

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

Institut d'Aéronautique et des études spatiales

Département de construction Aéronautique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN AÉRONAUTIQUE

Option : Propulsion

Thème :

*Simulation des flammes de diffusion turbulentes en
utilisant le code FDS.*

*Application: simulation du crash d'Iliouchine à
Boufarik*

Présenté par :

BOUDJEMA Khadidja

KERBAA Amira

Co-promoteur:

promoteur :

Mr.RENANE Rachid

Mr.ALLOUCHE Rachid

Promotion: 2018/2019

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener ce travail.

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à :

Mr. RENANE Rachid notre encadrant de mémoire de fin d'étude, et notre co-promoteur Mr. ALLOUCHE Rachid pour ses précieux conseils et son orientation ficelée tout au long de notre recherche.

A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Nos sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui, par leurs travaux, leurs idées, leurs présentations, leurs collaborations ou leurs relectures, ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

*A. KERBAA
K. BOUDJMA*

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

A ma chère tante

A mon cher oncle

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir

et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères Saleh, Ahmed, Anes et Imed

A mes chères sœurs Ikram, Khadidja, Duaa, Israa, Manar, Hadjer et Zineb, Asma

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma chère binôme Khadidja ,

Pour sa entente et sa sympathie.

A mes chères amies Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

KERBAA Amira

DEDICACES

A ma très chère mère

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide
et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour
affronter les différents obstacles.*

A mon très cher père

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que
ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mon très cher frère Mehdi et mes très chères sœurs Selma et Syla et
Amel*

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

*A ma chère binôme Amira,
Pour sa entente et sa sympathie.*

*A mes chères amies Pour leurs aides et supports dans les moments
difficiles.*

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime.

Merci

BOUDJEMMA KHADDOGA

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Nomenclature	ix
Résumé	1
Introduction générale	3

CHAPITRE 1 : ASPECT PHENEMENOLOGIE

1.1 Introduction	5
1.2 Définition de la combustion	5
1.3 Classification des flammes	6
1.3.1. Combustion laminaire	7
1.3.1.1. Flamme laminaire pré-mélangée	7
1.3.1.2. Flamme laminaire non pré-mélangée (de diffusion)	9
1.3.1.3. Flamme triple	10
1.4. Combustion	10
1.4.1. Combustion turbulente	10
1.4.1.1. Combustion turbulente pré-mélangée	11
1.4.1.2. Combustion turbulente non-pré-mélangée	11
1.5 . Etat de l'art	12

CHAPITRE 2 : MODELE MATHEMATIQUE

2.1. Introduction	15
2.2. Les modèles	15
2.2.1 Les équations de base	15
2.2.1.1 Equation de continuité (conservation de l'énergie)	15
2.2.1.2 Equation de NAVIER-STOKES	15
2.2.1.3. Equation de conservation de l'énergie	15

2.2.1.4. Equation d'état	18
2.2.1.5. Equation de conservation des espèces	19
2.2.2. Modèle hydrodynamique	20
2.2.3. Modèle de combustion.....	20
2.2.4. Modèle de rayonnement	22
2.3. La méthode de résolution numérique	22
2.4. Traitement de la turbulence par le modèle LES/DNS	24

CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION ET DE VISUALISATION

3. 1.FDS	25
3.1.1. Présentation du code FDS	25
3.1.2. Historique des versions	25
3.1.3 Les changements dans FDS 6	25
3.1.4. Modèle développeurs	25
3.1.5 Utilisations prévues	26
3.1.6. Caractéristiques principales du code fds	27
3.1.7. Ressource en ligne et support utilisateur	28
3.1.8. Installation sur Windows	29
3.1.9. Exécution de séries FDS sous Windows.....	29
3.1.10. Structure de FDS	29
3.1.10.1 Structure de base d'un fichier fds	30
3.1.10.2. Paramètre dans le fichier d'entrée	30
3.1.10.3. Quantités De Sortie	32
3.2. SMOKEVIEW	35
3.2 .1 Description de base de SMOKEVIEW	35
3.2.2. Historique des versions	36

3.2.3	Modèle de développement	37
3.2.4	Aperçu	38
3.2.5	Exécution de SMOKEVIEW	38
3.3.	PyroSim	40
3.3.1.	Introduction	40
3.3.2.	Télécharger et installer	41
3.3.3.	Quelques suggestions de modélisation	41
3.3.4.	FDS s'enclenche dans le maillage	41
3.3.5.	Utilisation d'un exécutable FDS différent	42
3.3.6.	Interface PYROSIM	42

CHAPITRE 4 : SIMULATION DE CRASH DE BOUFARIK

4.1.	Introduction	46
4.2.	Définition des conditions initiales et aux limites	46
4.2.1.	Les conditions atmosphériques du crash	46
4.2.2	La réaction de combustion	47
4.2.3	Conditions initiales et aux limites	47
4.3.	Scenari	48
4.4.	Expérience de BLEVE (boilingliquid expanding vapor explosion	49
4.5.	Etude de sensibilité de maillage	50
4.6.	Etude de sensibilité de capteur	52
4.7.	Simulation avec le FDS	54
4.7.1.	Simulation de crash	54
4.7.1.1.	Le domaine de calcul	54
4.7.1.2.	La géométrie	54
4.7.1.3.	Les matériaux	55
4.7.2.	Simulation de BLEVE	56

4.7.2.1	Domaine de calcul et la géométrie	56
4.7.2.2	Les matériaux	57
4.8	Affichage du Smokeview	59
4.8.1	Simulation de pourcentage de la fumée dans l'air	60
4.9	Détermination de la fonction de vitesse de flamme	62
4.9.1	Détermination de la fonction de vitesse verticale	62
4.9.2	Détermination de la fonction de vitesse radiale	64
4.9.3	Comparaison entre le diamètre max de BLEVE et de ballon de feu de crash	65

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET COMMENTAIRES

5.1	Introduction	67
5.2	Analyse de la sensibilité de maillage	67
5.3	Analyse de la sensibilité de capteurs	67
5.4	Commentaire sur la fonction de vitesse verticale	72
5.5	Commentaire sur la fonction de vitesse radiale	74
5.6	Comparaison entre BLEVE et le ballon de feu de crash	77
5.6.1	Comparaison entre la simulation de BLEVE et du crash	77
5.6.2	Analyse de Comparaison entre le diamètre de BLEVE et du ballon de crash	80
	Conclusion Générale	82
	Perspectives	83
	Références	84

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Figure	Titre	Page
Figure 1.1	La flamme.	6
Figure 1.2	Classification des types des flammes.	7
Figure 1.3	La Structure d'une Flamme Laminaire Et Pré-mélange.	8
Figure 1.4	Strucrure et profil de flammelaminaire de diffusion.	9
Figure 1.5	La Structure d'une Flamme Triple.	10
Figure 1.6	Effet De Turbulences Sur l'étirement Du Front De Flamme	10
Figure 1.7	Résume la classification des types de la combustion	12

Chapitre 2 :

Figure	Titre	Page
Figure 2.1	Maillage à grille décalée.	23

Chapitre 3 :

Figure	Titre	Page
Figure 3.1	Les donnée principale de code FDS.	29
Figure 3.2	Les fonctions de base de FDS.	34
Figure 3.3	Le fichier d'entré de code FDS.	43
Figure 3.4	L'exécution de fichier d'entré.	44
Figure 3.5	Visualisation des données et des résultats avec le PyroSim.	45

Chapitre 4 :

