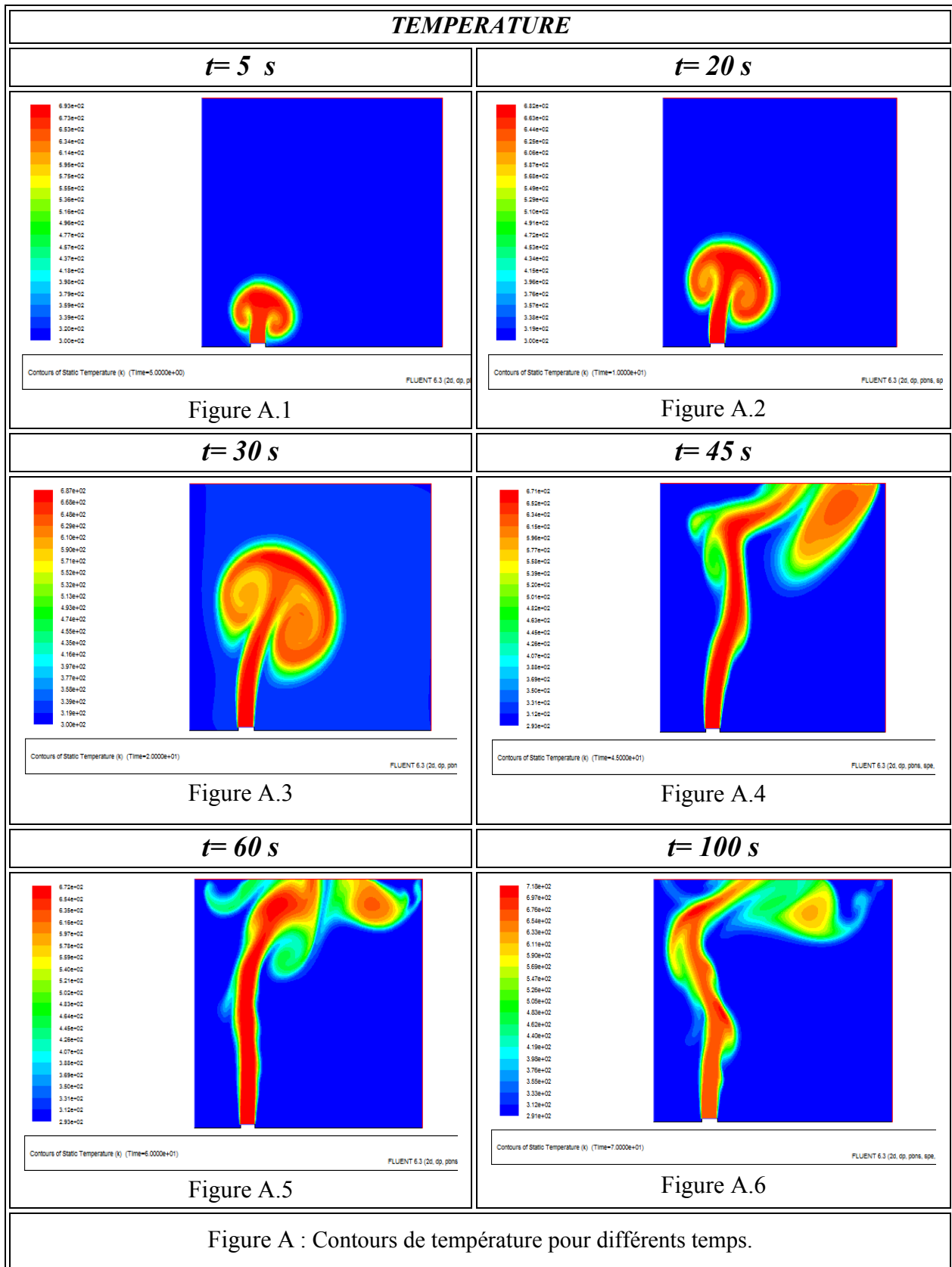
IV.2.2.2 Résultats et discussions

Étant donné la nature des écoulements mis en jeu, les simulations sont réalisées en supposant que le problème est bidimensionnel. Les temps de calcul s'en trouvent considérablement réduits. Il est alors possible de comparer des simulations correspondant à différentes tailles de mailles. Les maillages utilisés sont uniformes avec des mailles pratiquement carrées. D'après la configuration du problème. L'objectif de ce travail est surtout de tester la capacité des codes à reproduire les observations expérimentales.

Les résultats des simulations correspondent aux valeurs moyennes sur une période d'environ 100 secondes (durée exacte de formation de la boule de feu est 58 s). Ces simulations numériques ont été effectuées avec de nombreuses simplifications qui les éloignent certes de la réalité physique d'un incendie, mais cela procède d'un double souci de généralité et de cohérence. On a donc choisi la modélisation la plus « neutre » possible. La forme et la nature de la source peuvent influencer sur les phénomènes turbulents ; on a donc choisi une simple source volumique de chaleur de forme géométrique simple. Les transferts thermiques, radiatifs notamment, dépendent fortement du combustible ; ils ont été ignorés.

A. Profil de température

Pour améliorer les résultats obtenus par simulation numérique avec le code FLUENT, on a opté de faire une animation en séquence vidéo du comportement thermique de l'incendie puis choisir quelques illustrations à des instants différents qui permettront de voir au plus près ce qui c'est passé dans un cas réel.



Les figures A.1, A.2..., A.6, montrent la variation bidimensionnelle de température en fonction du temps au niveau de l'accident du Skikda 2005. Par ailleurs, ces résultats numériques sont faites avec un maillage fin met en évidence un gradient de température présentant de fortes variations lorsque l'on s'éloigne du foyer d'incendie. Ces variations semblent correspondre aux zones de flamme que l'on peut situer à l'aide des dégradations des couleurs.

On y remarque la stratification de la température typique du feu avec source localisée (bac). On peut remarquer d'après l'allure du champ de température que la flamme est faiblement perturbée par l'air, puisque l'allure de la courbe est très légèrement penchée vers la droite.

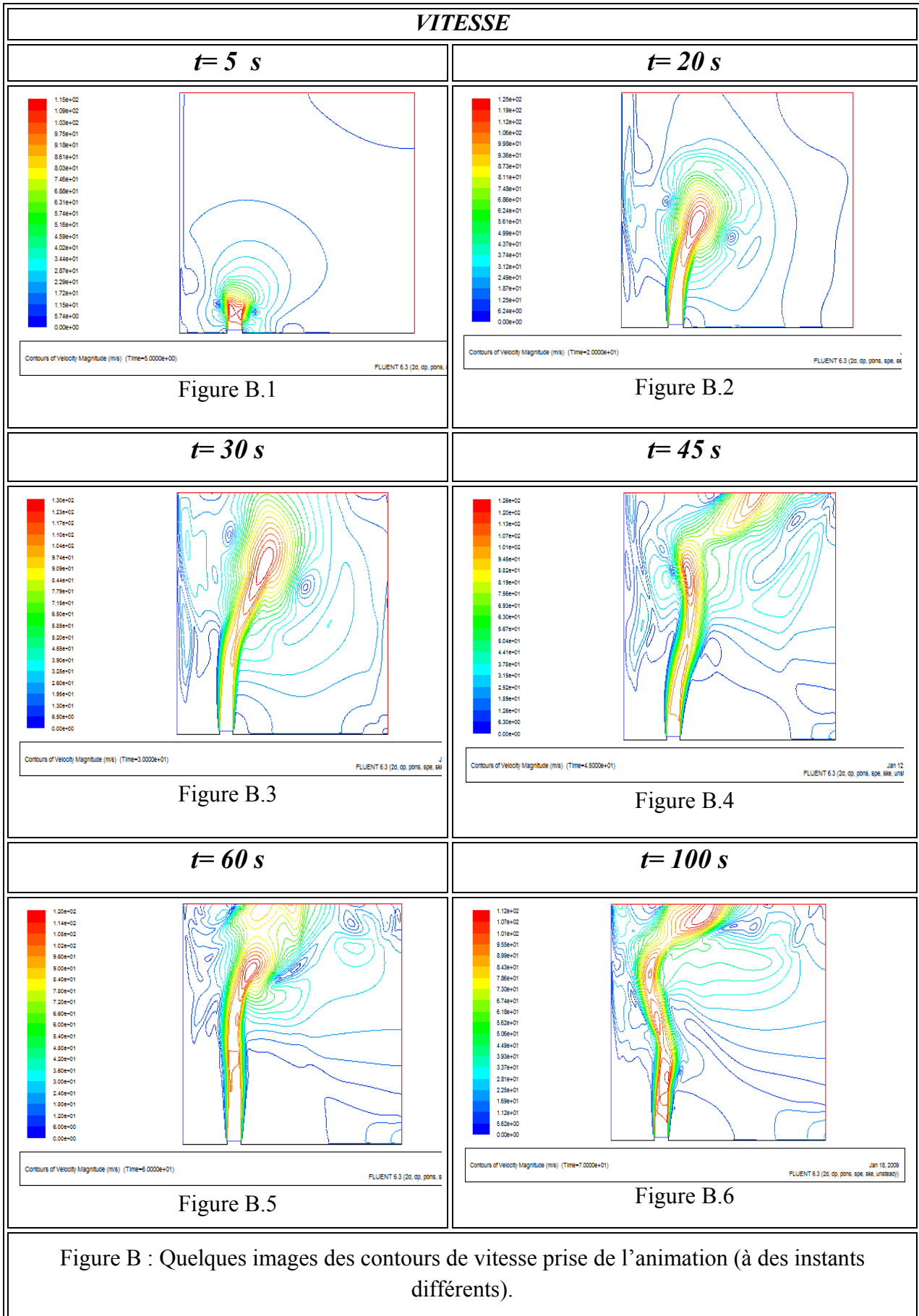
L'épaisseur de la couche chaude en rouge et orange basée sur le profil de température a légèrement émincée avec le temps pour former une boule de feu ; c'est le moment de la formation du Boilover ($t= 50$ a 60 s) (Medrharhet, 2008), cette couche se décolore du rouge vif $T \geq 690^\circ\text{K}$ du $t= 5$ s jusqu'à $t= 50$ s au couleur orangée après les 60s, c'est a dire après la formation de la boule du feu ou le phénomène du Boilover s'est achevé et l'incendie persiste au niveau du bac jusqu'à la consommation totale du combustible ; cette étape ne peut pas être observer dans ces simulations puisque le code FLUENT considère que la source du Butane est permanente d'où la flamme ne va pas s'éteindre. Ce qui présente un inconvénient dans le cas de l'utilisation de ce code.

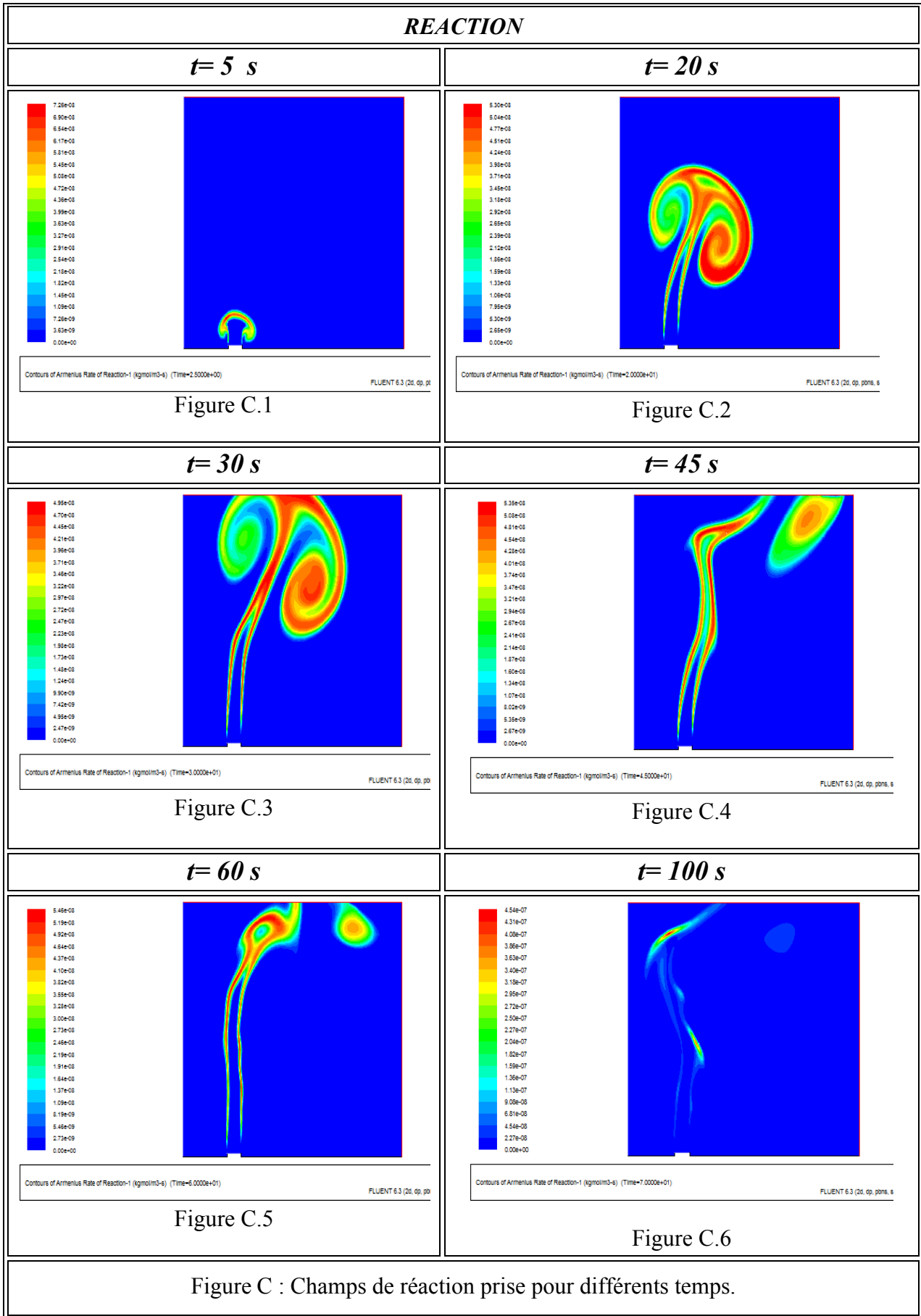
Les différentes zones qu'on peut observer sont principalement :

- Une zone chaude (rouge-orangée) correspondant à la base du feu avec une température entre 690°K et 560°K . C'est dans cette zone qu'a eu lieu la combustion du Butane, dont les réactions en phase gazeuse sont très exothermiques. L'écoulement réactif reste ici peu affecté par les effets aérothermiques de l'air environnant ;
- Une zone intermédiaire (jaune-vert), de plus faibles températures car plus éloignée de la surface de combustion du Butane avec des variations de températures entre 550°K et 460°K . Cette zone est un peu plus affectée par les effets aérothermiques de l'air environnant ;
- Une zone (bleu clair) de mélange avec l'air ambiant qui correspond au panache du feu. La température chute ici rapidement pour atteindre les 450°K à 370°K et l'image laisse apparaitre des structures tourbillonnaires caractéristiques d'un écoulement turbulent.

A. Champs de vitesse et de réaction

Parmi les résultats obtenus dans cette étude, on présente ci-dessous les profils radiaux de vitesse et de réaction à la sortie du bac. Les figure B.1, B.2,..., B.6 montre les profils de vitesse axiale de simulation au moyen du code « FLUENT » pour les temps $t= 5$ s, 20 s, 30 s, 45 s, 60 s, 70s et de même pour les simulation qui concernent la vitesse de réaction.





Les résultats de la simulation présentés sur les figures B.1, B.2,..., B.6 et les figures C.1, C.2,..., C.6 montrent quantitativement les profils radiaux de vitesse moyenne et les champs de réactions à différentes hauteurs et à différents temps. Les figures B.1, B.2,..., B.6 montrent tout d'abord que l'allure des profils semble correctement estimée (Medrharhet, 2008). En particulier, les figures B.1, B.2, C.1, C.2 et C.3 montrent que, près de la sortie du bac, la simulation reproduit bien l'existence d'une couronne de gaz en réaction exothermique s'élevant très rapidement vers l'atmosphère.

Les ordres de grandeur de la vitesse axiale sont globalement en bon accord avec les mesures (Medrharhet, 2008). On peut souligner toutefois que la vitesse ascensionnelle est légèrement sous-estimée lorsque l'on s'éloigne du foyer de l'incendie (Figure B.5 et B.6).

L'allure du profil de la vitesse entre $t=5s$ et $t=20s$ (Figure B.1 et B.2) est très peu influencée par le vent, puisque la vitesse de la flamme $V \approx 360$ m/s est fortement dominante à ce niveau, mais avec l'évolution de l'incendie et l'éloignement du foyer de l'incendie, la vitesse des réactions et l'énergie dégagée diminue avec le temps, les flammes prennent de l'altitude ainsi que les forces de gravité diminuent et l'atmosphère sera influencé par les vents dominants et cela va influencer l'allure de la flamme d'où on observe son penchement vers la droite (Figure B.4, B.5 et B.6).

En ce qui concerne les figures C.1, C.2,..., C.6, on remarque que le taux de réaction augmente sur les extrémités de la flamme ou il y a un mélange équilibré entre combustible et comburant ce qui favorise la combustion qui est une réaction exothermique, ce phénomène atteint son top à $t=30s$, après il y a une dégradation de la vitesse de la réaction jusqu'à la consommation totale du combustible et ainsi l'étouffement du feu.