Figure	Titre	page
Figure 4.1	Les courbes de température pour trois différentes positions et trois maillages en fonction de temps.	51
Figure 4.2	la courbe de température (24, 0, 14.76) en fonction de temps.	53
Figure 4.3	la géométrie de Iliouchine-76 dessin schématique et simulation par FDS.	54
Figure 4.4	la simulation sans l'effet de suie à $t=0.5s$.	55
Figure 4.5	la simulation avec l'effet de suie à $t=0.5s$.	56
Figure 4.6	la géométrie utilisée pour le BLEVE.	56
Figure 4.7	Le fichier d'entrée de BLEVE.	58
Figure 4.8	La simulation sans l'effet la suie à $t=0.9s$	58
Figure 4.9	La simulation avec l'effet de suie à $t=0.9s$.	58
Figure 4.10	la vision de la fumée pour des différents instants avec SMV.	59
Figure 4.11	pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe x.	60
Figure4.12	pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe y.	61
Figure 4.13	pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe z.	61
Figure 4.14	Les courbes des diamètres de BEVE et de ballon de crash en fonction de temps.	63
Figure 4.15	l'exécution de programme pour la vitesse verticale.	63
Figure 4.16	l'exécution de programme pour la vitesse radiale.	64
Figure 4.17	Les courbes des diamètres de BLEVE et de ballon de crash en fonction de temps.	66

Chapitre 5 :

Figure	Titre	page
Figure 5.1	profils de température pour la position 30m mais différents capteurs.	69
Figure 5.2	le profil de température pour différents instants avec SMV.	70
Figure 5.3	la plage de vitesse avec PyroSim.	71
Figure 5.4	la vitesse verticale pour les deux méthodes.	72
Figure 5.5	la vitesse verticale pour les deux méthodes.	74
Figure 5.6	la vitesse radiale pour les deux méthodes.	75
Figure 5.7	la vitesse radiale pour les deux méthodes.	76
Figure5.8	profil de température de crash avec SMV.	78
Figure5.9	profil de température de BLEVE avec SMV.	79
Figure5.10	le flux net de crash par SMV.	79
Figure5.11	le flux net de BLEVE avec SMV	80

LISTE DES TABLES

Chapitre 3 :

Tableau	Titre	Page
Tableau 3.1	Les caractéristiques principales de FDS.	28

Chapitre 4 :

Tableau	Titre	Page
Table 4.1	Temps de simulation pour chaque maillage.	50
Table 4.2	Vitesse de flamme en 3 positions pour le premier maillage.	52
Table 4.3	Vitesse de flamme en 3 positions pour le deuxième maillage.	53
Table 4.4	Vitesse de flamme en 3 positions pour le troisième maillage.	53
Table 4.5	Les propriétés de matériaux utilisés dans la simulation.	55
Table 4.6	Les propriétés de matériaux utilisés dans la simulation.	57
Table 4.7	les propriétés de matériaux utilisés dans la simulation.	58
Table 4.8	les valeurs de vitesse verticale en fonction de position.	62
Table 4.9	les valeurs de la vitesse radiale en fonction de rayon.	64
Table 4.10	l'évolution de diamètre de BLEVE en fonction de temps.	65
Table 4.11	l'évolution de diamètre de ballon de crash en fonction de temps.	65
Table 4.12	le diamètre de notre BLEVE en fonction de temps.	65

Chapitre 5 :

Table	Titre	page
Table 5.1	notions sur le premier maillage.	67
Table 5.2	notions sur le deuxième maillage.	67
Table 5.3	notions sur le troisième maillage.	68
Table 5.4	la géométrie de l'avion Iliouchine IL-76.	68

Table 5.5	les valeurs de vitesse pour la position 30m de différents capteurs.	69
Table 5.6	les valeurs de vitesse verticales par les deux méthodes.	72
Table 5.7	les valeurs de vitesse verticale par les deux méthodes.	73
Table 5.8	les valeurs de vitesse radiale par les deux méthodes.	74
Table 5.9	les valeurs de vitesse radiale par les deux méthodes.	76

LES ABREVIATIONS

symbole	Définition
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CFD	Computational fluid dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FDS	Fire Dynamics simulator
HRR	Taux de dégagement de chaleur
HVAC	heating, ventilation and air-conditioning
IL-76	Iliouchine-76
LES	large Eddy Simulation
NIST	National Institute of Standards and Technology
SFPE	Société professionnelle d'ingénierie de protection contre les incendies
VIT	Technical Research Centre de Finlande
LES	Large eddy simulator
SMV	Smokeview

Résumé

Ce travail est une contribution à la simulation de crash d'Iliouchine à Boufarik. Pour atteindre cet objectif, on va utiliser un outil de simulation à grande échelle, c'est le code FDS-v6-5-3 qui utilise le concept LES (Large Eddy Simulation) et résolvent numériquement une forme des équations de Navier-Stokes adaptées aux débits à faible vitesse ($Ma < 0,3$), en mettant l'accent sur le transport de fumée et de chaleur à partir d'incendies. Pour bien comprendre le phénomène étudié on doit visualiser les résultats obtenu avec deux logiciels de visualisation qui sont le **SMOKEVIEW** et le PyroSim. A l'instant d'impact une boule de feu se forme, et notre objectif est de déterminer les différentes paramètres de combustion à savoir le rayon de cette boule, la vitesse de propagation de feu et de fumée. Parmi les outils utilisés dans ce travail on cite le langage de propagation Fortran et le logiciel de présentation des résultats **Tecplot**.

Mot clés : Combustion, LES, FDS, propagation feu et fumé, rayon de boule.

Abstract:

This work is a contribution to the Iliouchine crash simulation at Boufarik. To achieve this goal, we will use a large-scale simulation tool, it is the FDS-v6-5-3 code that uses the LES (Large Eddy Simulation) concept and numerically solves a form of adapted Navier-Stokes equations. At low velocities ($Ma < 0.3$), with a focus on transporting smoke and heat from fires. To fully understand the phenomenon studied we must visualize the results obtained with two visualization software that are the SMOKEVIEW and the PyroSim. At the moment of impact a fireball is formed, and our goal is to determine the different combustion parameters, namely the radius of this ball, the speed of fire and smoke. Among the tools used in this work are the Fortran propagation language and the Tecplot results presentation software.

Keys words : Combustion, LES, FDS, fire and smoke spread, ball radius.

ملخص

هذا العمل هو مساهمة في محاكاة حادث الإليوشين في بوفاريك. لتحقيق هذا الهدف، سوف نستخدم أداة محاكاة واسعة النطاق، وهو الكود FDS-v6-5-3 الذي يستخدم مفهوم LES (محاكاة Eddy كبيرة) ويحل عددًا من أشكال معادلات Navier-Stokes المعدلة بسرعات منخفضة ($Ma < 0.3$)، مع التركيز على نقل الدخان والحرارة من الحرائق. لفهم الظاهرة المدروسة تمامًا، يجب علينا تصور النتائج التي تم الحصول عليها من خلال برنامجين للتصور هما SMOKEVIEW و PyroSim. في لحظة التأثير، يتم تشكل كرة نارية، وهدفنا هو تحديد معايير الاحتراق المختلفة، أي

نصف قطر هذه الكرة، وسرعة النار والدخان. من بين الأدوات المستخدمة في هذا العمل برنامج Fortran و برنامج عرض نتائج Tecplot.

الكلمات المفتاحية: الاحتراق ، LES ، FDS ، انتشار الحرائق والدخان ، نصف قطر الكرة.