B. Concentrations des espèces chimiques

L'ensemble des simulations présentées dans les figures (D, E, F..., L) comprennent aussi l'estimation de la concentration et les fractions de concentration de la plus part des polluants présents lors de l'incendie (CO_2 , SO , SO_2 , SO_3 , SH , NO , HCN , NH_3) à pression atmosphérique et à une température ambiante située entre 25 et 30 °C et à une vitesse de vent quasiment nulle au niveau du sol.

ESPECES CHIMIQUES (POLLUANTS)

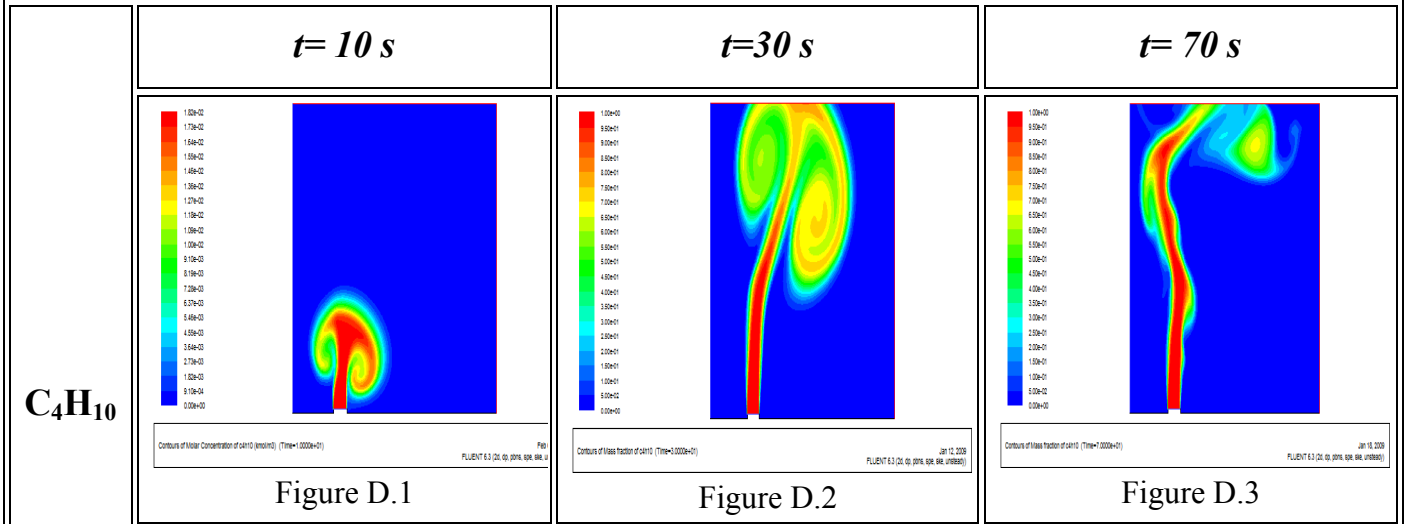


Figure D : Evolution de la concentration du C₄H₁₀ dans le temps.

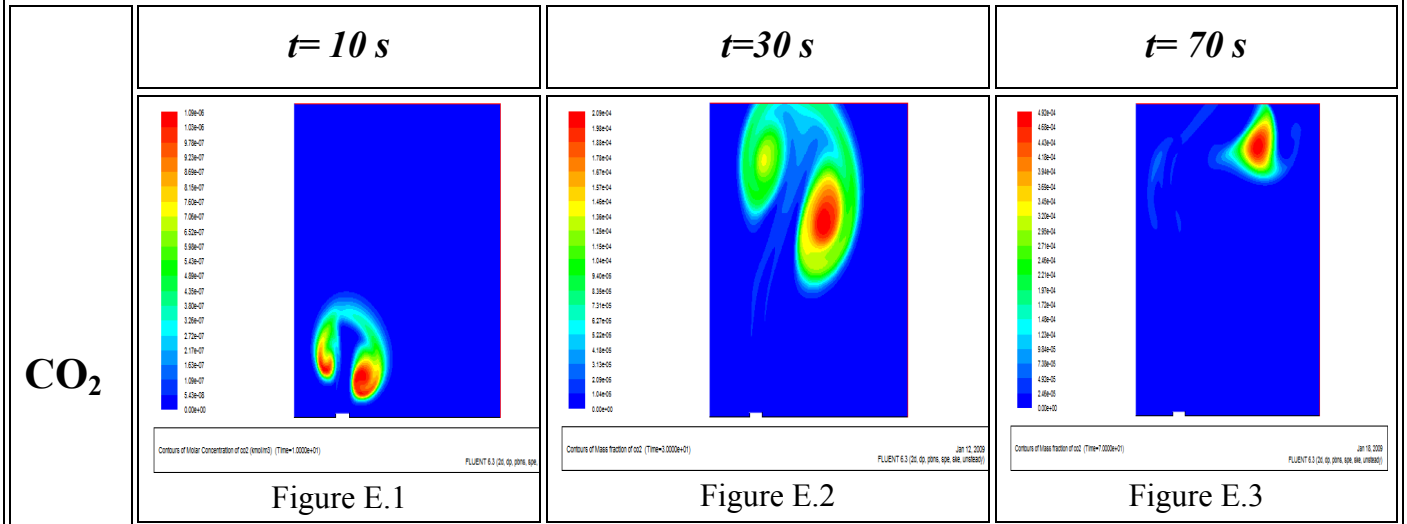


Figure E : Evolution de la concentration du CO₂ dans le temps.

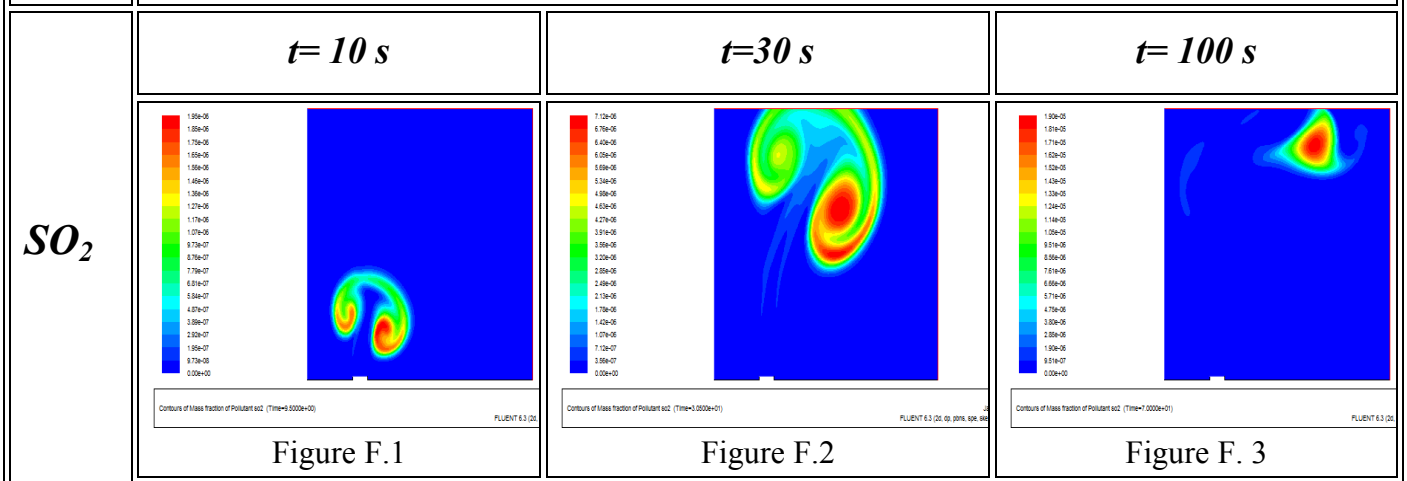


Figure F : Evolution de la concentration du SO₂ dans le temps.

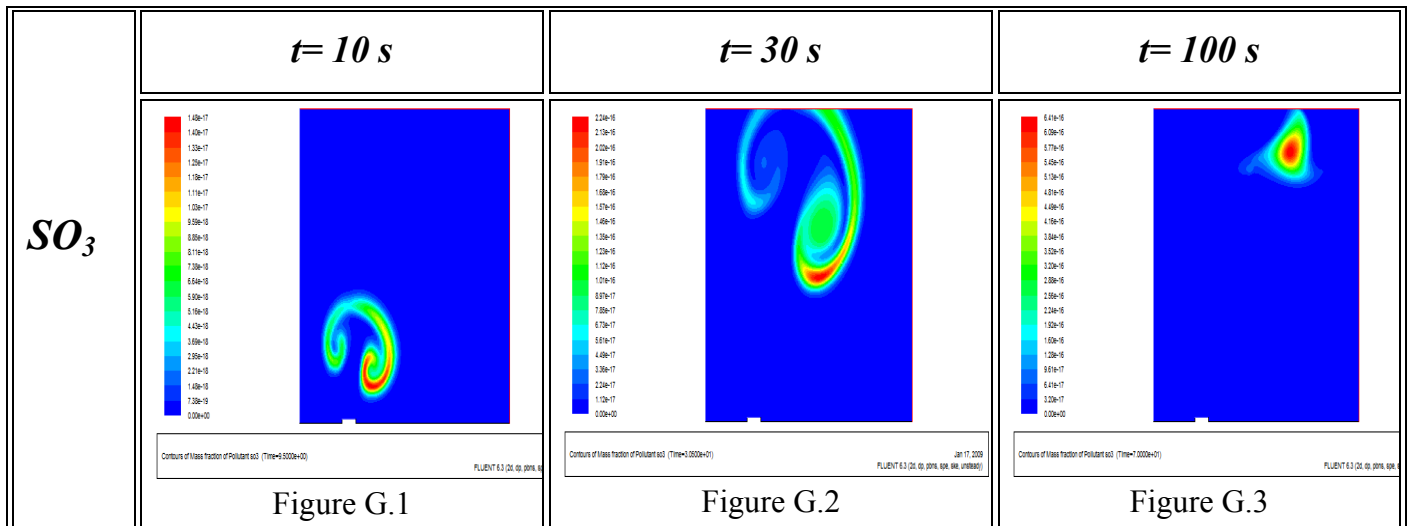


Figure G : Evolution de la concentration du SO₃ dans le temps.

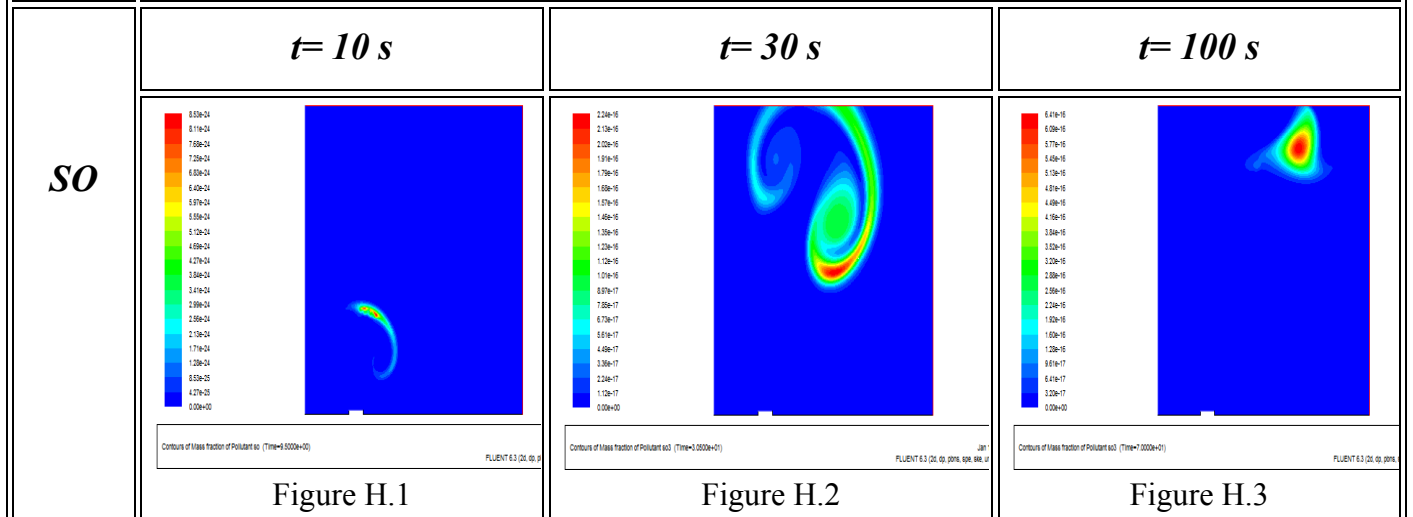


Figure H : Evolution de la concentration du SO dans le temps.

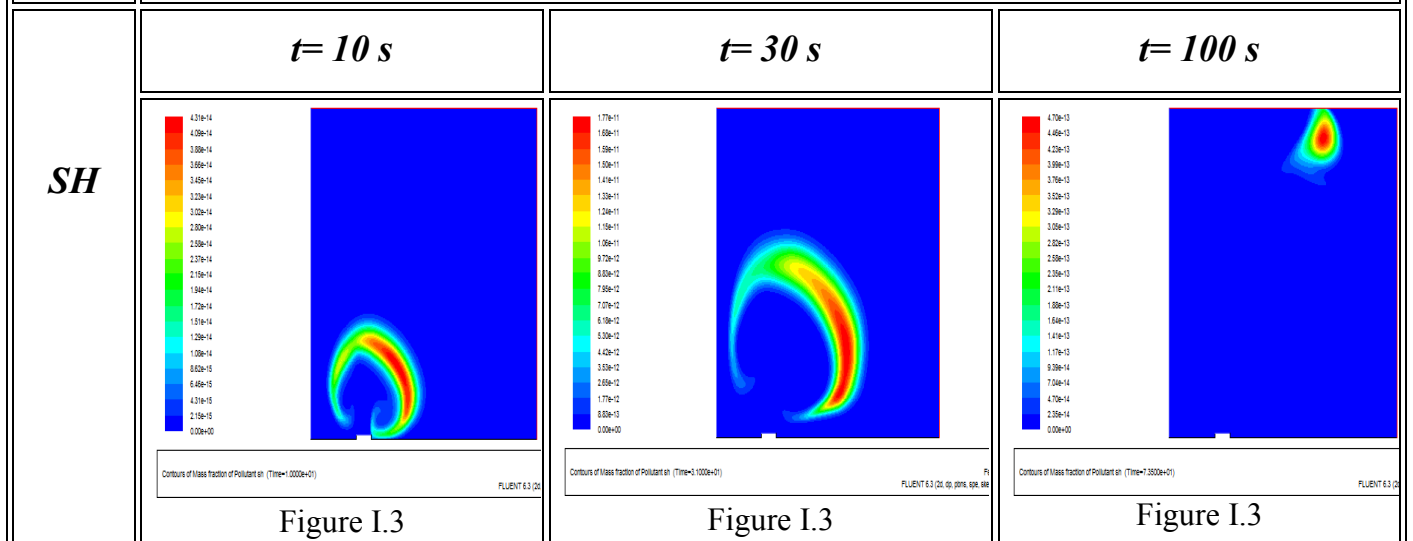


Figure I : Evolution de la concentration du SH dans le temps.

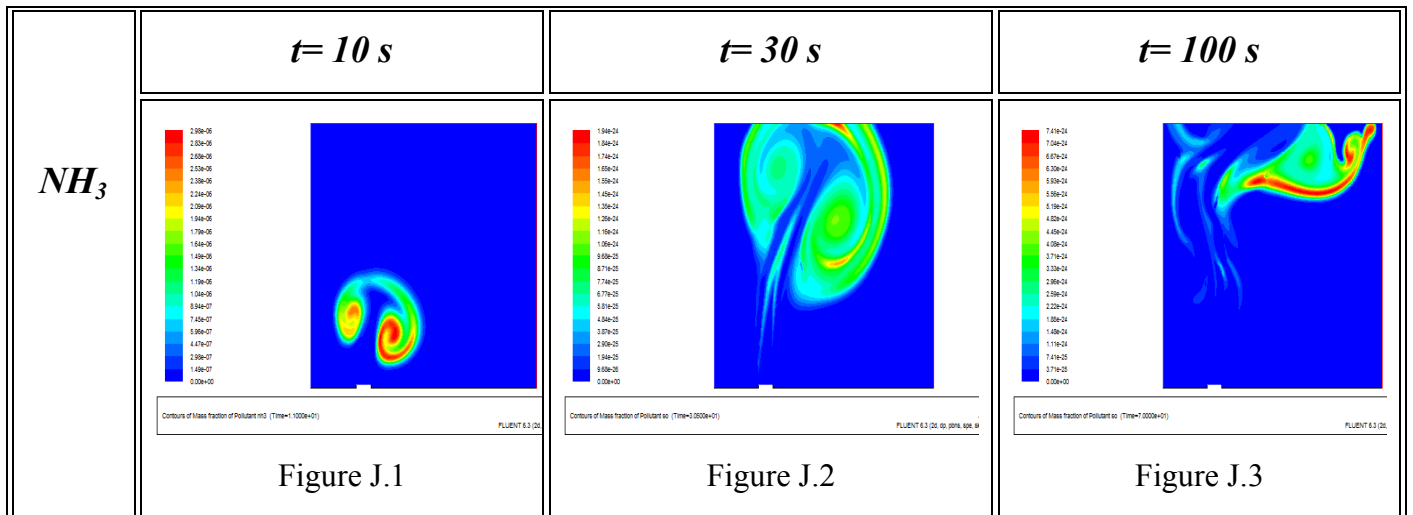


Figure J : Evolution de la concentration du NH₃ dans le temps.

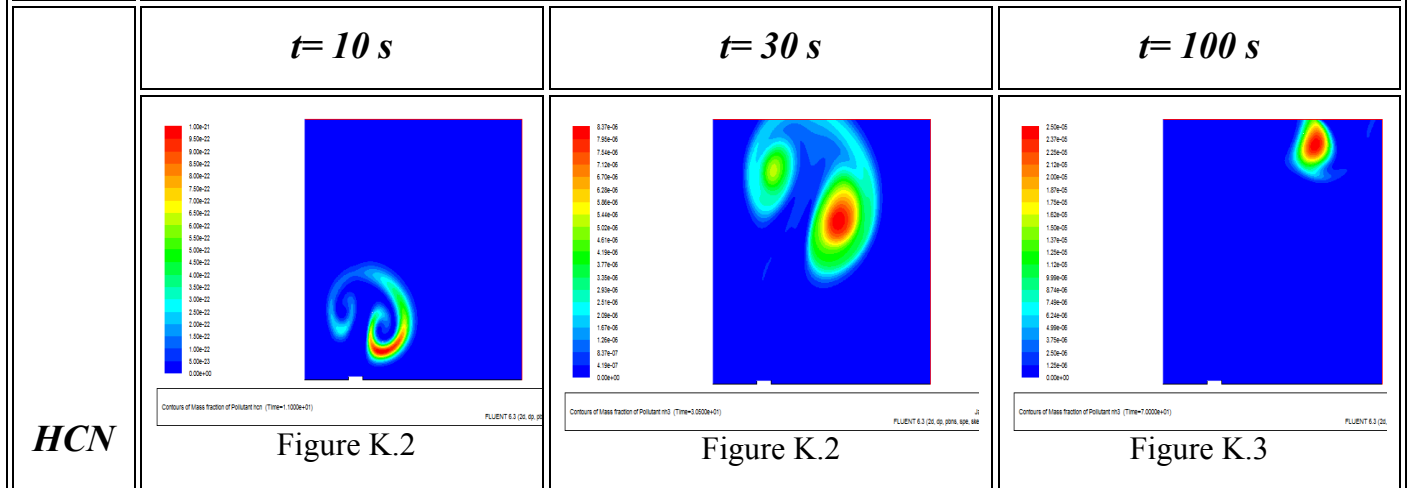


Figure K : Evolution de la concentration du HCN dans le temps.

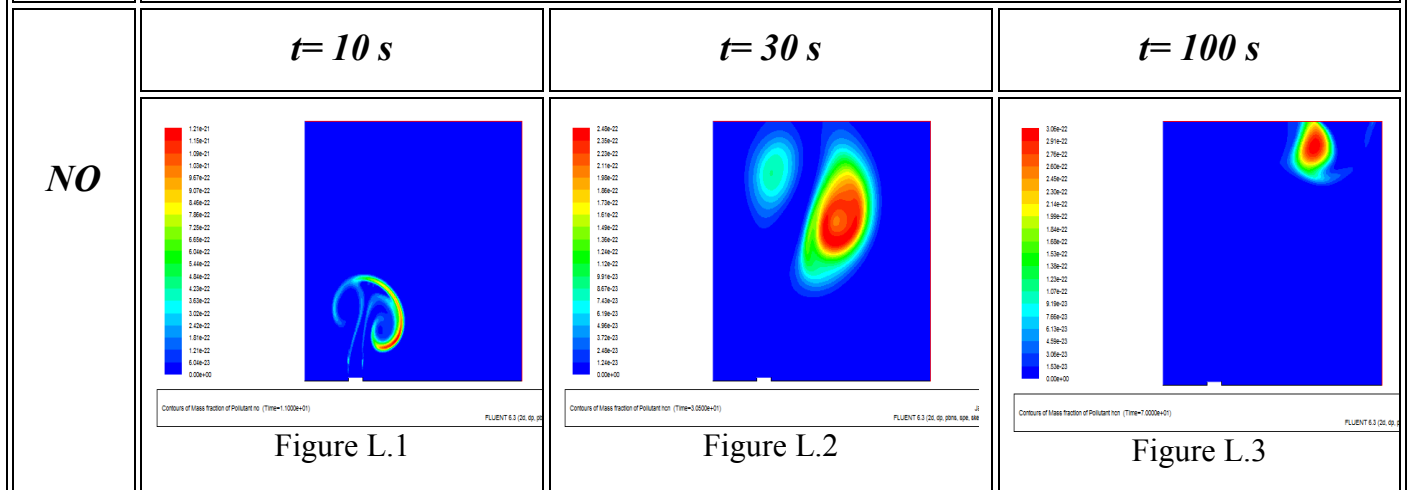
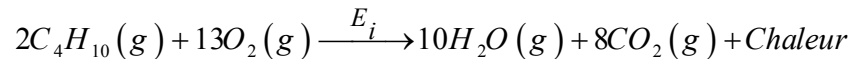


Figure L : Evolution de la concentration du NO dans le temps.

Pour la plupart des incendies, les gaz issus de la combustion sont : CO_2 , H_2O , NO_x , SO_x , CO et le fuel non brûlé qui est dans notre cas le C_4H_{10} dans le cas où la combustion n'est pas complète.

La réaction globale de combustion dans ce cas est :



- Les figures D.1, D.2, ..., D.6 présentent les concentrations du butane dans l'atmosphère, l'ordre maximal de concentration est de $1.82 \times 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$, sachant que sa concentration naturelle dans l'atmosphère est presque nulle, cette évolution est due uniquement au transport du fuel non brûlé.

- Concernant les profils du CO_2 (Figures E), qui est un produit essentiel de la combustion, on peut remarquer que les concentrations les plus élevées se situent au niveau de la couronne où il y a une grande vitesse de réaction d'où un grand dégagement du CO_2 (Figure E.1 et E.2).

- Pour les composés SO_x , en se référant aux figures G, H, I, et le taux de concentration de chaque élément ; SO , SO_2 , SO_3 , on peut déduire que l'élément SO_2 est le composé soufré le plus dégagé par l'incendie, cette déduction est basée sur son fraction de concentration qui a pu atteindre $1,95 \times 10^{-6}$, alors que les autres composés soufrés n'ont pas dépassés :

$$\text{SO} = 8,53 \times 10^{-24}$$

$$\text{SO}_3 = 1,48 \times 10^{-17}$$

$$\text{SH} = 4,31 \times 10^{-14}$$

- Les figures L.1, L.2, L.3 représentent l'évolution des profils de concentration de NO en fonction du temps, combustion dégage presque exclusivement du NO , seule une faible part (< 10 %) s'oxyde à l'intérieur du foyer du feu pour former du NO_2 . Le reste du NO ne s'oxyde que dans l'atmosphère, pour former du NO_x , ce qui entraîne la formation d'acide nitrique.

IV.2.3 Modélisation par le logiciel ALOHA

La libération accidentelle de gaz toxique constitue un des scénarios d'accident les plus répandus. Des quantités significatives de produits rejetées peuvent entraîner la formation de nuages dangereux pour les personnes et pour l'environnement. La propagation de ces nuages dans l'atmosphère est un phénomène extrêmement complexe régi par de nombreuses variables. L'étude de la dispersion atmosphérique des nuages de gaz, afin de modéliser les conséquences et donc d'estimer les périmètres de sécurité, fait appel à des logiciels de simulation.

Pour compléter notre analyse de ce cas d'étude (accident du terminal de Skikda, 4 octobre 2005), Il existe de nombreux logiciels qui permettent de modéliser la dispersion dans l'atmosphère de divers produits chimiques et d'estimer leurs concentrations à différentes distances de la source de rejet. Certains d'entre eux s'adressent plus particulièrement aux situations d'urgence. Nous avons choisi d'utiliser parmi ceux-ci le modèle ALOHA en raison de sa facilité d'utilisation, de la possibilité de contrôler plusieurs variables et de la possibilité de l'obtenir gratuitement auprès d'EPA.

Le logiciel ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) est un modèle de type intégral qui permet de résoudre les équations pour un grand nombre de produits chimiques. Sa base de données sur les substances chimiques contient des renseignements sur les propriétés chimiques d'environ 1000 produits parmi les plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents chimiques.

IV.2.3.1 Conditions aux limites

Après avoir déterminé la localisation et le temps, on passe à la nature chimique du produit rejeté et l'état météorologique au jour de l'accident. Le scénario normalisé d'accident implique une perte totale de fuel (Butane C_4H_{10}), sous des conditions de vitesse de vent de 3m/s, et une stabilité atmosphérique de classe C, la modélisation en milieu rurale (*open country*). On assume également que la température extérieure est de 27°C avec un taux d'humidité de 75 %. Le scénario évalué tient compte uniquement des mesures de mitigation passives, les autres mesures d'atténuation du risque ou de prévention étant ignorées à cette étape.

Le logiciel ALOHA tient compte aussi des inégalités ou de la rugosité du sol. On considère généralement que plus la rugosité du sol est élevée (présence d'arbres, de maisons, d'industries, etc.) plus il y aura de turbulence et plus rapidement les gaz seront dilués dans l'air. Les concentrations dans l'air à diverses distances du déversement devraient être plus faibles. On retrouve deux classes de rugosité standardisées dans le logiciel. La première, nommée « Urban or Forest » tient compte de la présence de bâtiments ou de forêts qui correspond à une rugosité de 100 et l'autre nommée « Open country » correspond à une rugosité de 3 et représente la rugosité d'un sol plus dénudé observé généralement en zone rurale.

Ces résultats sont principalement des représentations bidimensionnelles, prises suivant les deux axes principaux (un plan YZ passant en $X = 1000$ m et un autre XZ passant en $Y = 1000$ m).

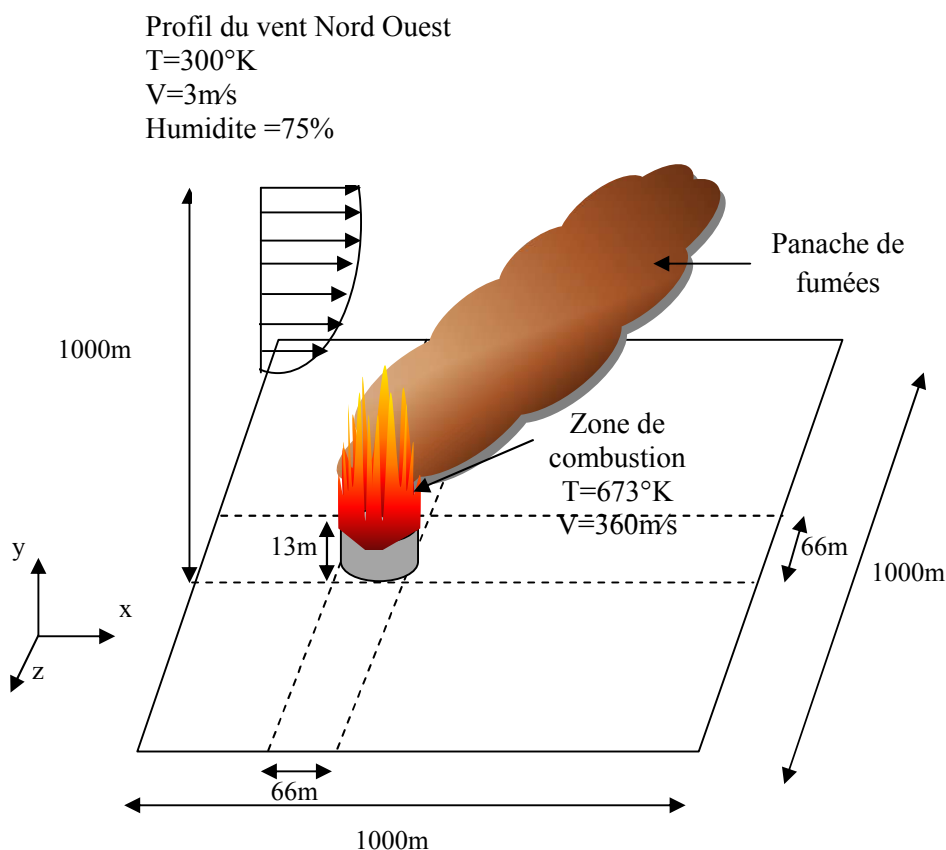


Figure IV.30 : Représentation schématique du problème, du domaine de calcul et du système des coordonnées utilisées dans la simulation.

La simulation faite par le code ALOHA doit commencer par la détermination exacte de l'endroit du rejet, soit en le choisissant à partir de la liste fournie par le code lui-même ou en donnant ses coordonnées (latitude et longitude et altitude), dans notre cas, le terminal de Skikda se situe à une hauteur de 00m de la mer et à 36° et $56'$ au nord et 6° et $57'$ à l'est.

La stabilité atmosphérique joue aussi un rôle très important sur la dispersion d'un produit chimique. La classe A indique que l'atmosphère est très instable, tandis que la classe F, au contraire, est associée à une très grande stabilité et souvent à une inversion de la température (la température augmente avec l'altitude au lieu de diminuer) qu'on observe souvent la nuit. La classe C (moyenne stabilité atmosphérique et faibles vents) fait en sorte de diminuer un peu le pouvoir de dispersion de l'atmosphère, ce qui a pour effet de générer des concentrations de produits chimiques moyennement élevées au niveau du sol et des zones d'impact plus grandes.

L'étape qui suit est la détermination du type de la source du rejet, à ce niveau on trouve quatre possibilités :

- Direct : directe ;
- Puddle ;

- Tank : réservoir ;
- Gas pipeline : gaz du pipe-line

Dans notre cas on a choisis réservoir, après cette sélection, on doit fournir les caractéristiques du réservoir (un réservoir cylindrique de 66m de diamètre et 13 m de hauteur), on doit aussi déterminer la nature du fuel retenu ; gaz liquide ou mélange, ainsi que sa température, et le volume qu'il occupe lors de l'accident, dans notre cas il présentât 70% du réservoir.

Dans l'étape suivante, on doit déterminer le scénario de l'accident : un jet des substances non brules, brules ou un phénomène de BLEVE.

IV.2.3.2 Résultats et discussions

Les résultats obtenus donnent une idée de l'étendue potentielle des impacts et ne doivent être utilisés qu'à titre indicatif dans un contexte de situation d'urgence.

Évidemment, ces résultats ne s'appliquent qu'à la situation théorique définie par les paramètres que nous avons choisis. Les résultats des diverses modélisations à partir du scénario de l'accident qu'on a décrit plus haut sont présentés ci-dessous :

- Les zones d'impact calculées en fonction des valeurs de référence toxicologiques (TEEL1, TEEL2 et TEEL 3);
- Le déplacement du nuage toxique en fonction du temps.

Pour illustrer ces résultats, on a utilisé comme exemple divers relâchements impliquant du Butane.

A. Modélisation du gaz évaporé avant l'accident

Le témoignage du gardien DSP du terminal a formellement identifié le bac S106 comme étant la source du nuage de gaz, étant donné qu'il a vu, après l'ignition, un retour de flamme vers le haut du bac. Le bac était en cours de remplissage et plein à environ 70%. Le remplissage avait commencé la veille à 21h40 et s'effectuait à un débit de 2400 m³/hr.

Les bacs à toit flottant ne sont pas conçus pour contenir autant de gaz et après que le gaz se soit évaporé, les conditions étaient telles qu'un nuage s'est accumulé côté sud-est du bac, au niveau de la route. Des estimations indiquent qu'un débit de gaz entre 1 et 4kg/s s'évapore lors du remplissage. Ce matin-là, le gardien a affirmé qu'il n'y avait quasiment pas de vent. Des calculs de dispersion du gaz ont été effectués en utilisant le logiciel ALOHA et il apparaît clairement qu'avec des conditions de vent très faible, le gaz ne se serait pas dispersé et se serait accumulé au niveau du sol.

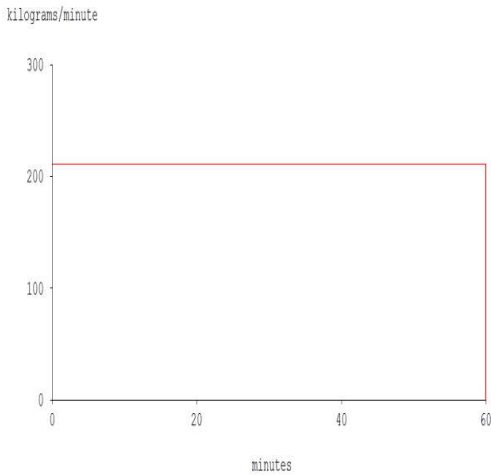


Figure IV.31 : Le débit de la source du rejet du à la fuite pendant une durée ne dépassant pas 60 minutes.