INTRODUCTION GENERALE

Après crash Boufarik du 11 Avril 2018, il apparut clairement que l'impact d'un avion de ligne militaire à très grande vitesse touchant une ferme ou un quartier résidentiel ne pouvait plus être exclu en tant que danger externe potentiel menaçant la sûreté et la sécurité des individus et des installations. L'une des conséquences potentielles de cet impact est la survenue d'une balle, suffisamment grande pour englober toute la ferme ou tout le quartier.

Un incendie est un feu violent et destructeur pour les activités humaines ou la nature est une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace.

Les incendies ont souvent des débuts modestes qui restent dangereux d'où la possibilité de propagation qui se fait par transmission de la chaleur (rayonnement, conduction, convection) et par déplacement de substances en combustion (solide, liquide, gaz).

La combustion est un phénomène extrêmement répandu dans la nature, et c'est grâce à elle, en majeure partie, que l'activité humaine a pu se développer et se développe encore. Dans l'antiquité et jusqu'au moyen âge, le feu était même considéré comme l'un des quatre éléments de base de la vie quotidienne. C'est ce qui nous fait dire que l'étude et la compréhension de la combustion et le feu est un intérêt tout à fait important.

Mais qu'est-ce que le feu, qu'est-ce que la combustion, qu'est-ce qu'une flamme? Il a fallu assez longtemps, dans l'histoire de la connaissance scientifique, pour le comprendre. A l'heure actuelle, de nombreux dispositifs industriels en tirent parti, mais quelquefois leur maîtrise parfaite fait encore défaut. Ces difficultés de compréhension viennent du fait que plusieurs phénomènes physiques et chimiques assez différents interviennent conjointement, et de façon couplée, dans ce que l'on appelle le feu.

Ce travail est une contribution à l'étude de l'incendie d'un avion militaire **IL-76** après son crash dans un champ, et la détermination des paramètres de contrôle de la combustion à savoir, la température et la vitesse de propagation de feu et de fumée. Cette étude est présentée en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur l'incendie et la combustion ainsi que la classification des flammes et afin de passer en revue les différentes simulations qui sont réalisées avec le code **FDS**.

Dans le deuxième chapitre, nous avons passé en revue à la modélisation mathématique qui est basée sur les équations de la dynamique des fluides et la résolution numérique de ces équations.

Le troisième chapitre est consacré à la description des outils ; un pour la simulation numérique qui est **FDS** et deux autres pour la visualisation des résultats de cette simulation qui sont **Smokeview** et **PyroSim**.

Dans le chapitre quatre, on parle du crash de Boufarik et on expose le travail et les étapes de simulation réalisée à l'aide de logiciel **FDS** qui est disponible librement sur le site web du **NIST**.

Dans le chapitre cinq on présente les différents résultats obtenus par notre étude avec des interprétations détaillées.

Enfin, on termine par une conclusion générale faisant apparaître l'intérêt du sujet et les perspectives recommandées.

Chapitre 1 :

Aspect phéménologique

CHAPITRE 1 : ASPECT PHENEMENOLOGIE

1.1.Introduction :

La combustion est un phénomène extrêmement répandu dans la nature, et c'est grâce à elle, en majeure partie, que l'activité humaine a pu se développer et se développe encore. Dans l'antiquité et jusqu'au moyen âge, le feu était même considéré comme l'un des quatre éléments de base de la vie quotidienne. C'est ce qui nous fait dire que l'étude et la compréhension de la combustion et le feu est un intérêt tout à fait important. Dans ce contexte qu'est-ce que le feu, qu'est-ce que la combustion, qu'est-ce qu'une flamme?

1.2.Définition de la combustion :

La combustion est une réaction chimique, globalement exothermique, relativement lente au début mais pouvant devenir très rapide voire même violente, avec émission de rayonnements et élévation de température. Pour les combustibles usuels qui sont en général des produits carbonés d'origine organique.

Cette réaction ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en proportion suffisante. On représente de façon symbolique cette association par le triangle du feu.

Le combustible peut être: un gaz (Au niveau microscopique, on décrit un gaz comme un ensemble d'atomes ou de molécules très faiblement liés) (butane, propane, gaz de ville, dihydrogène...), un liquide (La phase liquide est un état de la matière) (essence, gasoil, huile, kérosène...), un solide (bois, papier, carton, tissu, plastique...). Ce peut être un mélange de différents corps. (Un mélange est une réunion de deux ou plusieurs substances)

Le comburant est l'autre réactif de la réaction chimique. Souvent, il s'agit de l'air ambiant, et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux, le dioxygène. En privant un feu d'air, on l'éteint; à l'inverse, si l'on souffle sur un feu de bois, cela l'active. Dans certains chalumeaux, on apporte du dioxygène pur pour améliorer la combustion. Dans certains cas très particuliers (souvent explosifs), le comburant et le combustible sont un seul et même corps.

1.3. Classification des flammes :

Les flammes nous fascinent par leur côté mystérieux et magique. Colorées, lumineuses et variantes, elles sont à la fois puissantes et fragiles, capables de détruire des villes entières et de s'éteindre par simple manque d'oxygène. Les caractéristiques des flammes sont nombreuses et complexes, c'est pourquoi ce paragraphe traitera seulement l'une de leurs principales caractéristiques ; leur nature et structure. Il existe plusieurs modèles de classification des flammes étudiées dans des domaines tels que la thermodynamique et la mécanique des fluides.

Nous nous limitons ici à une classification en fonction de la structure et du mélange réactionnel des flammes. Les flammes qui brûlent à l'air libre et dont le mélange oxydant-combustible se fait pendant la combustion sont appelées flammes de diffusion et celles dont le mélange oxydant-combustible est réalisé avant la combustion sont appelées flammes de pré-mélange (ou pré-mixées). Dans ces deux types de flammes, l'écoulement peut être turbulent ou laminaire. Dans un incendie, les flammes naturelles que l'on voit sont habituellement turbulentes. La figure (1.2) illustre une classification des types de flammes en fonction de leur structure et de leur mélange réactionnel.



Figure 1.1 : la flamme.

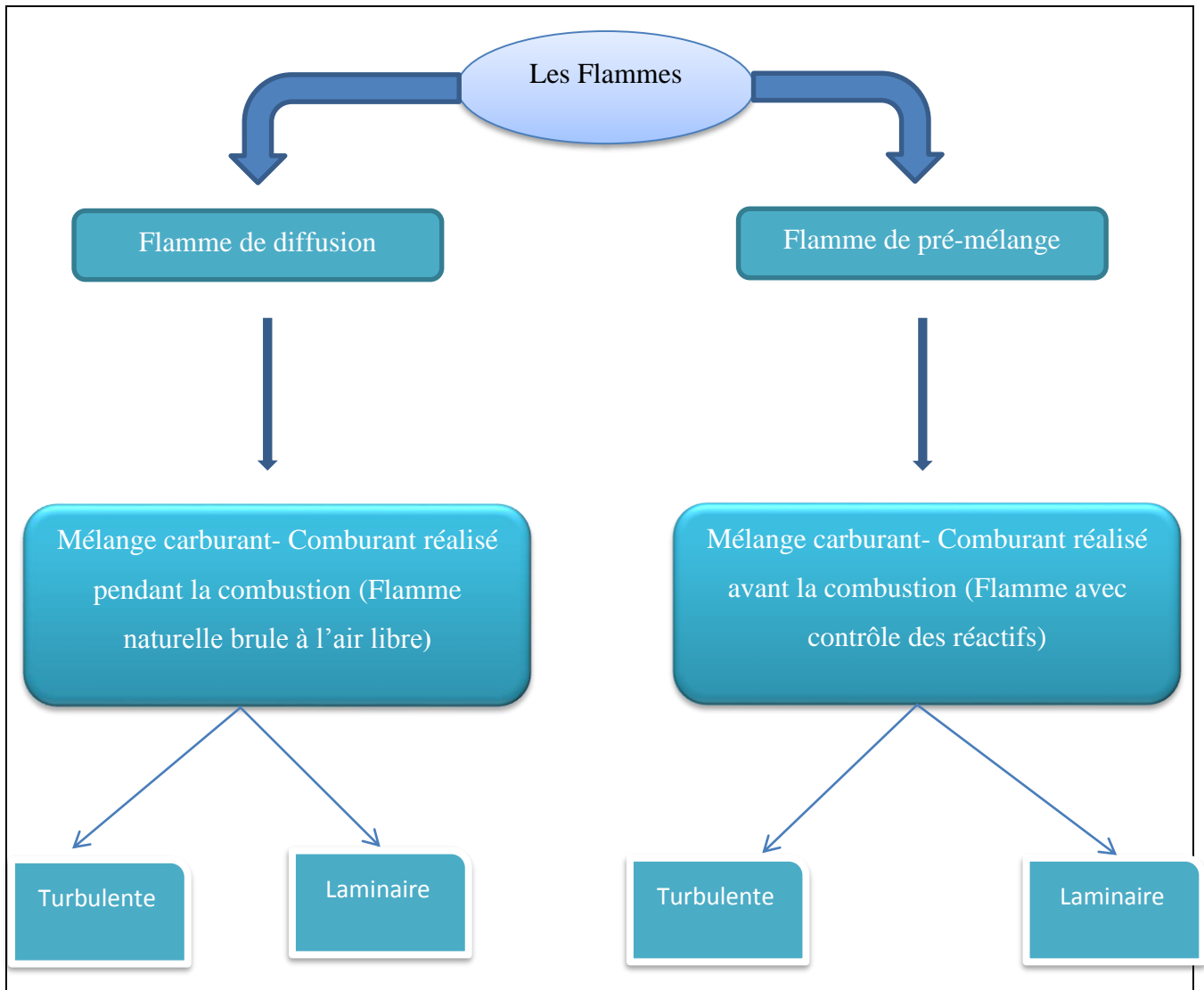


Figure 1.2 : Classification des types des flammes.

1.3.1. Combustion laminaire :

On considère les flammes en milieu laminaire, c'est à dire en milieu où les échanges par diffusion turbulente sont très faibles avec un coefficient de frottement élevé. La compréhension de la structure de ces flammes est cependant fondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses applications industrielles.

1.3.1.1. Flamme laminaire pré-mélangée :

Dans les flammes pré-mélangées, les réactifs; combustible et carburant, sont mélangés avant la zone de réaction, la propagation de la flamme est le résultat d'une opération composée de deux phénomènes.

- ❖ Un préchauffage qui se fait par conduction thermique sur une épaisseur δ_p où les réactions chimiques sont inexistantes et les phénomènes convectifs et à diffusion de masse et de chaleur sont prépondérants.
- ❖ Arrivant à un certain niveau de température, les gaz réagissent en dégageant de la chaleur, c'est la zone de réaction qui se déroule sur une épaisseur δ_r . L'échauffement se fait sur une épaisseur δ_L que l'on appelle épaisseur de la flamme laminaire et qui peut être assimilée à la distance parcourue par la chaleur libérée par réaction pendant le temps τ_c que dure cette réaction. La structure de la flamme plane laminaire de pré-mélange dans un repère lié à la flamme est donnée par les figures (I.3).

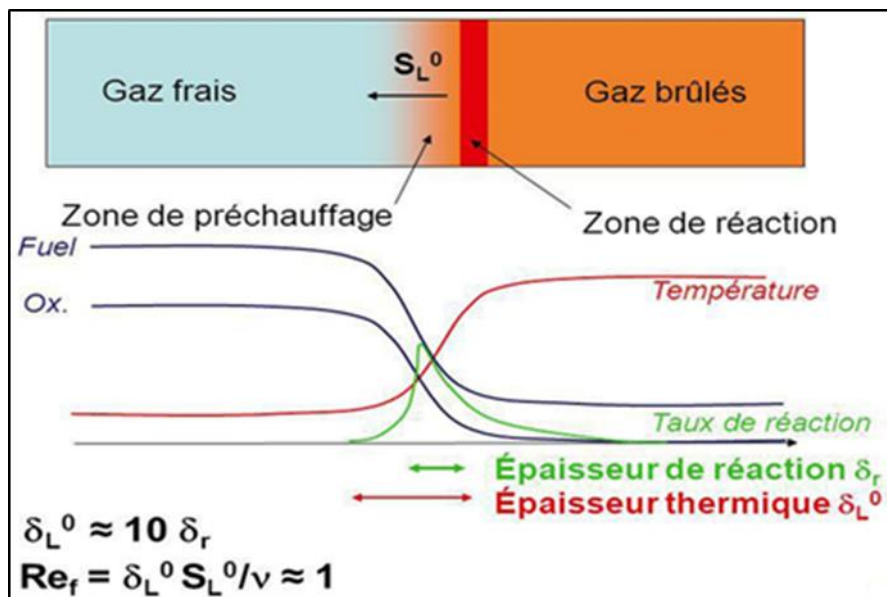


Figure 1.3 : La structure d'une flamme laminaire et pré-mélange.

Ainsi, en faisant intervenir le coefficient de diffusion thermique D_{th} l'épaisseur de la flamme s'exprime sous la forme :

$$\delta_L = (D_{th} \tau_c)^{0.5} \quad (1.1)$$

Ces zones se déplacent dans le milieu à une vitesse de propagation perpendiculaire au front de flamme que l'on appelle vitesse de flamme laminaire et que l'on note U_L . Cette vitesse dépend de différents paramètres (nature des réactifs, richesse des mélanges et température des gaz frais), elle est de l'ordre de 0.1 à 1 m/s.

Le raisonnement précédent nous montre que le front de flamme progresse de δ_L pendant le temps τ_c , U_L peut être définie par la relation:

$$U_L = \frac{\delta_L}{\tau_c} = \left(\frac{D_{th}}{\tau_c} \right)^{0.5} \quad (1.2)$$

1.3.1.2. Flamme laminaire non pré-mélangée (de diffusion) :

Dans de nombreux systèmes pratiques où le combustible et le comburant sont injectés séparément dans la zone de réaction, sans pré-mélange initial. La combustion est alors contrôlée non seulement par la réaction chimique mais aussi par le transport diffusif des réactifs l'un vers l'autre, d'où le nom de flamme de diffusion. Dans ce type de flamme, les réactions chimiques sont très rapides, comparées aux phénomènes de convection et la combustion est contrôlée par la diffusion des espèces et de la chaleur. Les réactifs et la chaleur diffusent les uns vers les autres, c'est ce qui va prendre le plus de temps avant de pouvoir réagir.

La caractéristique principale dite de diffusion consiste à présenter une zone de réaction séparant les réactifs (combustible et oxydant). Les profils des réactions massiques et de température sont présentés sur la figure (1.4). Comme les flammes de pré-mélange, les flammes de diffusion se développent grâce aux phénomènes de réaction ainsi que les phénomènes de diffusion de chaleur et de masse qui se produisent de part et d'autre de la zone réactive. Les phénomènes de convection jouent cependant un rôle plus important en amenant les réactifs et en emportant les produits de façon plus efficace que la seule diffusion. Pour que la flamme reste laminaire, il faut que les vitesses d'écoulement ne soient pas trop grandes.