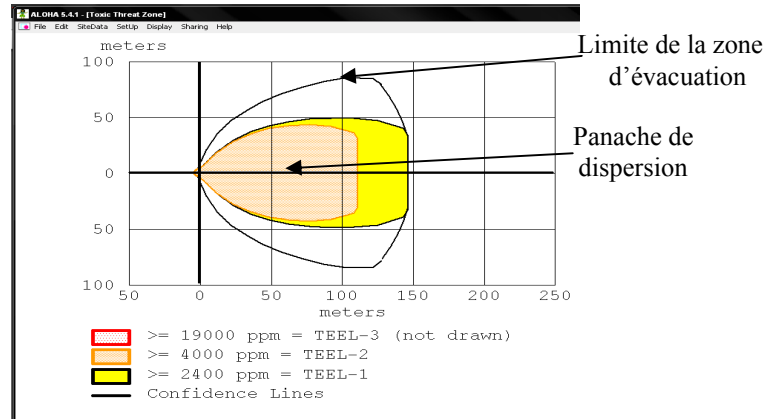


Figure IV.32 : Concentration du polluant en ppm dans les régions touchées

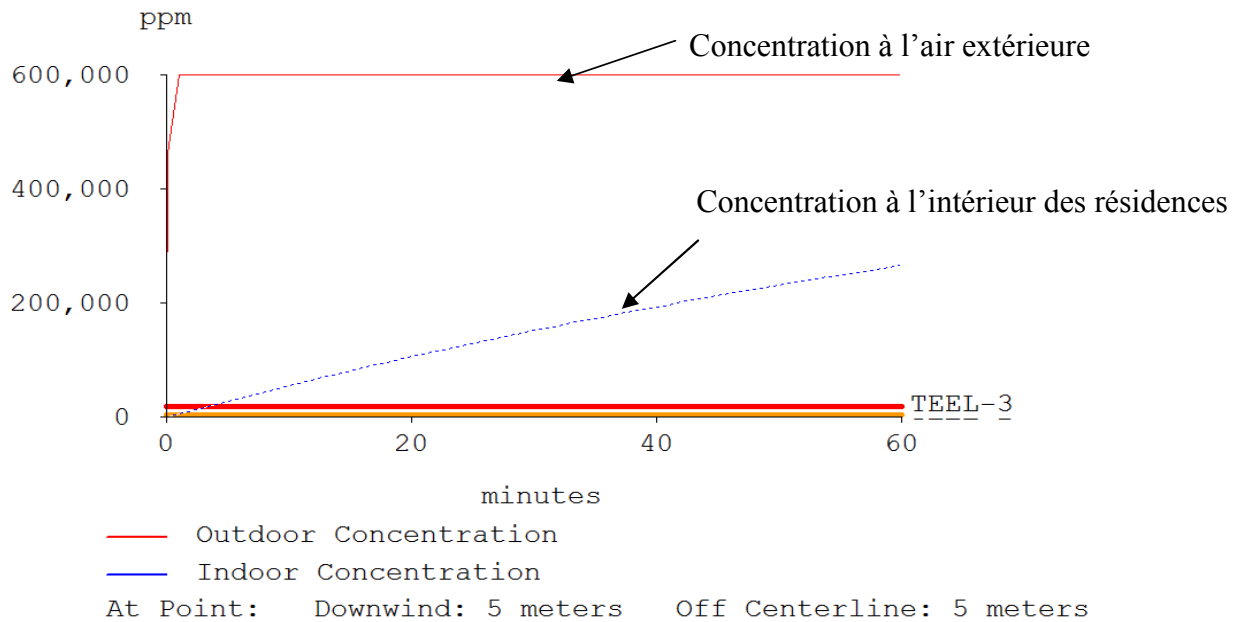


Figure IV.33 : Concentration du polluant au point (5m, 5m).

Dans la figure IV.32 ALOHA simule les trois zones menacées par la dispersion du gaz. ALOHA estime que la zone en orange qui occupe environ 110m en aval, les valeurs de cette menace et les distances sont affichée sur la figure IV.32.

B. Modélisation après l'accident

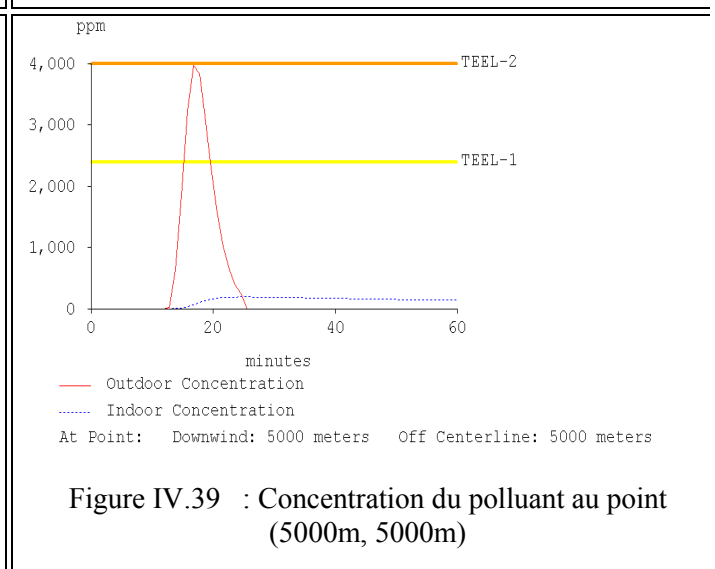
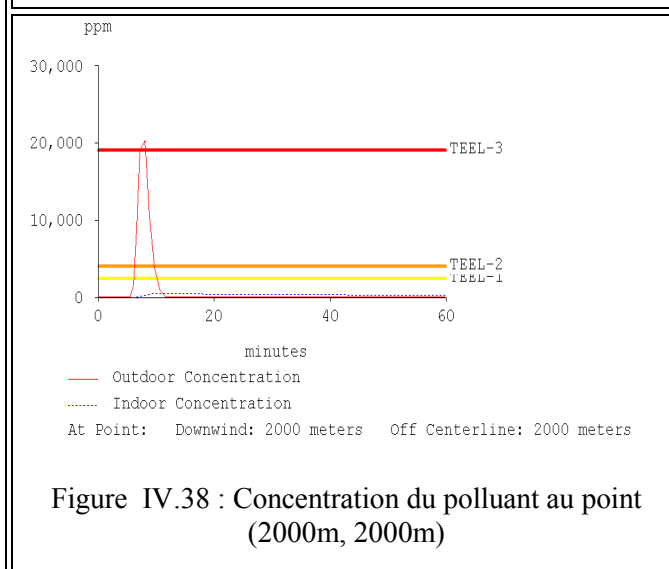
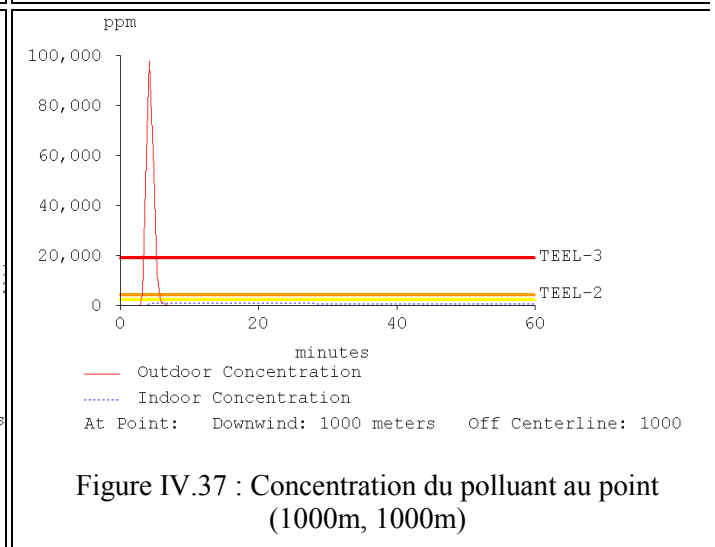
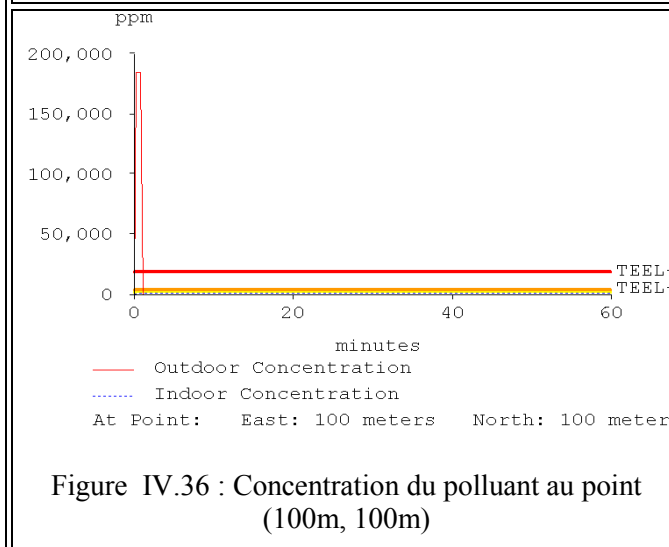
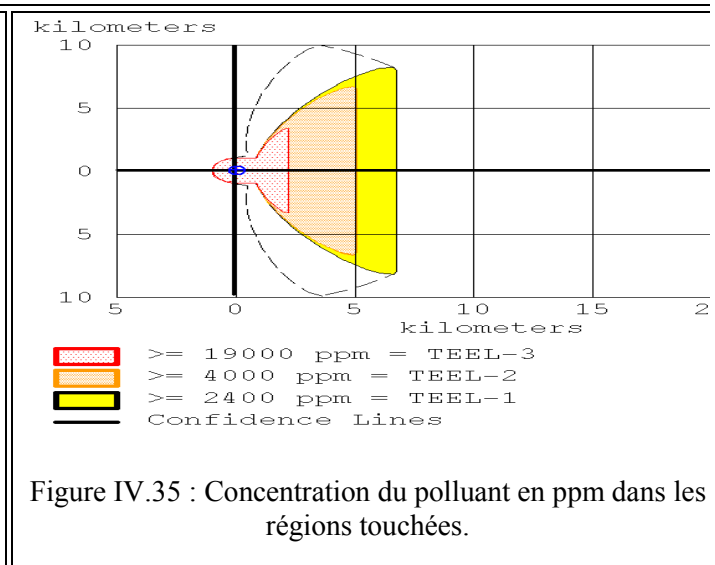
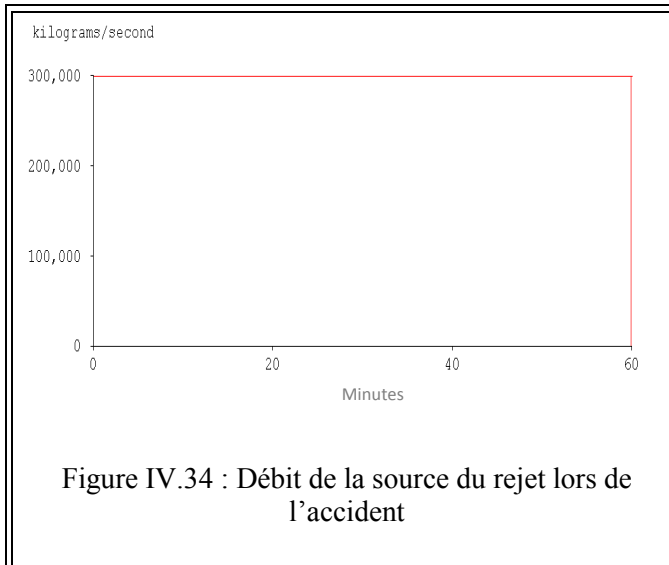
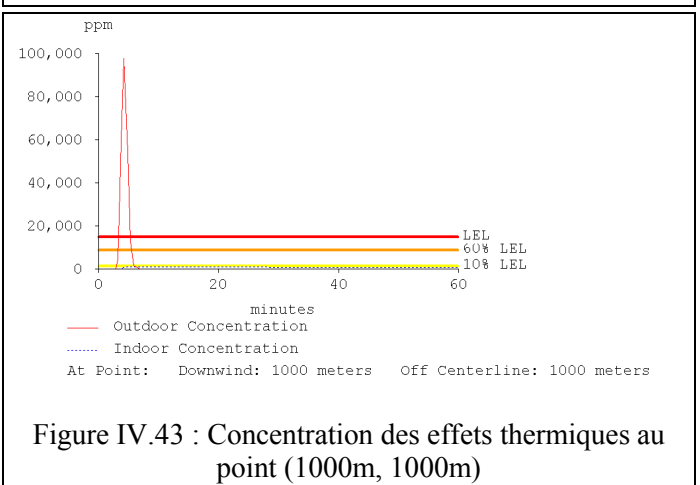
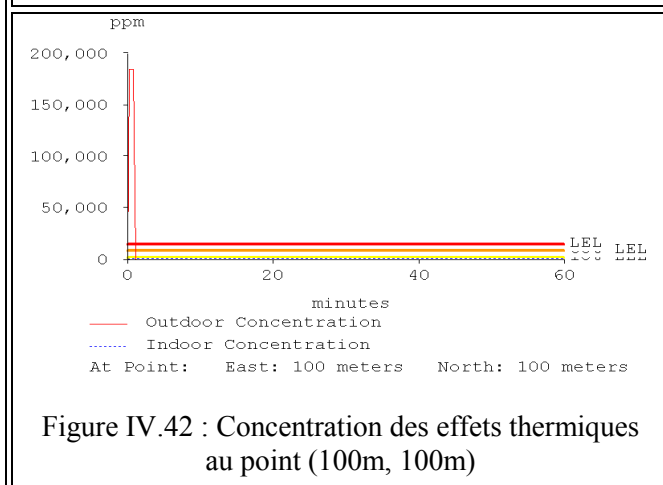
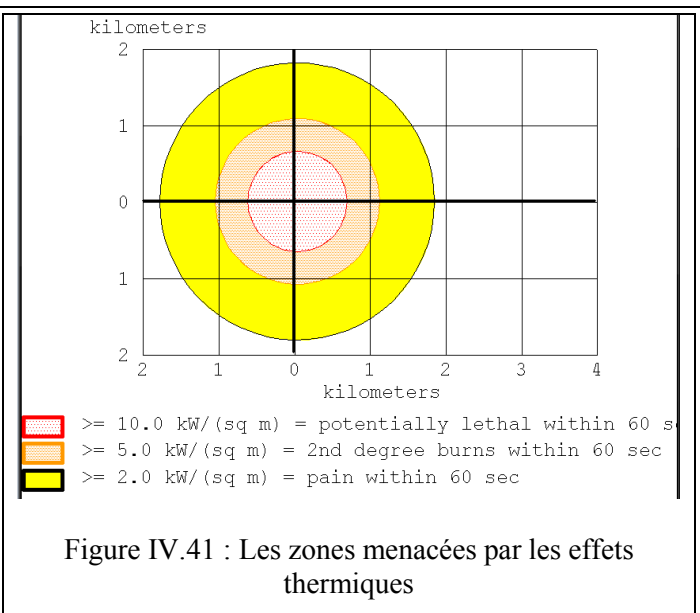
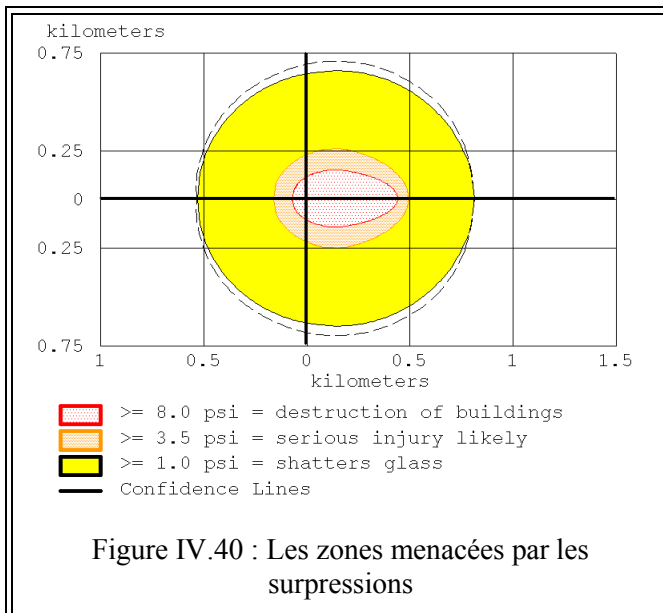


Tableau III.1 : Modélisation de la dispersion des polluants

Le tableau IV.1 présente les zones menacées par la pollution due au butane qui peut atteindre une concentration maximale de 19000ppm sur une distance de 2000 m de la source, puis diminuer à 4000 ppm sur une distance de 5000 m pour atteindre les 2400ppm sur les deux kilomètres qui suivent (Figure IV.35).

Les figures IV. 36, 37...,39 illustrent le déplacement du nuage suite à un relâchement accidentel. Il présente les concentrations estimées de Butane (en ppm) dans l'air extérieur en fonction du temps (de 1 à 60 minutes). Pour cet exemple, le déversement se fait de façon continue pendant une période non déterminé par ALOHA (puisqu'elle dépasse les 60 minutes) avec un débit de 300000 kg par minute.

On peut voir qu'après la 5^{ème} minute, que le butane peut être détecté à une distance de 1000 mètres du point de relâchement, le nuage s'étend jusqu'à une distance de 2000 après 10 minutes, avec un taux de 20000 ppm, pour atteindre une concentration de 4000ppm a une distance de 5000m et cela après 20 minutes.