Ces deux genres de flammes ont fait l'objet d'un grand nombre d'études aussi bien numériques qu'expérimentales.

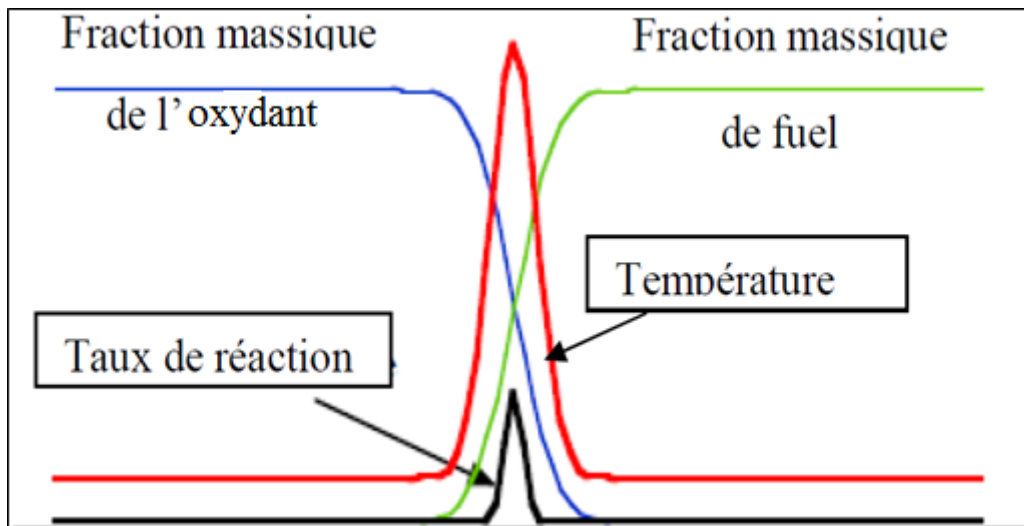


Figure 1.4 :Structure et profil de flammelaminaire de diffusion.

1.3.1.3. Flamme triple :

La flamme triple est constituée (fig.I.5) de la flamme pré-mélangée qui est à son tour constituée de deux branches; une branche riche en combustible (du côté de l'écoulement du combustible) et une branche pauvre (coté oxydant), et en aval se développe la flamme de diffusion.

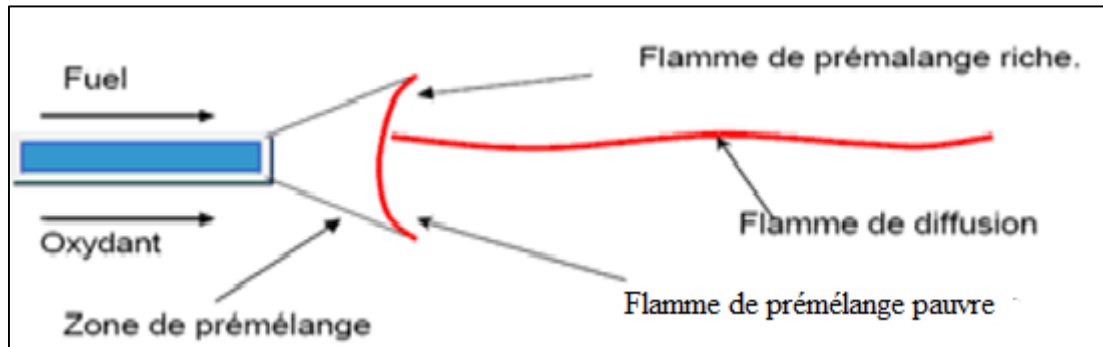


Figure 1.5: la structure d'une flamme triple.

1.4. Combustion

1.4.1. Combustion turbulente :

La structure interne d'une flamme turbulente est considérée comme étant une flamme laminaire très fine plissée et rapidement convectée par la turbulence, de telle sorte que la zone de flamme apparaisse épaisse à l'œil nu. En fait, cette façon de représenter la structure interne d'une flamme turbulente n'est pertinente que si la taille des plus petits tourbillons créés par la turbulence, est plus grande que l'épaisseur de la flamme laminaire, empêchant ainsi les tourbillons de pénétrer dans cette dernière. On obtient une classification relativement simple des structures de flammes turbulentes en comparant les longueurs et les temps caractéristiques de la turbulence à la longueur et au temps caractéristiques des flammes laminaires. Le taux de dégagement de chaleur et la structure de la flamme changent, selon des temps caractéristiques, qui sont souvent le temps de la réaction chimique t_c et le temps de fluctuation de l'écoulement t_t . Lorsque le mélange est soumis à un mouvement turbulent intense, on constate une expansion et une contraction du front de flamme.

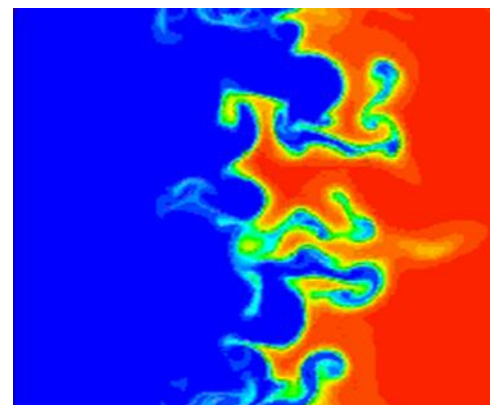


figure 1-6 : Effet de turbulences sur l'étirement du front de flamme

Ce n'est que dans les années 40 qu'on a commencé à étudier sérieusement les flammes turbulentes avec des travaux théoriques et expérimentaux. Damkôhler par exemple a montré l'influence du nombre de Reynolds sur la vitesse de la flamme en régime turbulent et l'effet de la géométrie a été exploré. Hoteli et Hawthorne, en 1949 ont montré que la longueur d'une flamme de diffusion turbulente ne dépend pas de la vitesse d'arrivée des gaz alors que celle d'une flamme de diffusion laminaire est proportionnelle à celle-ci. .

Kuo et al ont considéré dans leur approche que l'échelle temporelle associée à la flamme turbulente est différente de celle de la flamme laminaire. Lorsqu'il s'agit d'une flamme pré-mélangée, le rapport de la viscosité cinématique moyenne du fluide au temps global de combustion est proportionnel à la vitesse de propagation de la flamme laminaire du mélange considéré, et le produit de la viscosité cinématique moyenne du fluide avec le temps global de combustion est proportionnel à l'épaisseur caractéristique de cette dernière.

1.4.1.1. Combustion turbulente pré-mélangée :

La classification des régimes de combustion turbulente des flammes de pré-mélange remonte à Damkôhler (1940) qui adopta l'idée qu'une turbulence à grande échelle ne fait que plisser la flamme laminaire sans modification significative de sa structure interne, alors qu'une turbulence à petite échelle affecte les processus de transfert dans la structure interne de la flamme laminaire. D'après Damkôhler, les frontières des régimes de combustion turbulente sont identifiables à l'aide, par exemple, de comparaisons entre les échelles spatiales de la turbulence et l'épaisseur de la flamme laminaire.

1.4.1.2. Combustion turbulente non-pré-mélangée :

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que deux nombres sans dimensions (un rapport de vitesse et un rapport de longueur) sont suffisants pour caractériser un régime de combustion turbulente pour les flammes pré-mélangées. Le problème est plus délicat pour les flammes non-pré-mélangées essentiellement parce qu'il est difficile de définir une échelle de longueur pour ces flammes.