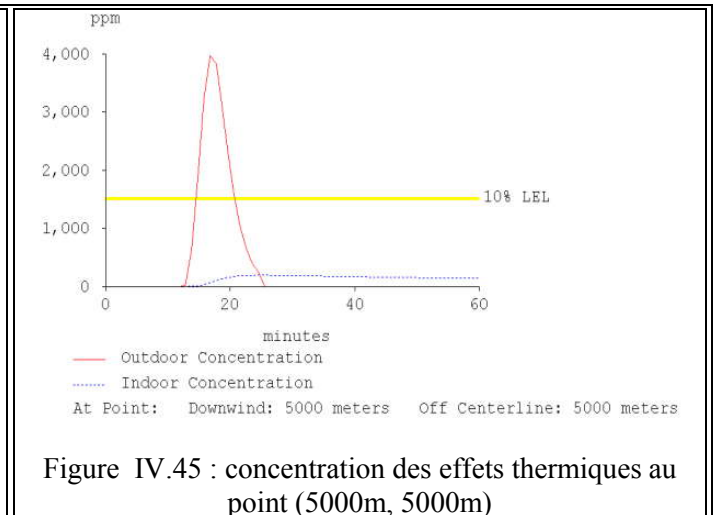
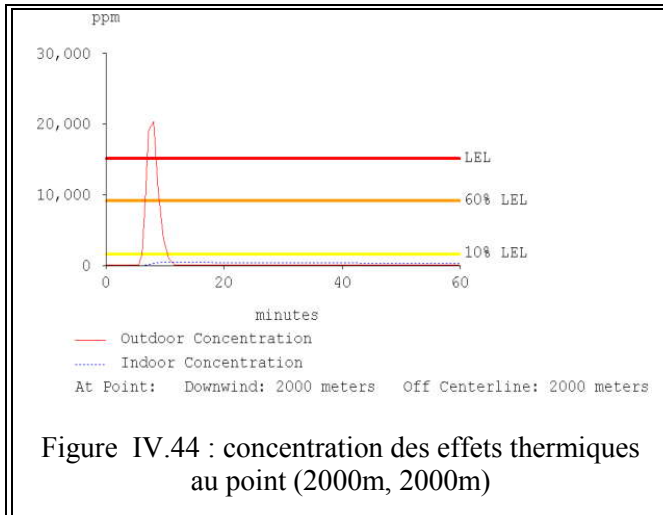


Tableau IV.2 : Modélisation des effets thermiques

Le tableau IV.2 modélise les menaces thermiques sur les régions avoisinantes, la figure IV.40 illustre les différentes régions à des différents niveaux de surpression due à l'onde de pression du phénomène de Boilover, cette surpression a atteint 8psi sur un périmètre de 200 m (zone rouge) ce qui a provoqué la destruction des constructions de cette zone. Une zone orange où la surpression atteint 3.5 psi, cette zone est caractérisée par des atteintes sérieuses au niveau des biens. Alors que la zone jaune avait un taux de surpression égale à 1psi et à ce niveau les atteintes se limitent aux destructions des verres.

Le tableau suivant nous permet de faire une comparaison entre les résultats des simulations de la dispersion du polluant et les effets thermiques (figure IV.35, figure IV.41) :

scenario	Dispersion des polluants	Radiation thermiques
Menace modélisée	Toxicité	Effets thermique
Zone menacée de couleur rouge	2500m	500 m
Zone menacée de couleur orange	5000 m	1100 m
Zone menacée de couleur jaune	6800 m	1800 m

Tableau IV.3 : Comparaison entre les résultats de la modélisation thermique et la dispersion des polluants.

ALOHA estime que la zone toxique en rouge présente le niveau de risque le plus élevé, elle s'étend principalement dans la direction de vent d'environ 2500 m, alors que la zone représentant les effets radiatifs se prolonge d'environ 500 mètres dans toutes les directions (diamètre de la boule de feu qui est à son top après 60 secondes) et un peu plus loin en aval. Cela nous permet de conclure que le vent joue un rôle dans les deux scénarios.

La menace toxique se limite principalement à la région en aval de la sortie, et même si la menace rayonnement thermique se produit dans toutes les directions, il est trop décalé en aval du jet.

IV.3 Conclusion

Les outils numériques utilisés dans le cadre du présent travail ont été présentés dans ce chapitre, en faisant référence aux modèles classiquement employés par ces derniers décrits à leurs tours dans le deuxième chapitre. Ceci a permis de situer les codes FLUENT et ALOHA en montrant leurs points forts, leurs faiblesses, et ce qui fait leurs originalités.

Ce chapitre est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats des différentes simulations numériques effectuées par les codes FLUENT et ALOHA afin de modéliser le phénomène du Boilover qui a eu le 5 octobre 2005 à la raffinerie de Skikda.

Tout d'abord, un logiciel CFD de transferts thermiques nous a permis de prédire l'apport thermique du feu à l'incendie. Ainsi que les concentrations de différents polluants présents lors de l'incendie tel que CO_2 , NO_x , SO_x , fuel non brûlé C_4H_{10} ...

Les concepteurs de ce code ont cherché à mettre à la disposition des utilisateurs un outil numérique à la fois robuste et rapide. C'est la raison pour laquelle les modèles employés sont généralement simples et peu coûteux. Cette démarche pour la simulation numérique correspond au niveau de précision actuellement attendu par les utilisateurs pour traiter des problèmes d'ingénierie de la sécurité contre l'incendie. Le fait de fournir les sources permet en outre de faire de ce code un outil précieux servant de base pour la recherche sur la simulation numérique du feu. Chacun peut ainsi travailler sur des développements spécifiques sans passer du temps à développer son propre solveur des équations de Navier Stokes.

Ce type de modélisation nous permet de prendre en compte tous les paramètres du problème, mais en revanche il y a quelques problèmes qu'on a rencontrés lors de son application. Parmi ses problèmes c'est la limitation de la quantité de fuel qui rentre en réaction, à ce niveau FLUENT considère que la source est continue alors qu'en réalité ce n'est pas le cas. En outre, malgré les progrès de l'informatique, les temps de calcul nécessaires à la réalisation de telles simulations restent rédhibitoires en raison de la taille des domaines physiques considérés. Simuler quelques minutes d'incendie peut, selon la complexité des modélisations retenues, nécessiter plusieurs jours de calcul, même sur une station de travail puissante.

En plus on a pu remarquer que les profils de température schématisés sur les figures A.1, A.2..., A.6 montre que le modèle PDF utilisé dans FLUENT donne des températures supérieures aux températures réelles obtenues, cette anomalie revient principalement aux conditions aux limites choisies ainsi qu'au combustible utilisé dans la simulation (Butane au lieu du brut léger). Pour les profils de vitesse au niveau de bac (figures B.1, B.2, ..., B.6), FLUENT donne une valeur de la vitesse maximale atteinte très proche des valeurs observées.

Le deuxième outil de simulation numérique qu'on a utilisé est le code ALOHA. Parmi les simulations effectuées par ALOHA on a le calcul de la décroissance du débit de rejet au cours du temps (quelque soit le type de source : réservoir, longue conduite, flaque), puis

moyenne la valeur sur des pas de temps 60 minute. Le logiciel permet la visualisation de la décroissance du débit par pas de temps de moyenne d'une minute a une heure. Les valeurs de débit maximum du rejet estimées, sur la première minute, par ALOHA est de 300000 kg/mn pour une masse rejetée finale de 17000000kg.

Ce logiciel estime la concentration du polluant jusqu'à des distances maximales de 10 km de la source du rejet et ce pendant une durée ne dépassant pas 60 minutes. Il est important de mentionner qu'à partir de distances de plus de 10 km ou d'une durée de temps de plus de 60 minutes, les résultats deviennent de plus en plus incertains en raison des conditions qui peuvent varier (ex. : stabilité atmosphérique, vitesse du vent, rugosité des surfaces). Ce modèle ne peut être utilisé lors des incidents impliquant des produits radioactifs ou pour modéliser des émissions atmosphériques continues. Il ne peut tenir compte des produits de dégradation suite à un incendie ou des réactions chimiques, des particules ou des produits chimiques en solution ou des mélanges de produits chimiques. Le logiciel ALOHA ne donne pas d'informations supplémentaires sur les caractéristiques du débit (fraction liquide,...).

En utilisant cet outil on a constaté que les résultats de la simulation sont dépendants d'un très grand nombre de paramètres de modélisation ajustables. L'accès libre à ces paramètres est un des avantages de ce logiciel. Cependant, on constate que les résultats produits peuvent être très sensibles aux valeurs fournies de ces paramètres voire à certains détails du scénario accidentel étudié. Or, même si l'utilisateur est expert, sa connaissance des valeurs et leur impact sur la modélisation du phénomène présente souvent une certaine incertitude. Ne pas maîtriser l'effet de ces incertitudes peut donc décrédibiliser les calculs des rayons de danger issus des études.

Les résultats finaux sont exprimés par l'empreinte au sol du panache des niveaux de concentrations. Le logiciel est peu convivial du point de vue de l'affichage des doses reçues, et de la vérification de la cohérence de celles-ci avec les concentrations. En effet l'utilisateur a accès aux résultats de doses uniquement point par point (en précisant la position du point par rapport à l'axe du vent, ou en pointant le curseur sur la fenêtre d'affichage de la trace au sol), ce qui nécessite d'itérer pour connaître les distances d'effets létaux et irréversibles.

En citant ces quelques points on peut conclure que la simulation numérique des incendies ne peut donc pas encore prétendre reproduire fidèlement toute la complexité d'un incendie réel.

Le tableau IV.4 classe les origines possibles des écarts entre tout résultat de simulation numérique et la grandeur réelle correspondante. Cette description montre qu'une partie des écarts provient naturellement de la méconnaissance des phénomènes étudiés, ce qui peut être qualifié d'« incertitude ». Il existe également une source d'écart qui n'est pas liée à la description physique des phénomènes, et qui est ici appelée « erreur ». Les erreurs connues sont des erreurs mesurables voire corrigibles, alors que les erreurs inconnues sont difficiles à déceler et dépendent sensiblement du travail de validation préalablement réalisé par l'utilisateur. Ceci montre l'intérêt de la validation de l'outil numérique, notamment avant tout emploi dans un but prédictif. En effet, la validation permet de réduire significativement les erreurs d'origine inconnue. Une simulation numérique n'est jamais absolument conforme à la réalité mais elle est cependant jugée crédible si les erreurs commises sont d'origine connue.

Écart entre prédictions et réalité		
Méconnaissance Des Phénomènes	Connaissance Suffisante Des Phénomènes	
Incertitude	Erreur	
	Origine Connue	Origine Inconnue
	<ul style="list-style-type: none"> - Modélisation - Discrétisation - Troncature 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise Utilisation - Erreurs De Codage - Bugs

Tableau IV.4 : Origines des écarts entre prédictions et réalité (Guide for the Verification and Validation of CFD simulations, 1998).

Pour tirer le meilleur parti des outils numériques disponibles actuellement, on propose une utilisation combinée de plusieurs logiciels, afin d'associer leurs compétences (exemple de l'utilisation conjointe de CFAST – FDS ainsi que le modèle CFD et la méthode Monte Carlo: travail de Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka, et Olavi Keski-Rahkonen, VTT Technical Research Centre of Finland, 2008).

L'autre technique relativement récente consiste à combiner pour un même problème les deux modèles : modèles de champ CFD et modèles à zones. Ceci permet de bénéficier des avantages respectifs des techniques : en bref, un calcul précis avec la CFD et un calcul rapide avec le modèle à zone.

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

Conclusion Générale

Conclusion générale

La modélisation numérique a connu un essor considérable durant les dernières décennies, principalement grâce au développement des capacités de calcul des ordinateurs et à l'amélioration des modèles et des codes. Cette augmentation du potentiel de calcul permet de faire progresser les connaissances sur les matériaux, leur élaboration et leur évolution. Divers outils de modélisation offrent la possibilité d'étudier des sujets d'intérêt et chacun d'eux possède sa spécificité et ses limitations. Dans une vision simplifiée, ils peuvent être classés en trois catégories suivant les échelles d'espace et de temps qu'ils permettent d'explorer.

Ce mémoire a été consacré à l'étude des différents modèles numériques dédiés à l'étude des effets d'incendie sur l'environnement atmosphérique. Une étude bibliographique générale a été menée sur les effets générés par l'incendie, et plus particulièrement basée sur la problématique de la modélisation des ces effets.

Le premier chapitre de ce mémoire, avait porté à la fois sur l'étude des différents effets de l'incendie sur l'environnement, par la suite il était apparu nécessaire de présenter les différents types de modélisation des incendies.

Dans le deuxième chapitre, il a été décidé de mettre à profit les capacités prédictives des modèles numériques avancé de simulation des incendies en étudiant leurs méthodes de résolution, leurs domaine d'application ainsi que leurs lacunes rencontrées lors de leurs utilisation. Ce travail a permis de mieux cerner les aptitudes de l'outil numérique à reproduire les phénomènes physiques intervenant dans le contexte des incendies, de part la dispersion des polluants et d'autre part l'apport de chaleur.

Les conclusions du volet numérique de ce mémoire concernent au sens large la problématique générale de la simulation numérique des incendies en utilisant les modèles

avancés tels que les modèles CFD et intégrales. Il est apparu que ce type de modélisation constitue une voie incontournable et prometteuse pour l'étude des incendies. Elle offre en effet un accès aisé à de nombreuses grandeurs et possède un domaine d'application très étendu.

En effet, l'objectif final de cette étude est de modéliser et simuler numériquement les effets thermiques et la dispersion des polluants d'un incendie. Pour ce faire, on a opté pour l'utilisation de deux logiciels ; le code ALOHA du type intégral, pour modéliser la dispersion dans l'atmosphère de divers produits chimiques et d'estimer leurs concentrations à différentes distances de la source de rejet et le code FLUENT du type CFD, destiné à la modélisation de l'effet thermique des incendies et les deux derniers montrent à la fois une simplicité, économie et performance, d'étudier et comprendre (du moins en partie) comment agissent ces actionneurs sur les perturbations de l'écoulement.

On a choisie un modèle CFD qui est le logiciel FLUENT, la géométrie du domaine physique a été sélectionnée avec succès en utilisant le Gambit. On a pu conclure que les codes CFD (Computational Fluid Dynamics) sont de plus en plus utilisés pour la simulation d'incendies. Ils consistent à résoudre de façon approchée les équations fondamentales de la mécanique des fluides (équations de Navier-Stokes) sur un maillage du domaine physique. Ce type de modélisation permet de prendre en compte tous les paramètres du problème, et notamment de représenter la stratification.

L'utilisation de tels codes nécessite cependant de bonnes connaissances en mécanique des fluides et transferts de chaleur, ainsi que d'autres plus spécifiques aux codes CFD afin de choisir correctement les conditions aux limites à appliquer et les sous-modèles de turbulence, transfert thermique, combustion, etc. Ces sous-modèles comportent généralement une part d'empirisme qui limite leur domaine d'application.

Cependant, cette modélisation en premier lieu et cette simulation numérique en second lieu heurte aujourd'hui encore à de nombreuses difficultés concernant la prise en compte de phénomènes physiques complexes exerçant une influence significative sur l'ensemble du problème, on prend par exemple le code FLUENT qui considère que la source du fuel comme source permanente et pour surmonter ce problème l'utilisateur doit intervenir au niveau du programme principal du logiciel pour résoudre ce problème. Il y a aussi la chimie de la combustion qui est également un point délicat pour obtenir des simulations plus réalistes. Dans le code FLUENT plus particulièrement, on peut remarquer que les caractéristiques des écoulements sont généralement en bon accord avec les mesures expérimentales, malgré la grande simplicité du modèle de combustion. Mais des cinétiques à plusieurs étapes seront nécessaires à l'avenir pour simuler les phénomènes d'extinction et de prémélange, et mieux reproduire la production d'espèces intermédiaires.

Les simulations CFD tridimensionnelles ne sont donc généralement pas adaptées à l'étude d'un nombre conséquent de scénarios. Elles trouvent une application dans des situations particulières (géométries complexes notamment) pour lesquelles les phénomènes physiques sont difficiles à appréhender et les autres modèles ne sont pas valides.

Ce travail a également souligné que l'apport thermique dû à l'incendie, qui reste une question de tout premier ordre dans le cadre de la simulation numérique des incendies. En effet, la puissance du feu est un paramètre incontournable pour caractériser les effets du feu sur son environnement. Les différentes simulations réalisées au cours de ce travail ont montré que les grandeurs calculées, notamment le champ de température, sont étroitement liées à la puissance du feu. Malheureusement, même lorsque la quantité de combustible est connue avec précision, la détermination de l'évolution de la puissance en fonction du temps demeure très difficile, pour ne pas dire impossible lorsque le combustible est constitué de divers matériaux différents les uns des autres. Pour le moment, la simulation numérique parvient seulement à retrouver des ordres de grandeurs à l'échelle du laboratoire. Le passage à l'échelle réelle constitue un problème encore loin d'être résolu. C'est la principale raison pour laquelle la puissance de l'incendie a toujours été imposée dans les simulations réalisées dans le cadre de ce travail (Code ALOHA).

Un autre point qu'on doit évoquer concerne le code ALOHA, ce dernier est très limité par le temps de consommation des produits chimiques (60 minutes au maximum), alors qu'il y a des scénarios d'incendies qui prennent des heures pour consommer toute la quantité du combustible, ainsi que la quantité du combustibles qui ne doit pas dépasser les 5.000.000Kg lors de la modélisation du BLEVE et le Boilover qui n'est pas le cas dans notre étude.

La simulation numérique de l'incendie ne peut donc pas encore prétendre reproduire fidèlement toute la complexité d'un incendie réel. Pour tirer le meilleur parti des outils numériques actuellement disponibles, il est nécessaire de se restreindre à l'étude de cas simplifiés plus ou moins représentatifs de la réalité. Les conclusions tirées de ces investigations sont alors transposées aux cas expérimentaux pour être confrontées à la réalité.

Autre points qu'on doit ajouter est le faite que ces codes peuvent donnés de meilleurs résultats si on les utilise conjointement et ainsi ils se complètent parfaitement, cette technique relativement récente consiste à combiner pour un même problème deux ou plusieurs codes pour toucher les différents points sensibles du problème en combinant les apports des différents codes et ainsi les différentes lacunes d'utilisation d'un code sera bien métrisée par les apports de l'autre code.

Perspectives

A l'issue de ce travail, nous pensons avoir bien progressé dans la modélisation numérique des incendies, puisque notre travail s'est limité à la modélisation numérique des effets d'incendie sur l'environnement atmosphérique, donc il sera intéressant de refaire cette démarche pour modéliser les différents phénomènes d'incendie ; propagation, détection, évacuation et extinction, en présentant les différents modèles qui gouvernes ces phénomènes d'incendie

Par ailleurs, dans le texte, on a déjà mentionné les différents types de modélisations dédiées à l'étude des incendies ; modélisation numérique, intuitive et statistique. Il serait évidemment pertinent de progresser dans le domaine de la modélisation des incendies en ce spécifiant a un autre type de modélisation ; statistique par exemple et la réflexion sur ce sur le sujet est souhaitable.

Annexes

Annexes

A. Outil de simulation numérique

La norme ISO 16730 précise le contenu devant accompagner un logiciel de simulation :

- La documentation technique, constituant la base scientifique du modèle, est primordiale. Celle-ci doit comporter les éléments suivants :
 - Les équations de base ainsi que les méthodes utilisées pour les discrétiser ;
 - Les choix de modélisation et les simplifications inhérentes,
 - Les justifications scientifiques de ces équations et choix de modélisation ;
- Un guide de l'utilisateur, devant comporter les éléments suivants :
 - La mise en œuvre de l'outil ;
 - Les options de compilation ;
 - Les données d'entrée nécessaires, ainsi que les bornes pour lesquelles celles-ci sont acceptables ;
 - Des exemples variés d'utilisations.
- La description des étapes de robustesse mathématique et numérique, ainsi que les vérifications ;
- Des exemples de validation, et d'études de sensibilité pour des cas représentatifs des utilisations courantes. Cette étape est à réaliser pour toute nouvelle famille d'utilisation. Par exemple, l'utilisation dans un train d'un logiciel validé pour le bâtiment nécessite de revalider cet outil dans une situation représentative d'un train. La sensibilité de l'outil aux paramètres y est de plus vraisemblablement différente.
- Les exigences d'assurance qualité quant à la réalisation des simulations ;
- La sauvegarde et l'archivage, la traçabilité des simulations, et la conservation du code source de l'outil. Ce dernier n'est néanmoins pas toujours disponible, mais le posséder est un atout indéniable, car il permet des adaptations éventuelles d'un outil à des besoins spécifiques.

En outre, les produits évoluant très rapidement, il faut également être attentif à la capacité du développeur à assurer son développement régulier, des tests de validation et une assistance auprès de l'utilisateur (Guillaume, 2006).

Le schéma suivant présente schématiquement les étapes de cette validation :

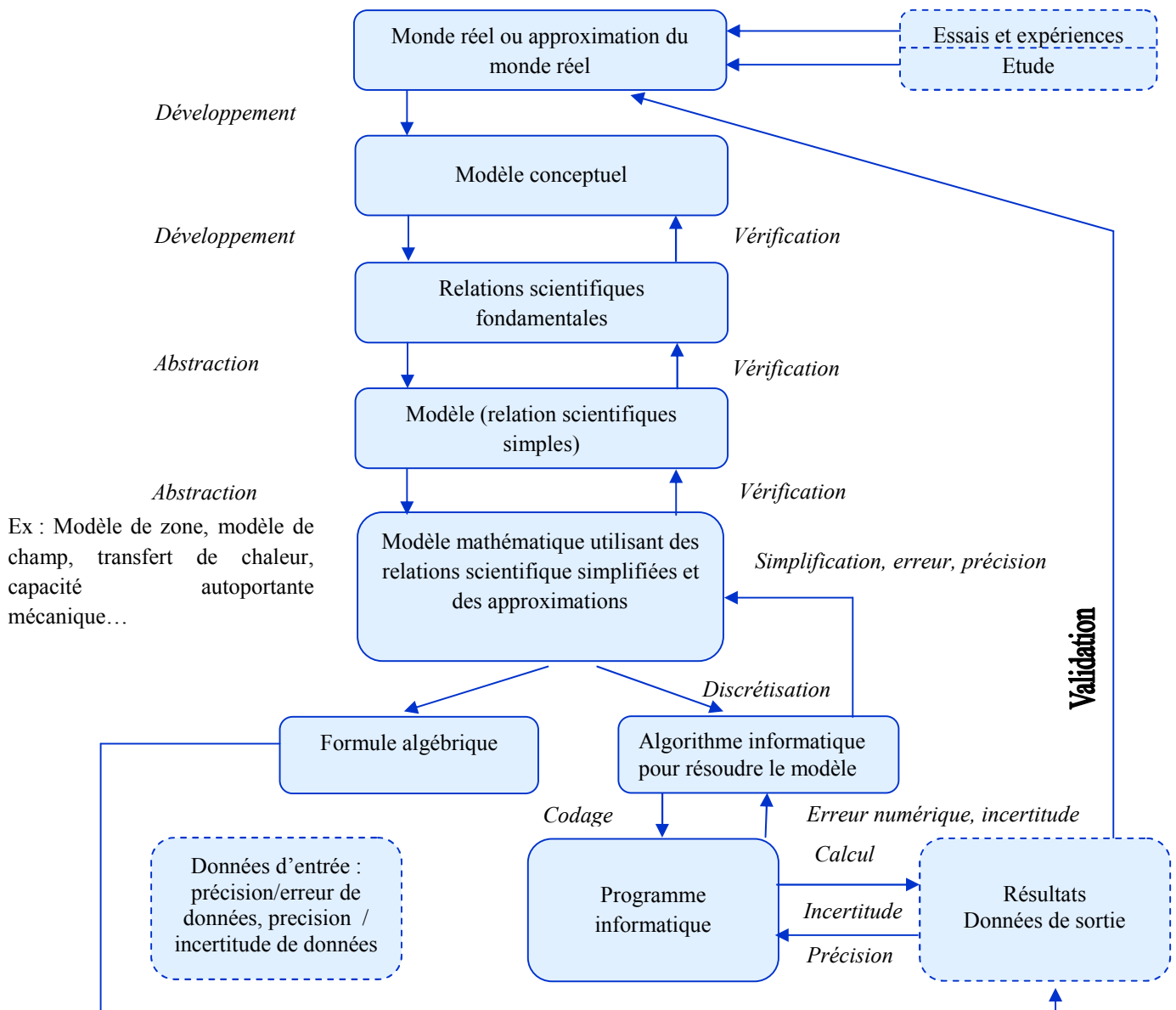


Figure : schéma des étapes de la validation d'un outil de simulation numérique.

Pour le développement du logiciel en lui-même, des conventions d'écriture et de validation peuvent être obtenues dans les normes ISO/IEC 25000, ISO/IEC 9126-1 et ISO/IEC 14598-1 (ISO/IEC 25000 ; ISO/IEC 9126-1 ; ISO/IEC 14598-1).

D'autres documents génériques sur la validation des modèles sont disponibles, mais ne s'appliquent pas nécessairement aux situations d'incendie (DoD, 1996 ; DoD, 2003).

Par ailleurs, pour les aspects génériques de la preuve par le calcul et les essais, des documents ont été développés en France par la commission de normalisation X B50 « Essais et autres démonstrations » (NF X 50-141-1 ; NF X 50-141-3).

B. Exemple d'outils existants pour les modèles de zone

Le Tableau II.1 présente une liste non exhaustive d'outils existants reposant sur des modèles à zone utilisés actuellement par la communauté scientifique pour la simulation du

développement du feu dans un local. Elle provient essentiellement d'un recensement effectué par Friedman (1992), remis à jour par Olenick et Carpenter (2003).

<i>Nom du modèle</i>	<i>Pays d'origine</i>	<i>Référence</i>	<i>Commentaires</i>
Modèles pour une seule pièce			
ASET	Etats-Unis	Cooper et Stroup (1982)	Modèle pour une pièce, sans ventilation.
ASET-B	Etats- Unis	Unis Walton (1985)	ASET en langage Basic au lieu de Fortran.
DSLAYV	Suede	NDRI (1986)	Modèle de zones mono compartiment.
FireMD	Etats-Unis	-	Modèle à deux zones pour une pièce.
FIRM	Etats-Unis	Janssens (2000)	Modèle à deux zones pour une seule pièce.
FIRST	Etats-Unis	Mitler et Rockett (1987)	Modèle pour une seule pièce avec Ventilation.
HarvardMarkVI	Etats-Unis	Rockett (1990)	Version précédente de FIRST.
HEMFAST	Etats-Unis	Dietenberger (1989)	Incendie de meubles dans une pièce. IMFE Pologne Modèle pour une pièce avec ouvertures de ventilation.
IMFE	Pologne	-	Modèle pour une pièce avec ouvertures de ventilation.
NAT	France	Curtat (1987)	Modèle pour une pièce plus particulièrement pour la réponse des structures.
NRCC1	Canada	Takeda et Yung(1992)	Modèle de zones mono compartiment.
NRCC2	Canada	-	Modèle pour un large espace horizontal (grands bureaux).
OSU	Etats-Unis	Sauer et Smith (1983)	Modèle de zones mono compartiment.

POGAR	Russie	Astapenko et al. (1988)	Modèle de zones mono compartiment.
R-VENT	Norvège	Meland et Skaret (1987)	Modèle d'extraction des fumées.
SICOM	France	(1999)	Modèle de zones mono compartiment.
SmokePro	Australie	-	Modèle pour calculer la position de la couche de fumée.
WPI-2	Etats-Unis	Satterfield et Barnett (1990)	Modèle de zones mono compartiment.
ZMFE	Pologne	-	Modèle de zones mono compartiment.
Modèles pour plusieurs pièces			
ARGOS	Danemark étages.	Deibjerg et al. (2003)	Modèle à compartiments.
BRANZFIRE	Nouvelle-Zélande	Wade (2004); Wade (2004)	Modèle pour plusieurs pièces (jusqu'à 10) incluant propagation de flammes, plusieurs sources d'incendie et ventilation mécanique.
BRI-2	Japon/Etats-Unis	Nakamura et Tanaka (1988); Harada et al. (2000)	Modèle à deux couches pour le transport de fumée dans un bâtiment à plusieurs pièces et plusieurs étages.
CCFM.VENTS	Etats-Unis	Cooper et Forney (1990)	Modèle pour plusieurs pièces avec ventilation.
CiFi	France	Bodart et Curtat (1987).	Modèle pour plusieurs pièces.
COMPBRN-III	Etats-Unis	Ho et al. (1988)	Modèle à compartiments.
FAS3D	Royaume-Uni	Rylands et McIntosh (2000)	Modèle à trois couches.
FIRAC	Etats-Unis	Nicholas et Gregory (1986)	Utilise FIRIN, en incluant des systèmes de ventilation complexes.

FIREWIND	Australie	Shestopal (1993)	Modèle pour plusieurs pièces avec plusieurs petits sous-modèles (amélioration de FIRECALC). Inclut un module d'évacuation. Code commercialisé
FIRIN	Etats-Unis	Chan et al. (1982)	Modèle pour plusieurs pièces avec systèmes de ventilation (conduits, ventilateurs et filtres). FAST l'interface.
MRFC	Allemagne	Schneider et al. (1997)	Modèle pour plusieurs pièces pour le calcul du transport de fumées et de la charge thermique sur les structures.
WPIFIRE	Etats-Unis	Haynes (1994)	Modèle pour plusieurs pièces.
SMKFLW	Japon	Matsushita et al. (1985)	Modèle à une couche pour le transport de fumées dans les bâtiments.
CFAST/FAST	Etats-	Unis Peacock et al. (2000)	Modèle comprenant une suite de programmes ; CFAST est le solveur et FAST l'interface.
Modèles spécifiques à une application phénomène de 'preflashover'			
CALTECH		Zukoski et Kubota (1980)	Modèle de zones pré flash-over.
FFM	Etats-Unis	Dietenberger (1991)	Modèle de zones pré flash-over.
HYSLAB	Suède	Hagglund (1983)	Modèle de zones pré flash-over.
NBS	Etats-Unis	Quintiere et McCaffrey (1980)	Modèle de zones pré flash-over.
RFIRES	Royaume- Uni	Pape et al. (1981)	Modèle de zones pré flash-over.
SP	Royaume- Uni	Wickstrom et Goransson (1990)	Modèle de zones pré flash-over.
phénomène de 'postflashover'			
COMF2	Etats-Unis	Babrauskas (1979)	Modèle pour une pièce pour le

			phénomène de 'postflashover'.
SFIRE-4	Suède	Magnusson et Thelandersson (1970)	Modèle de zones pré flash-over.
Feux de nappe			
CFIRE-X	Allemagne	Offenhauser et al. (1991)	Modèle plus particulièrement destiné aux feux de nappe d'hydrocarbures.
Atria (larges espaces verticaux)			
FMD	Etats-Unis	Milke et Mowrer (1993)	Modèle pour atria (larges espaces verticaux).
Hall (large espace horizontal)			
NRCC2	Canada	-	Modèle pour un large espace horizontal.
Cabine d'avion			
DACFIR-3	Etats-Unis	MacArthur (1982)	Modèle pour une cabine d'avion.
Centrales nucléaires			
FIRAC	Etats-Unis	Nicholas et Gregory (1986)	Utilise FIRIN, en incluant des systèmes de ventilation complexes. Permet de calculer la taille des particules radioactives qui deviennent transportées dans l'air suite à l'incendie.
MAGIC	France	Gautier et al. (1999)	Modèle à deux zones pour des centrales nucléaires.
Tunnels			
FASIT	Royaume-Uni	Charters et al. (1994)	Modèle à trois zones dans la direction verticale.
Modèles divers			
FASTlite	Etats-Unis	Portier et al. (1999)	Version limitée de CFAST.

FIGARO-II	Allemagne	Heins (1991)	Modèle pour déterminer la tenabilité.
Ozone V2	Belgique	Cadorin (2003)	Modèle plus spécifiquement pour la réponse des structures.

Tableau II.1 : Modèles à zones existants (Olenick et al., 2003).

C. Exemple d'outils existants pour les modèles de champ

Les outils existants sont présentés ci-dessous selon ces deux grandes catégories. Cependant, ceci ne présage en rien de la capacité d'un code à modéliser un incendie : en effet, si un code incendie contient nécessairement des modèles physiques adaptés aux incendies, ceux-ci ne sont pas nécessairement plus nombreux ni plus sophistiqués que ceux inclus dans les codes CFD généraux. Réciproquement, un code incendie peut être appliqué potentiellement à d'autres problèmes bien que son domaine d'application restera sûrement plus limité qu'un code CFD général (Friedman, 1992; Olenick, 2003; Stroup 1995).

<i>Modèle</i>	<i>Pays</i>	<i>d'origine Référence</i>	<i>Description</i>
Codes généraux			
FLUENT	Etats-Unis	Fluent	Fluent est un logiciel de CFD général, fréquemment utilisé en génie des procédés. Il travaille habituellement avec des écoulements canoniques, en RANS ou en κ - ε , mais permet la LES depuis peu (« Smagorinsky tools »).
STAR-CD	Royaume-Uni	Star-CD)	STAR-CD est un logiciel générique de CFD, applicable aux situations de combustion. Il dispose de plusieurs sous-modèles de turbulence : κ - ε , κ - ε non linéaires, LES par exemple, et dispose de modèles de combustion (EBU et PPDF).
CFX	Royaume-Uni	CFX)	CFX est un logiciel de mécanique des fluides d'usage universel, applicable à la dispersion, à l'incendie et à l'explosion dans les environnements ouverts ou fermés. Il fait appel à des

			modèles type RANS ou κ - ϵ .
PHOENICS	Royaume-Uni	PHOENICS	PHOENICS est un logiciel de CFD général, très utilisé en génie des procédés pour les calculs de transport fluide ou d'échanges de chaleur. Il dispose d'une grande variété de modèles de turbulence, incluant la LES ou les κ - ϵ , mais ne possède pas de modèle de combustion solide.
Codes spécifiques pour les incendies			
FDS	Etats-Unis	McGrattan et Forney (2000)	FDS a été développé au NIST pour répondre aux problèmes d'écoulement spécifiques du feu couplés avec la prise en compte de la propagation surfacique des matériaux. Il travaille en DNS ou en LES et est décrit plus précisément dans la suite du document. FDS est utilisé au LNE pour les calculs CFD de feux en bâtiments, et transports. Des fonctions additionnelles ont été développées.
ALOFT-FT	Etats-Unis		ALOFT est un outil maillé développé par le NIST pour étudier le comportement d'un panache de feu en extérieur en fonction du vent dans des conditions de terrain plat.
FIRE	Australie	Novozhilov et al. (1997)	FIRE est un code de CFD multi-grilles pour des situations bidimensionnelles ou tridimensionnelles de combustion. Il peut être appliqué aux solides, liquides ou gaz.
JASMINE	Royaume-Uni	Cox et Kumar (1986)	JASMINE est un modèle développé au BRE depuis plus de 20 ans. Il travaille en κ - ϵ . L'outil a été validé à de nombreuses reprises dans des situations de bâtiments. JASMINE résout la partie CFD à l'aide de PHOENICS. Il dispose de nombreux sous-modèles développés

			pour répondre à une multitude de situations.
KAMELEON	Norvège	Vembe et al. (2000; Vembe et al. (2000)	KAMELEON est un modèle champ tridimensionnel développé par SINTEF. Il dispose d'algorithmes de suppression et peut être couplé à des outils de structure comme USFOS.
KOBRA-3D	Allemagne	Schneider	KOBRA est un modèle de CFD tridimensionnelle permettant le calcul du transfert thermique, développé en Allemagne. Il gère les sources prescrites, mais pas la propagation calculée.
MEFE	Portugal	Viegas (1999)	MEFE est un logiciel de CFD développé au Portugal. Il traite des comportements de feu dans un ou deux compartiments. Le calcul est basé sur la flottabilité et la turbulence est traitée en $\kappa-\epsilon$.
RMFIRE	Canada	Hadjisophocleous et Yakan (1991)	RMFIRE est un modèle bi-dimensionnel assez ancien développé au Canada. Les équations sont établies de manière à considérer les environnements irréguliers.
SMARTFIRE	Royaume-Uni	Smartfire	SMARTFIRE est développé à l'Université de Greenwich. L'outil réalise la modélisation tridimensionnelle d'environnements multi-locaux. Il traite des algorithmes simples pour la pression et traite la turbulence en $\kappa-\epsilon$. Le logiciel a déjà été couplé au logiciel d'évacuation EXODUS.
SOFIE	Royaume-Uni Suède	Rubini (1997)	SOFIE est un code anglais développé à l'université Cranfield. Le logiciel résout les équations moyennées RANS dans des situations complexes. La prise en compte de la pyrolyse des matériaux est en cours de développement. Les données issues du cône calorimètre peuvent être

			utilisées directement.
SOLVENT	Etats-Unis	Solvent	SOLVENT est un logiciel spécialement créé pour traiter du transfert et le transport de chaleur et des fumées dans les tunnels. Le code est adapté aux ventilations longitudinales et transversales.