On peut résumer les classifications pour la combustion turbulente non-pré-mélangée disponibles dans la littérature en deux groupes : celles qui utilisent les paramètres (Reynolds, Damkôhler). (Libby Williams 1994) et celles travaillant avec le couple (Fluctuations. fraction de mélange, Damkôhler) (Bray et Peters.1994). Lorsque la turbulence n'est pas trop forte, la structure de la flamme de diffusion est celle d'une flamme plissée, elle est alors constituée d'une longue

flammelette continuellement plissée, étirée et comprimée alternativement par les mouvements turbulents, c'est la classification (Reynolds. Damkôhler).

La figure (1.7) ci-dessous résume la classification des types de la combustion :

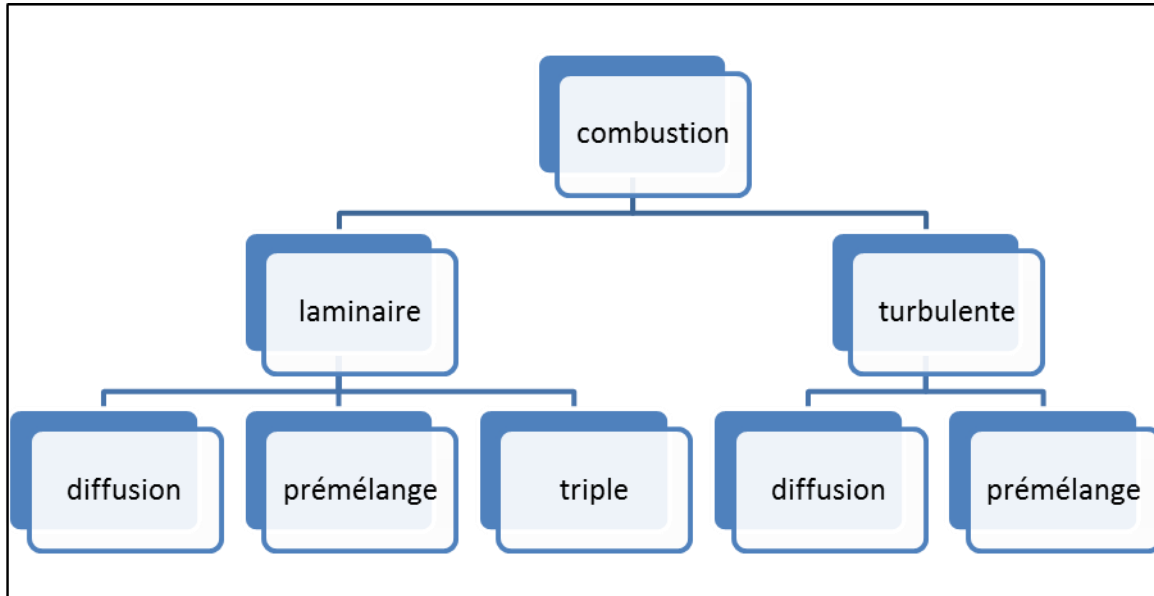


Figure 1.7 : La classification des types de la combustion.

1.5. Etat de l'art :

A. Simulation FDS de la boule de feu de carburant provenant d'un accident d'avion de ligne commerciale hypothétique sur une centrale nucléaire générique [Wolfgang Luther, W. Christoph Müller]: À la suite des événements du 11 septembre 2001, il est devenu évident que l'impact d'un avion de ligne commerciale volant à grande vitesse touchant la centrale nucléaire ne pouvait plus être exclu en tant que danger externe potentiel menaçant la sécurité de la centrale nucléaire. L'une des conséquences de l'impact est la survenue d'une boule de feu, suffisamment grande pour englober l'ensemble de la centrale nucléaire. Les connaissances sur les boules de feu résultant d'accidents aériens sont plutôt médiocres, car elles ne sont basées que sur des images filmées par hasard. Des examens physiques et chimiques minutieux fondés sur les principes de base ont permis de conclure que la physique et la chimie de la boule de feu au kérosène sont similaires à celles de la boule de feu BLEVE dans les accidents de réservoirs d'essence étudiés au cours des dernières décennies. Les connaissances tirées de ces analyses peuvent s'appliquer à l'analyse par boule de feu en cas d'impact aérien.

- B. Analyse de la fraction de mélange des produits de combustion dans la couche supérieure des incendies de compartiment à échelle réduite :** Une analyse de la fraction de mélange est réalisée pour étudier les caractéristiques de la production d'espèces chimiques dans les incendies de compartiments enfumés alimentant des combustibles hydrocarbonés à phase condensée. Une série d'expériences au feu ont été menées dans un compartiment à l'échelle des 2/5 sur la base du local ISO-9705. Espèces de gaz et suie les mesures ont été effectuées à deux endroits dans la couche supérieure du compartiment. L'heptane, le toluène et le polystyrène, générés par les combustibles considérés, génèrent des incendies très enfumés dans diverses conditions de ventilation naturelle.
- C. Modélisation de la contamination de champ proche et lointain dans une enceinte à grande échelle** [Noah L. Ryder *, Christopher F. Schemel, Sean P. Jankiewicz]: Ce travail ait été fait pour examiner les niveaux de contamination accumulés dans une enceinte quelque temps après un incident. Ce phénomène revêt une grande importance si l'on considère les conséquences liées à une contamination même faible de matériaux sensibles, tels que les aliments, les produits pharmaceutiques, les vêtements, le matériel électrique, etc. des endroits destinataires lointains à risque.
- D. Utilisation de la simulation dynamique du feu (FDS) pour reconstruire une scène d'incendie criminel :** La reconstruction de la scène d'un incendie aide les enquêteurs à identifier le comportement du feu dans un espace spécifique. Un logiciel de dynamique des fluides (CFD) peut fournir des preuves pour une enquête sur un incendie. Cette méthode de simulation peut reproduire la scène de l'incendie, reconstruire les processus d'incendie, expliquer l'évolution du feu et démontrer le mouvement de la fumée en décrivant la configuration du combustible, effets de la ventilation, de la conception du bâtiment, de l'impact des systèmes manuels ou automatiques et de la source d'incendie. Comparer les résultats de la simulation avec les collections d'investigation, nous pouvons obtenir plus de preuves du développement du feu et de la fumée. Ce papier utilisait **FDS** (Version 4.0.5), en particulier en utilisant le traitement parallèle [McGrattan et Forney. Simulateur de dynamique d'incendie (version 4.05) - Guide de l'utilisateur. Institut national de Standards and Technology, Maryland, 2005. p. 7.] approche, pour simuler un incendie criminel dans un hôtel à Taiwan. Ses résultats ont démontré une bonne prévision du développement du feu et du mouvement de la fumée en comparant les preuves de combustion de la scène et la description des personnes évacuées. Cet article fournit également une application de la simulation du feu dans les enquêtes sur les lieux de l'incendie.

E. Validation de FDS pour la prévision des incendies d'une enceinte de taille moyenne :

Un simulateur de dynamique de feu (**FDS**) a été appliqué pour simuler un feu d'un réservoir de méthanol à moyenne échelle. La simulation utilisée principalement les caractéristiques existantes dans les **FDS**, à l'exception d'un modèle de combustion supplémentaire à l'échelle du sous-réseau, basé sur l'approche flamande laminaire de Cook.