Tableau II.2: Outils CFD existants (Friedman, 1992; Olenick, 2003; Stroup, 1995)

MODELISATION NUMERIQUE POUR L'EVALUATION DES EFFETS DE L'INCENDIE SUR L'ENVIRONNEMENT

Un modèle numérique d'incendie est un outil qui simule les événements liés au feu, de la combustion en passant par l'effondrement des structures. Ces modèles peuvent être déterminés soit d'une façon expérimentale, soit d'une façon mathématique. Les modèles expérimentaux ne s'appliquent que pour certains domaines physiques et (ou) humains (par exemple un compartiment); tandis que les modèles mathématiques, eux, emploient une série d'équations qui décrivent les phénomènes liés à l'incendie. Les modèles d'incendie sont répartis entre *les modèles déterministes* et *les modèles statistiques* :

Modélisation d'incendie

Modèle statistique

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

Modèle numérique dit de dispersion

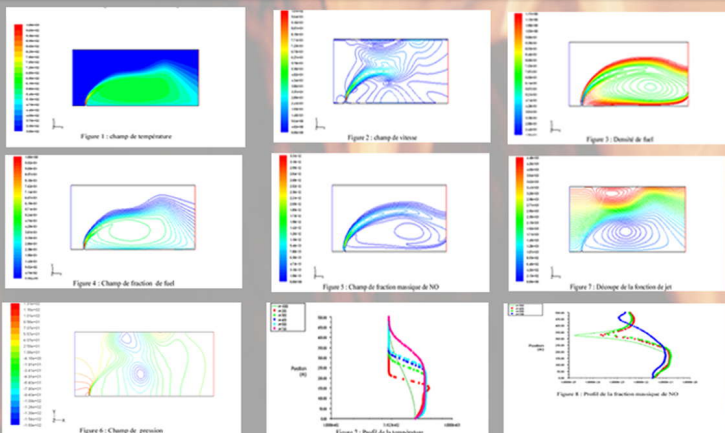
- **Les modèles Gaussiens** : sont les premiers modèles de dispersion utilisés sur ordinateur sont de type Gaussien. Ces modèles permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air)
- **Les modèles Intégraux** : les modèles intégraux ont été développés pour simuler le comportement des nuages de gaz plus lourds que l'air. Ils sont plus spécifiquement utilisés pour le champ proche et ils sont rattachés à des modèles gaussiens pour le champ lointain

Modèle déterministe

Modèle numérique dit thermique

- **Les modèles de Zones** : Le principe du modèle à zones est de découper le volume du compartiment en un nombre très réduit de zones au sein desquelles les grandeurs caractéristiques sont supposées uniformes. Des bilans de conservation de la masse et de l'énergie permettent de traduire les échanges se produisant entre ces zones. Exemples : CFAST, OZONE, FPETool
- **Les modèles CFD** : également appelés modèles de champ, sont des modèles qui divisent le domaine étudié en un grand nombre de volumes de contrôle ou « mailles » au niveau desquels les grandeurs sont supposées uniformes. À chaque maille sont attribuées des inconnues représentant les valeurs des grandeurs physiques recherchées. Il s'agit alors de résoudre numériquement, de manière locale et instationnaire, les équations de Navier Stokes traduisant les lois d'échange et de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie

MODELISATION DES EFFETS DE L'ACCIDENT DE SKIKDA AVEC LE LOGICIEL FLUENT



DISCUSSION

Les estimations des températures sont en bon accord avec les résultats obtenus par l'utilisation d'un outil de programmation (FORTRAN et ORIGINE) ce qui permet déjà de valider la capacité du code CFD à simuler les phénomènes d'incendie durant la phase de feu pleinement développé. La répartition des puissances dégagées montre que la simulation numérique prédit l'existence d'une partie du fuel injecté non consommée à l'atmosphère et alimentant les flammes ou plus exactement la boule de feu. Ce cas de validation montre l'aptitude du code CFD à simuler un incendie conduisant à un Boilover. L'étude de l'influence du maillage montre que le choix de mailles cubiques de 1 m de côté sur un volume de contrôle de (500x1000) m représente un compromis acceptable entre précision et temps de calcul

CONCLUSION :

L'idée d'étudier l'incendie par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides et le transfert de chaleur, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables (problème des données réelles, maillage, conditions aux limites... etc). La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante.



ABSTRACT: The turbulent fires on hydrocarbon liquid pool displays several characteristics including pulsating burning, production of smoke and reduced thermal radiations with increasing size, The intend of this paper is to study the effects of such accident through the analysis of a case study: a fire of oil terminal. The thermal effects and the dispersion of smoke are analysed.

The mathematical modelling consists of heat, mass transfer and life cycle modelling. That includes a two dimensional equations in which mass and energy transport equations are solved to produce estimates of the pollutant concentration evolution in atmosphere. If only the heat flux is interesting, the easiest model to use is one – step global model. The mean concentrations and concentration fluctuations are predicted by this model.

1. INTRODUCTION:

The burning fuel expel occurs in three main forms (J. Hristov et al. 2004): (i) *Slop over* occurs as a discontinuous frothing release of fuel from the tank on one side of its wall. (ii) *Froth over* is a continuous low intensity fuel release (frothing) from the tank over its walls similar to the “rolling effect” occurring during the tank filling. (iii) *Boilover* is a violent ejection of the fuel that results in an enormous fire enlargement and formation of fireballs and a frothing over the entire tank content.

Boilover is generally considered as one of the most dangerous fire phenomena in large-scale oil-tank fires. It shall mean an event in the burning of certain oils in an open top tank when, after a long period of quiescent burning, there is a sudden increase in fire intensity associated with the expulsion of burning oil from the tank. Boilover occurs when the residues from surface burning become denser than the unburned oil and sink below the surface to form a hot layer, called a ‘heat wave’, reaches water or a water-in-oil emulsion in the bottom of the tank, the water first is superheated and subsequently boils almost explosively, overflowing the tank. Oils subject to boilover must have components having a wide range of boiling points, including both light ends and viscous residues. These characteristics are present in most crude oils and can be produced in synthetic mixtures (Lees F. P. 1996), [3]. In this paper a real case is described and the data taken from it are used to simulate its effects.

2. SKIKDA TERMINAL ACCIDENT:

The schematic layout of Skikda storage terminal is illustrated in Figure 1.

The crude oil station has 15 tanks (N°. 1-15), before the fire with a capacity of 50000 m3. On October 04th of 2005, a fire and boilover were observed at Skikda storage terminal of crude oil in ALGERIA as shown in Figure 2. According to witnesses, gas leak was observed and a flame was observed on the crudeoil tank (S106) about 10.00 pm. Started alarm at 10.03 pm, and the fire brigade arrived at the terminal, then they started to pump water in order to disperse the smoke and control the fire. The two tanks (S106 and S105) are cooled



Figure 1. Schematic layout of Skikda terminal



Figure 2. Boilover of Skikda terminal by crude oil

and the blue flames are disappeared about 12.00 pm. Considering the weak supply water and emulsifier compared to the high demand, one have an immediate reappearance of the flames on the tank. About midnight, an enormous fireball appeared on the tank (S106) generating the crude discharge on fire in the retention dike

Two hours after the boilover (about 02.00 pm), great quantities of crude on fire were projected outside the retention dike of tank (S106), and then the roof of the tank (S105) took fire. A crude river on fire followed the drains and gutters and reached the buildings and workshops close to the entry which took fire.

3. ANALYSIS OF THE DISASTER:

The Skikda terminal disaster has been reviewed in detail. It has been noted that there were three elements involved in the disaster, the gas source, the ignition and poor management [4].

3.1. Source of the Flammable Vapour:

The flammable gas pockets appeared when a section of 5,8 km was replaced by 72 km of the terminal October 1st, 2005. When the pipeline 34" is stopped, the valve of the terminal entry is left open (overpressure). With the restarting of pipeline about October 3rd, vapour pockets are pushed towards the terminal (tank S (106)).

October 04 in the morning there was almost no wind. The wind prevailing is the North-West. (Fig. 3). The road at this place forms a

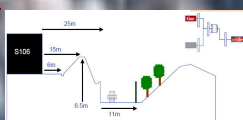


Figure 3. Distances and meteorological conditions

depression where the vapour heavier than the air can concentrate.

3.2. Source of ignition:

A vehicle is reached in the storage area and was not subjected to procedure.

The engine of the vehicle fixed and packed with the restarting.

The engine of the vehicle fixed and packed with the restarting. a linear flame appeared below the car (Fig. 4).



Figure 4. The ignition source of the disaster

3.3. Poor management:

The main cause which helped to worsen the accident is the poor management. The terminal of Skikda is a major hazard installation, therefore an emergency plan on – and off- site should have been available, and practised. With the insufficiency of a safety program at the factory in terms of provision of safety equipment, emergency tools, provision of work and safety procedures, etc, the management failed to comply with the statutory regulation for the emergency preparedness and response.

4. EFFECTS OF THE DISASTER:

The effects of this disaster were essentially as follows

4.1. Damage and Human loss:

- The material damages in the terminal involved the two storage tanks of accident are completely destroyed (S105 and S106), seven trucks of intervention and loss of a large quantity of crude.
- The disaster resulted in 02 fatalities and 29 injuries.

4.2. Environmental Effects:

The effects on the environment were essentially those corresponding to fire and fireball and to the atmospheric dispersion of smoke.

4.2.1. Smoke dispersion:

The fire gave rise to a large smoke plume from 10.00 pm until 02.00 pm. As seen in Figure 5, considerable amount of heavy smoke was observed.



Figure 5. Fire with heavy smoke at Skikda terminal

The plume is described in terms of unsteady state convective transport by a uniform ambient wind of heated gases and particulates matter introduced into a stably stratified atmosphere by a continuously burning fire. The mathematical model of a smoke plume consists of the conservation equations of mass, momentum and energy which govern the temperature T, pressure P, density ρ and velocity in a plane (x, y). As described above, the most important assumption is that the component of the velocity in the x-direction of the wind is the ambient wind and thus is known. Since the fire bed itself is not the object under study, only the fraction of the fuel converted to combustion gases need be specified (K.B. McGrattan et al. 1996). The mathematical model of a smoke plume consists of the conservation equations of mass, momentum and energy which govern the temperature T, pressure p, density ρ and crosswind velocity components (u, v) in the direction (x, y), in connection with the k-ε turbulence model.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi}$$

Where ϕ = the quantities such as velocity components u, v, w of the velocity vector \vec{v} , enthalpy h, and mass fraction Y. The ideal gas law is used for relating the air pressure, density, and temperature. The k-ε two equations model is used, and so the terms involving correlations between the fluctuation quantities are modelled by the eddy viscosity μ_t , determined from the local values of k and ε (J.L. Consalvi et al. 2003):

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

In this study, the numerical model allows us to follow the spatio-temporal evolution of smoke released of this accident, in order to determine the environmental impacts on local population being very near to the terminal. The simulation begins several fire diameters downwind of the fire, where the smoke and hot gases are characterized by relatively small temperature perturbations, and minimal radiation effects. In this region the plume gases ascend to an altitude of neutral buoyancy, and then gradually disperse (fig.6).

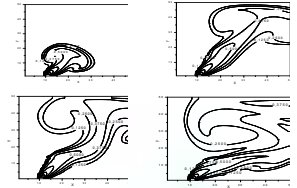


Figure 6. Contours of smoke concentration in sever times (t =1/4; t=2/4; t=3/4; t=1)

The flames generated by the fire have large significant sizes and with the presence of gravit and the air velocity can involve very significant movements causing the propagation of heat in the control domain. In the fire region the plume gases ascend to an altitude of neutral buoyancy, and the gradually disperse. The trajectory of the plume is governed by the ambient wind, the atmospheric stratification and the buoyancy-induced convection. The smoke progress and its degree of stratification depend on the airflow. With no air current in the fire zone, the smoke progresses in a symmetrical way on both sides of the fire. In all the cases, the instabilities of the inflexional basic shearing flow develop and give rise to swirls of the Kelvin Helmholtz type. One studies the dynamics of this formation using visualization colours of the temperature fields.

4.2.2. Fireball analysis:

It is not possible to know the temperatures pressures reached by the tanks were heated. A theoretical calculation could be performed (INERIS 2003), but it would not be representative as there is no information on the exact circumstances. The fireballs were observed by boilover. The time of release of the boilover is estimated about 15 hours: the elevation of the fireball is 1 km.

A very important aspect, which can have a decisive influence on the mechanical strength of the tank wall, is whether there was any flame impingement. As is well known, when this happens local heat fluxes can reach very high values, for the impingement of a flame from a boilover, heat fluxes of the order of 150 kw/m² (Broeckmann. 1992). The flame temperature is thus estimated to 1443 K.

5. DISCUSSION:

The analysis highlighted that the main cause which led to the accident at the terminal is believed to be due to poor management. The review of case history shows that always the human error is the same cause of these accidents (I.M. Shaluf et al. 2003 a, E.Planas-Cuchi et al.1998, c K. Park et al. 2006).

It was noted that the boilover has two periods. The errors were generated and accumulated during the first period in the tank of storage (S106) due to the poor operating procedures, to the lack of the boilover and safety culture and to the lack of emergency preparedness. The extinction of the two tanks lasted for the tank (S106), two days and the second tank (S105), 8 days.

In an emergency of this type of accident, it is essential to avoid or reduce as far as possible the transmission of the accident from one tank to the next. In this regard it is very important to observe separation criteria, keeping flammable products apart from those that can produce gases. It should be pointed out that in the case analysed here this separation was not observed.

The simulation shows that even if the wind has blown towards the town, there would not have been any danger for the population, as the hazardous concentrations were restricted to short distances, far from the town.

6. CONCLUSION

The crude oil storage terminal accident that occurred on October 4th of 2005 in Algeria has been examined. The first cause of the incident was concluded to be the presence of the flammable pockets of gas not far from the ignition source. The accident worsened by effect domino, the fire propagated towards the second tank that was fortunately empty after the tank (S106) took fire. As a result, more stringent management systems for crude oil storage terminal must be promulgated and implemented.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- A. Carrau, E. Bernuchon, S. Descourriere, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt, DRA-03 : Spécificités des entrepôts au regard de l'incendie », Rapport intermédiaire, INERIS, 2000
- A. E. Côté, J. L. Linville, « Fire Protection Handbook - Systems concepts for building fire safety », NFPA, Quincy, 1986.
- A. Lavoisier, « Réflexions sur le phlogistique », 1785.
- A. Yoshizawa, « Eddy-viscosity-type subgrid-scale model with a variable Smagorinsky coefficient and its relationship with the one-equation model in large eddy simulation », Physics of Fluids A : Fluid Dynamics, vol.3 pp 2007-2009, Août 1991.
- « Addendum to the FLUENT 5 User's Guide », Fluent, Incorporated, Lebanon, November 2000.
- « ALOHA ® Areal Locations of Hazardous Atmospheres », User's Manual U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic And Atmospheric Administration, 2006. (NOAA, 2006)
- ALOHA: <http://response.restoration.noaa.gov/aloha>
- « ALOHA® USER'S MANUAL », U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Office of Emergency Management, Washington, D.C, 2007.(OEM, 2007)
- « An International Survey of computer Models For Fire and Smoke, R. Friedman, FMRC Norwood », Journal of Fire Protection Engineering, vol. 4(3), pp 81-921992.
- B. Debray, N. Gobeau, F. Waymel, « Incendies en milieu confiné », rapport d'étude 11/01/2007 INERIS-DRA-INVE N° 46055 - C70050, 2007.
- C. Bliefert, R. Perraud, « Chimie de l'environnement (air, eau, sols, déchets) », Edition De Boeck, 2001.
- C. Chivas, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) : Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Phénoménologie et modélisation des effets » Ω -16 Réf. : INERIS – DRA – N° 46055-CL57149, 2005.
- C. CHIVAS, « Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Phénoménologie et modélisation des effets Ω -16. Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) », RAPPORT D'ÉTUDE N° 57149, 17/03/2005.