AW et Riley JJ [Combust and Flame 1998; 112: 593–606] ont été utilisés parallèlement au modèle de combustion par fraction de mélange par défaut pour Comparaison. Les prédictions des deux modèles de combustion différents pour les distributions de température et de vitesse axiale se sont avérées être accord relativement bon les uns avec les autres et avec les données expérimentales. La nature pulsée de l'entraînement de l'air a été démontrée par les fluctuations de vitesse de l'entraînement de l'air et les vecteurs de vitesse instantanés, qui ont révélé la formation et la formation de tourbillons et le bien connu "encaissement" à une distance d'environ un diamètre de la surface du bassin. . Les variations prévues de l'entraînement de l'air à différentes hauteurs concordaient bien avec certaines données publiées et leur corrélation. Bien que la limitation du code dans la prévision de la fréquence de gonflement ait été constatée car le spectre des fluctuations de température ne permettait de démontrer aucune fréquence dominante, la présente étude a démontré la capacité du **FDS** à fournir des prévisions fiables sur les paramètres les plus importants des feux en nappe.

Chapitre 2 :

Modèle mathématique

CHAPITRE 2 : MODELE MATHEMATIQUE

2.1 INTRODUCTION :

La notion de modèle en mathématiques se présente sous un double aspect : d'une part, les mathématiques permettent de modéliser, c'est-à-dire de représenter, toutes sortes de situations, d'objets et de structures du monde réel, l'étude mathématique ou les simulations informatiques de ces représentations nous informant – lorsque les représentations sont bonnes – sur le monde réel ; d'autre part, une notion précise et formelle de modèle est définie et étudiée en logique mathématique par la *théorie des modèles*, ce qui établit un lien précis entre objets syntaxiques (les formules) et structures mathématiques, puis produit sous la forme de théorèmes toutes sortes d'informations sur la nature de ce lien, le tout constituant une théorie abstraite de l'activité de modélisation au sens précédent.[1]

2.2 LES MODELES :

2.2.1 LES EQUATIONS DE BASE :

2.2.1.1 EQUATION DE CONTINUTE (CONSERVATION DE LA MASSE) :

On considère un alors élément de volume parallélépipédique $dV = dx dy dz$ dont la masse est proportionnelle à la masse volumique du fluide et vaut donc: $m = \rho dV$. De manière générique, la variation de masse pendant le temps dt peut se formuler :

$$dm = \frac{\partial m}{\partial t} dt = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV dt \quad (2.1)$$

Par ailleurs, cette variation de masse peut être identifiée à la somme algébrique des débits traversant les 6 faces du parallélépipède. Considérons dans un premier temps l'ensemble des débits traversant les 6 faces du parallélépipède. Le vecteur vitesse présente 3 composantes étant chacune perpendiculaire à 2 des 6 faces.[2]

A travers les deux faces perpendiculaires à l'axe Y, le bilan de masse pendant le temps dt s'exprime :

$$dm_y = +[\rho V]_y dx dz dt - [\rho v]_{y+dy} dx dz dt \quad (2.2)$$

Un développement limité au premier ordre conduit à :

$$[\rho v]_{y+dy} = [\rho v]_y + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \Rightarrow dm_y = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz dt \quad (2.3)$$

Par analogie, selon les deux autres directions on trouve :

$$dm_x = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} dx dy dz dt \text{ et } dm_z = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} dx dy dz dt \quad (2.4)$$

Par conséquent, la variation de masse due aux débits massiques à travers les 6 faces se formule :

$$dm_x + dm_y + dm_z = -\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right) dV dt = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) dV dt \quad (2.5)$$

On les notera q_v et on pourra leur affecter des valeurs positives (sources) ou négatives (puits). Ainsi, le bilan de masse pendant le temps dt créée ou détruite à l'intérieur du volume dV s'exprime :

$$\sum_i \rho q_v dV dt \quad (2.6)$$

Il résulte de la prise en compte de ces différents termes la formulation suivante de la variation de masse du volume dV pendant le temps dt :

$$dm = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV dt = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) dV dt + \sum_i \rho q_v dV dt \quad (2.7)$$

Qui, après simplification par dV et dt , est ramenée à une équation locale connue sous l'appellation d'**équation de continuité** :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = \sum_i \rho q_v \quad (2.8)$$

2.2.1.2 EQUATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT:

Cette équation découle de la relation fondamentale de la dynamique, la deuxième loi de Newton :

$$\frac{D\vec{P}}{Dt} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (2.9)$$

Appliquons cette équation à notre modèle qui est dans ce cas un volume de contrôle mobile avec la même vitesse de l'écoulement. \vec{P} représente la quantité de mouvement du fluide contenu dans ce volume :

$$\vec{P} = \int_r \rho \vec{P} d\mathcal{r} \rightarrow \frac{D\vec{P}}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_r \rho \vec{V} d\mathcal{r} \quad (2.10)$$

On obtient :

$$\frac{D}{Dt} \int_{\mathcal{r}} \rho \vec{V} d\mathcal{r} = \int_{\mathcal{r}} \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} d\mathcal{r} + \int_S \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.11)$$

Avec : $\vec{F}_{ext} = \vec{F}_V + \vec{F}_S$

- Les forces de volume : \vec{F}_V
- Les forces de surface : \vec{F}_S

Ces forces ont respectivement les expressions suivantes :

$$\vec{F}_V = \int_{\mathcal{r}} \rho \vec{f}_m d\mathcal{r}$$

$$\vec{F}_S = \int_S \vec{T}(\vec{n}) dS$$

- \vec{f}_m La force par unité de masse.
- $\vec{T}(\vec{n})$ Le vecteur contraint, on peut exprimer ce

vecteur de contrainte à l'aide du tenseur des contraintes $\bar{\bar{T}}$ comme suit :

$$\vec{T}(\vec{n}) = \bar{\bar{T}} \cdot \vec{n}$$

Et le tenseur des contraintes s'exprime :

$$\bar{\bar{T}} = -p\bar{\bar{I}} + \tau$$

- $p\bar{\bar{I}}$ Contraintes associées à la pression.
- τ Contraintes visqueuses.

- $\bar{\bar{I}}$ Est le tenseur unité. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Ainsi, l'équation de quantité de mv t sous forme intégrale peut s'écrire :

$$\int_{\mathcal{r}} \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} d\mathcal{r} + \int_S \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\mathcal{r}} \rho \vec{f}_m d\mathcal{r} + \int_S \tau(\vec{n}) dS - \int_S p \vec{n} dS \quad (2.12)$$

2.2.1.3 EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGI :

Energie totale :

$$E_t = e + \frac{v^2}{2} \quad (2.13)$$

Forme non conservative :

$$\rho \frac{Dh_t}{Dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + \text{div}(\underline{V} \cdot \bar{\tau} - \underline{q}) + \rho f_v \cdot \underline{V} \quad (2.14)$$

Forme conservative :

$$\frac{\partial(\rho h_t - P)}{\partial t} + \text{div}(\rho \underline{V} h_t) = \text{div}(\underline{V} \cdot \bar{\tau} - \underline{q}) + \rho f_v \cdot \underline{V} \quad (2.15)$$

Relation de comportement :

$$\bar{\sigma} = -p\bar{I}_d + 2\mu\bar{D} + \lambda \text{tr}(\bar{D})\bar{I}_d \quad (2.16)$$

2.2.1.4 EQUATION D'ETAT :

L'équation d'état pour les GAZ est l'équation de Van der Waals :

$$E_w = (p + \rho' \cdot v^2) \cdot (V - V_c) = R * T \quad (2.17)$$

avec $E_w(J)$ = énergie d'un gaz

*$R * (J/K)$ = constante des gaz (8,314.Joules par degré Kelvin)*

$\rho'(kg/m^3)$ = masse volumique du gaz

$T(K)$ = température absolue de l'expérience

$V(m^3)$ = volume

$V_c(m^3)$ = covolume

$v(m/s)$ = vitesse

Pour les gaz parfaits, l'équation d'état se simplifie à :

$$p \cdot V = q \cdot R * m \cdot T \quad \text{ou} \quad p \cdot V = R * T \quad \text{ou} \quad p \cdot V = m \cdot B \cdot T \quad (2.18)$$

Les symboles sont les mêmes que ci-dessus, avec en outre:

$p(\text{Pa})$ = pression d'un gaz occupant un volume $V (m^3)$, pour une quantité de matière $q(\text{mol})$ impliquée.