- C. T. Shaw, «Using Computational Fluids Dynamics» Prentice Hall, 1992.
- C.F. Baldassara, L.M. Romine, « An analytical approach to fire protection engineering», Building Design & Construction, pp 132-135, 1988.
- « Calcul scientifique et simulation numérique », guide informatique, lettre d'avril 2006.
- CCPS, «Use of vapour cloud – Dispersion models», Center For Chemical Process Safety, 2e edition, 1996.
- D. Canter, «Fires and Human Behavior », edition John Willey & son, New-York, 1980.
- D. Cluzel, P. Sarrat, « Evaluation du Risque Incendie par le Calcul : Méthode ERIC», ST-REMY LES CHEVREUSE (Fr.) : Union Technique Interprofessionnelle, Contrat de la Direction de la Sécurité Civile no 78-73-017, pp 46, novembre 1978.
- D. Guénot, B. Aupoix, «Étude de l'approche DES (Detached Eddy Simulation) pour prévoir les écoulements instationnaires à grande échelle», (ONERA), 16ème congrès français de mécanique, Nice, 1-5 septembre 2003.
- D. Morvan, M. Larini, J.L. Dupuy, P. Fernandes, A.I. Iranda, J. Andre, O. Sero-Guillaume, D. Calogine, P. Cuiñas, « Behaviour Modelling of Wildland Fires:a State of the Art», EUFIRELAB:Euro-Mediterranean, Wildland Fire Laboratory, 2002.
- D.A. Purser, « in Improved Fire and Smoke-Resistant Materials for Commercial Aircraft Interiors: A Proceedings », 1995.
- D.A. Purser, « Toxicity assessment of combustion products », Massachusetts: National Fire Protection Association, pp I-200 à I-245, 1999.
- « Determination of Acrolein, Formaldehyde and other Versatile Components from Combustion of Conductor Wires from Polyolefin Coated Communication Cables », Proceedings of 8th International Interflam'99 Conference, 29th June - 1st July 1999, Edinburgh, pp 181-187, 1999.
- « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt DRA-03 : Spécificités des entrepôts au regard de l'incendie », INERIS, Rapport intermédiaire, 2000.
- E. Bernuchon, O. Salvi, B. Faucher, «Feux de nappe : Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) Ω-2 », Rappot INERIS, INERIS-DRA-2002-25427, 2002.
- E. Guillaume, « Effets du feu sur les personnes », synthèse bibliographique, Laboratoire national de métrologie et d'essais, (LNE), 2006.
- E. Guillaume, « Les outils de l'ingénierie de la sécurité incendie », Laboratoire national de métrologie et d'essais», Document LNE : G020284 / C672X01 / CEMATE/2, France, 2006.
- E. Lévêque, F. Toschi, L. Shao, «Shear-Improved Smagorinsky Model for Large-Eddy Simulation of Wall-Bounded Turbulent Flows», J-P. Bertoglio, J. Fluid Mech. 2006.
- Eurocode 1, « Actions sur les structures», EC1/EN1991.

- F. Cretin, A. Carrau, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt (DRA 03), Rapport d'Opération, Moyens de prévention et de protection mis en œuvre dans les entrepôts », INERIS 2002.
- F. Rambaud, « Caractérisation, analyse et modélisation statistiques de fragments osseux crâniens pour la prédiction de paramètres mécaniques lésionnels », thèse de doctorat, Université d'Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Décembre 2007.
- G. A. BRIGGS, « Plume Rise », U.S. Atomic Energy Commission, Office of information Services, 1969.
- G. Cox, S. Kumar, «SFPE Handbook of Fire Protection Engineering», Third edition, chapitre Modeling Enclosure Fires Using CFD, pp 3–194, 3–218, National Fire Protection Association, Quincy, 2002.
- G. Hartzell, «Advances in Combustion Toxicology», Technomic Publishing Company, Volume 3 : ISBN N°87762-886-6, 1992.
- G. Marlair, Y. Mouilleau, « Modélisation des effets toxiques d'un feu sur l'environnement d'un site industriel : Importance des hypothèses relatives à la thermique », centre national de la recherche scientifique (CNRS), SFT, France, 1998.
- G. Mavrothalassitis & al., « Evaluation de l'aptitude du logiciel PHAST version 4.2 à traiter des conséquences de mise à l'atmosphère de produits inflammables et/ou toxiques », Rapport INERIS référencé 31 FP 51-1bis, 1995.
- G. P. Forney, W. F. Moss «Analysing and exploiting numerical characteristics of zone fire models», fire Science & Technology, Vol. 14, No.1 & 2, pp 49-60, 1994.
- « GAMBIT Command Reference Guide », Fluent, Incorporated, Lebanon, août 2000.
- « Guide for the Verification and Validation of CFD simulations. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.
- « Guide for the Verification and Validation of CFD simulations», American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.
- H. De Lumley, « L'Homme premier. Préhistoire, évolution, culture», Odile Jacob, 2000.
- H. E. Anderson, R.C. Rothermel, « Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires», 10th Symposium (International) on Combustion, pp 1000-1019, 1965.
- H. P. Hanson, M.M. Bradley, J.E. Bossert, R.R. Linn, L.W. Younker, «The potential and promise of physics-based wildfire simulation», Environment Science Policy 3, 161-1722000, 2000.
- H.W.M. Witlox, « PHAST 6.0 - Unified Dispersion Model - Consequence Modelling Documentation », DNV, 2000.

- « Instruction 5000.61: Modeling and Simulation (M&S) - Verification, Validation, and Accreditation (VV&A). Defense Modeling and Simulation Office», Office of the Director of Defense Research and Engineering, DoD. Dod, 2003.
- J, Kruppa, « Nouvelle approche de la réalisation au feu des éléments de construction », Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, pp 10, Paris, 1986.
- J. Bessis, « La probabilité et l'évaluation des risques », Masson, pp 132, Paris 1984.
- J. Benouraich, Y. Riviere, « Comparaison de méthodes d'analyse de risque en sécurité incendie », Centre Technique et Industriel de la Construction Métallique, rapport no 1006-4ST-REMY LES CHEVREUSE, 1986.
- J. C Couillet, O. Salvi, B. Faucher « Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, (DRA-006) Ω -12, Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul) », rapport d'étude INERIS, n° INERIS-DRA-2002-25427, Décembre 2002.
- J. C. Couillet, « Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) : Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul) », Version projet, INERIS 2002.
- J. F. Cadorin, D. Pinteau, J.M. Franssen, « The Design Fire Tool OZone V2.0 - Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests », Université de Liège, département M&S, Rapport interne SPEC/2001_01, Juin 2001.
- J. F. Guyonnet, P. Detriche, J-C. Lanore, B. Lauwick, « La maîtrise de l'incendie dans les bâtiments », pp 307, Paris, 1983.
- J. G. Quintiere, K. Steckler, D. Corley, « An Assessment of Fire Induced Flows in Compartments », Fire Science and Technology vol. 4, 1984.
- J. H. Ferziger & M. Peric, « Computational Methods for Fluid Dynamics », Springer Verlag, 1999.
- J. Hurley, « Evaluation of the Computer Fire Model DETACT », SFPE - ISO/TC92/SC4 Workshop on Assessment of Calculation Methods in FSE, Southwest Research Institute, USA, 2006.
- J. M. Lamere, « La sécurité informatique : Approche méthodologique », Dunod, Paris, 1985.
- J. P. Jeannette, N. Limnios, « Méthodes actuelles d'analyse de la sûreté des systèmes », Revue Générale de Sécurité, No.43, pp 46-52, avril 1985.
- K. Kawagoe « Fire behavior in rooms » Technical report, Building Research Institute, Tokyo Japan, 1958.
- K. McGrattan, « Computational Fluid Dynamics and Fire Modeling », Présentation de NIST 2001.
- K. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. R. Baum, « Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model » Fire Safety Science - 7th International Symposium, pp 827-838, 2003.

- K. Medrharhet, L. Benlatrech, « Evaluation des accidents industrielles majeurs; cas de l'accident du Skikda 4 octobre 2005 », mémoire d'ingénieur, d'hygiène et sécurité industrielle, 2008
- K. Sumi, Y. Tsuchiya, « Evaluating the Toxic Hazard of Fires », Canadian Building Digest, 1997.
- K. Van Niel, E. Guillaume, « Guide du logiciel CFAST », Document LNE, LCPP, DEPI-MC, France, 2007.
- L. F. Lefebvre, J. Lavigne, « Guide toxicologique pour les urgences en santé environnementale », Institut national de santé publique, Direction de santé publique de Montréal, Québec, 2004
- L. Y. Cooper, D.W.Stroup, «Calculating Available Safe Egress Time from Fires», National Bureau of Standards. (U.S.A.), NBSIR 82-2587, Gaithersburg, MD 20899, 1982.
- « Les mots de combustion », groupement français de combustion, janvier 2004.
- M. Curtat, « Physique du feu pour l'Ingénieur. Traité de physique du bâtiment », CSTB, 2001.
- M. Curtat, « Point sur les méthodes d'analyse de la sécurité incendie », Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, pp225, Champs-sur-Marne, France, 1989.
- M. Evans, «Quality Assurance of ALOHA», Draft Report, Office of Ocean and Resources Conservation and Assessment of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Seattle, 1994.
- M. L. Janssens, « Room fire models. Heat Release in Fires », Babrauskas, edition Grayson Elsevier Applied Science, pp 113–157, 1992.
- M. L. Janssens, «The Role of Measurement Uncertainty in the Validation of Calculation Methods for Fire Safety Engineering», ISO/TC92/SC4 Workshop on Assessment of Calculation Methods in FSE, Southwest Research Institute, USA, 2006.
- M. Reimeringer, F. Mercier, S. Richomme, « La résistance des structures aux actions accidentelles, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) », Rapport d'étude INERIS-DRA-2007-N° 46055/77288, 2007.
- « Modeling and simulation (M&S) management », Defense Modeling and Simulation Office, Office of the Director of Defense Research and Engineering, DoD. Dod directive no. 5000.59, 1996.
- N. Debray, F. Gobeau, « Incendies en milieu confiné », INERIS-DRA-2006-46055-C70050, 2007.
- N. Gobeau, «Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics», health & safety laboratory, Buxton, 2002.
- P. Rechenbach, « Fires Today: Risk and Protection for Fire Fighters, Proceedings of Flame Retardants », Conference 2000, pp 171-176, London (UK), 2000.

- P. Tucker, A. Mosquera, «Introduction to Grid & Mesh Generation for CFD», NAFEMS, United Kingdom, Reference R0079, 2000.
- R. Dosne, « 10 ans de retours d'expérience », Face au Risque n°300, Février 1994.
- R. Garnier, D. Chataigner, M.L. Efthymiou, «Toxicité des Produits de Dégradation thermique des Principaux Polymères - Données Expérimentales », Réanimation Med-Urg, pp 411-426, 1990.
- R. Peyret & T. D. Taylor, « Computational methods for fluid flow», Springer-Verlag, 1982.
- R. Richardson, « Some measurements of atmospheric turbulence » Phil. Trans. Roy. Soc., London, Ser. A, vol 221 pp 1-28, 1920.
- R. Schiestel, «Modélisation et simulation des écoulements turbulents», Hermes, 1991.
- « Relations clients-fournisseurs – Qualité des démonstrations (essais, calculs, simulations, etc.) » Lignes directrices pour demander et réaliser les calculs ou les simulations, NF X 50-141-3.
- « Relations clients-fournisseurs – Qualité des démonstrations (essais, calculs, simulations, etc.) » Bases de la démarche et choix du type de démonstration, NF X 50-141-1.
- S. Carnot, « Réflexions sur la puissance du feu et sur les machines propres à développer cette puissance», 1824.
- S. Desanghere, « Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Rouen, septembre 2006.
- S. Desanghere, D. Joyeux, A. Coppalle, «Use of a Numerical Tool to Assess the Impact of the Means of Measurement on Fire» , Communication personnelle, 2005.
- S. M. Olenick, D. J. Carpenter, «An updated international survey of computer models for fire and smoke. », Journal of Fire Protection Engineering 13, pp 87-110. 2003.
- « Software engineering – Software product – Quality – Requirements and Evaluation », Guide to Square, SquaRE ISO/IEC 25000,
- T. L. Scheilds, G.W.H. Silcock, H.A. Donegan, Y.A. Bell, «Methodological Problems Associated with the Use of the Delphi Technique», Fire Technology, vol.23, no.3 , pp.175-185, August 1987.
- T. Z. Harmaty, « Fire Severity: Basis of Fire Safety Design. In: Fire Safety of Concrete Structures», American Concrete Institute, SP-80, pp.115-149, 1983.
- T. Z. Harmaty, « Fire Safety: Science and engineering», Philadelphia: ASTM, pp 432, 1985.
- The Zone Fire Model JET: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the Presence of a Smoke Layer», Manuel de l'utilisateur, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6324, 1999.
- « Use of vapour cloud – Dispersion models», Center For Chemical Process Safety (CCPS), 2e édition. 1996.

- « Using Field Modeling to Simulate Enclosure Fires », D.W. Stroup, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second edition, ISBN 0-87765-354-2, Chapter 3.8, 1995.
- V. Ferlay, C. Picard et C. Prim, « Approche toxicologique des fumées de feux de forêts », Urgence Pratique, n° 26, p-p 21-23, 1998.
- « Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) – Recommended Practices Guide », DoD. Defense Modeling and Simulation Office, Office of the Director of Defense Research and Engineering, 1996.
- W. K. Chow, L. Yi, C. Shi, R. Huo, « Mass flow rates across layer interface in a two-layer zone model in an atrium with mechanical exhaust system », Building and Environment, pp 1198-1202, 2006.
- Y. L. Sinai, « Field modelling of a Steckler experiment: an example of the relationship between level of modelling and accuracy », 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, University of Ulster, Northern Ireland. 665-674, 2004.
- Y. Mouilleau & al., « Evaluation de l'aptitude du logiciel PHAST version 3.0 à traiter des conséquences de mise à l'atmosphère de produits inflammables et/ou toxiques ». Rapport INERIS référencé EXP-YMo-GMv-BCh/DG Z1/3 78 1310, 1991.
- Y. Mouilleau, S. Duplantier, « Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul) », (DRA-006) Ω-12, INERIS-DRA 2002-25427, Direction des Risques Accidentels Décembre 2002
- Y. Riou, « Comment estimer la dispersion des gaz lourds ? », EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Série A - Nucléaire, hydraulique, thermique n°1, pp 23-60. 1989.

Résumé

Résumé

L'augmentation du risque incendie émane de la confrontation de deux dynamiques spatiales très différentes : la dynamique des espaces combustibles ainsi que les pertes énormes qu'un incendie peut causer, ce qui rend la modélisation de ces phénomènes un véritable défi posé aux analystes. Devant l'arrivée en masse de données il devient important de fournir des modèles permettant d'exploiter ces données afin d'aider à comprendre tous les phénomènes qui rentrent en jeu. Dans ce contexte, Ce travail est consacré à faire une synthèse bibliographique sur les différents codes et modèles qui ont été développés dans le domaine d'incendie en prenant en considération, d'une part, le phénomène de dispersion des polluants dans l'atmosphère ainsi que l'apport thermique susceptible qu'il peut engendrer, pour modéliser ses effets sur l'environnement atmosphérique. Deux outils de simulation numérique avancé ont été utilisés pour étudier ces principaux phénomènes. Ce travail propose l'application de deux codes de simulation numérique ; FLUENT et ALOHA pour l'étude des effets de l'accident de Skikda sur l'environnement atmosphérique, suivie d'une étude critique des résultats des deux logiciels.

Mots clés

Modélisation numérique, incendie, modèles zone, modèles CFD, modèle intégrale, modèle gaussien, environnement, effets d'incendie, FLUENT ALOHA.

Abstract

Abstract

The fire hazard increase emanates from the confrontation of two different dynamic spaces: the combustible spaces dynamics as well as the enormous losses that a fire can cause; that makes the modelling of these phenomena a challenge to the analysts. In front of the important quantities of data, it becomes necessary to provide models to exploit these data, in order to help to understand all the phenomena of fire. In this context, this work is devoted to synthesize the literature on different codes and models that were developed in the field of fire, taking into account, on the one hand, the phenomenon of dispersion of pollutants in the atmosphere and the heat input that can likely lead to model its effects on the atmospheric environment. Tools for advanced numerical simulation were used to examine these major events. Two tools of numerical simulation were used for study each phenomena; so this work proposes the application of two numerical simulation codes, FLUENT and ALOHA for studying the effects of the accident of Skikda on the atmospheric environment.

Key words

Numerical modelling, fire, zone models, CFD models, integral model, Gaussian model, environment, fire effects, FLUENT, ALOHA.

« ...Ainsi la recherche passe par des moments durables et distincts ; intuition, aveuglement, exaltation et fièvre. Elle aboutit un jour à cette joie et connaît cette joie celui qui a passé par ces moments singuliers... »

Albert Einstein