$B(J/m^3 \cdot K)$ est l'entropie volumique.

Pour les gaz réels

on utilise en pratique l'équation de Van der Waals en viriel écourté:

$$(p + K_3 \cdot q^2 / V^2) \cdot (V - q \cdot K_2) = q \cdot R \cdot m \cdot T \quad (2.19)$$

Avec les mêmes notations que ci-dessus et en outre:

$q \cdot K^2 (m^3)$ = covolume avec q (mol) = quantité de matière.

2.2.1.5 EQUATION DE CONSERVATION DES ESPECES :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \mu = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha^m \quad (2.20)$$

\dot{m}_α^m : Taux de production massique par unité de volume.

Y_α : Fraction massique de l'espèce α et D_α : coefficient de diffusion.

2.2.2 MODELE HYDRODYNAMIQUE :

Le code de calcul FDS permet de balayer une grande plage de variation de la densité et de la température. Une importante remarque sur FDS est que la variation de pression est faible. Dans ces conditions, une approximation à la loi des gaz idéaux peut être déduite de sorte que la pression soit décomposée comme suit :

$$p = p_0 - \rho_\infty g z + \tilde{p}$$

p_0 est une pression moyenne, $\rho_\infty g z$ est une pression hydrostatique (où Z est la distance verticale), \tilde{p} est une perturbation. Cette approximation n'est valable que pour les écoulements à faible nombre de Mach, puisque la température est inversement proportionnelle à la densité.

Pour la simulation de combustion, le modèle hydrodynamique de FDS est couplé à un modèle de combustion à fraction de mélange (*mixture fraction model*) et à un modèle de rayonnement. [3]

2.2.3 MODELE DE COMBUSTION:

FDS utilise deux types de modèles de combustion. Le modèle par défaut qui fait usage de la fraction de mélange, une quantité représentant le combustible et les produits de combustion. Pour le second modèle, les espèces de gaz individuels réagissent en fonction des paramètres d'Arrhenius spécifiés de la réaction. Ce dernier modèle est le plus souvent utilisé dans une simulation numérique directe (DNS) où la diffusion de carburant et d'oxygène peut être modélisée directement. Toutefois, le plus souvent, pour les simulations à grandes échelles (LES) où le maillage n'est pas assez fin pour résoudre la diffusion de combustible et d'oxygène, le modèle à base de fraction du mélange est pris en charge par FDS. Ce dernier est une quantité conservée qui est défini comme la fraction du gaz à un point donné dans le champ de flux. [3]

Le modèle suppose que la combustion est une réaction contrôlée, la réaction entre les comburants et carburants étant infiniment rapide, ceci indépendamment de la température. Les fractions massiques de tous les réactifs majeurs et des produits peuvent être tirées du mélange au moyen des relations d'état. La fraction de mélange Z peut être définie en termes de fraction de masse de carburant et des produits de la combustion :

$$Z_2 = \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_f}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \quad (2.21)$$

Dans le meilleur des cas, nous pourrions employer ces valeurs dans un calcul pour déterminer le taux de la chaleur libérée, ce dernier est défini par :

$$\dot{q}^m = \left[\frac{\max(\rho Y_{F,S} \rho Y_{O_2})}{\delta t} \Delta H, \dot{q}_{max}^m \right]; S = \frac{W_F}{v_{O_2} W_{O_2}} \quad (2.22)$$

Où :

W_α = le poids moléculaire de l'espèce gazeuse α ;

v_α = Coefficient stœchiométrique de l'élément α

La fraction de mélange satisfait l'équation de conservation :

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (2.23)$$

Si on suppose que la combustion se produise tellement rapidement que le carburant et l'oxygène ne peuvent pas coexister, alors tous les deux disparaissent simultanément sur une surface de flamme :

$$Z(x, t) = Z_f ; Z_f = \frac{Y_{O_2}^\infty}{sY_F^\infty + Y_{O_2}^\infty} \quad (2.24)$$

Où :

$Y_{O_2}^\infty$: Fraction massique de l'oxygène à l'ambiance ;

Y_F^l : Fraction massique de combustible dans le jet

2.2.4 MODELE DE RAYONNEMENT:

Le transfert de chaleur par rayonnement est inclus dans le modèle par l'intermédiaire de la résolution de l'équation de transfert de rayonnement pour un gaz non dissipatif.

L'équation est résolue en utilisant une technique semblable aux méthodes de volume finies pour le transfert par convection. [3]

2.3 LA METHODE DE RÉOLUTION NUMÉRIQUE :

FDS repose sur une description eulérienne d'écoulements gazeux à masse volumique (et température) variables. Le fluide étant supposé visqueux newtonien, le code résout les équations de continuité (bilan de la masse), bilan de quantité de mouvement et de conservation de l'énergie. Ces équations sont simplifiées en faisant l'hypothèse que le nombre de Mach, rapport entre la vitesse de l'écoulement et la célérité du son est faible: $M \ll 1$. Le modèle hydrodynamique est donc adapté à la description d'écoulements gazeux à masse volumique variable et à faible vitesse. Pour la simulation de la combustion, le modèle hydrodynamique de FDS est couplé à un modèle de combustion à fraction de mélange (*mixture fraction model*) et à un modèle de rayonnement.

La résolution numérique des équations de conservation simplifiées repose sur la méthode des différences finies centrées du second ordre. Le maillage est cartésien structuré et décalé, les variables scalaires sont calculées au centre des mailles tandis que les variables vectorielles sont définies au centre des faces des mailles. La figure 2.3 est une représentation de cette approche. Un schéma prédicteur-correcteur explicite du second ordre est appliqué pour l'incrément en temps des variables. Celles-ci étant connues au temps n (conditions initiales), les valeurs des variables au temps $n + 1$ sont estimées par un schéma explicite du second ordre. A partir des valeurs calculées lors de la procédure de prédiction, la condition de stabilité est vérifiée avant de corriger les valeurs estimées. [3]

Cette condition CFL (condition pour le calcul du pas de temps de Courant-Friedrich-Lewis) porte sur le pas de temps Δt qui doit satisfaire la relation suivante:

$$\Delta t \max \left(\frac{\Delta x}{u}, \frac{\Delta y}{v}, \frac{\Delta z}{w} \right) < 1,$$

Où $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ et u, v, w sont respectivement les dimensions des mailles et les composantes de la vitesse dans les trois directions de l'espace. Si la condition de stabilité n'est pas vérifiée, une nouvelle procédure de prédiction est effectuée avec un pas de temps corrigé. L'étape de correction consiste à calculer les variables au temps $n + 1$ en fonction des variables au temps n et des variables estimées au temps $n + 1$.

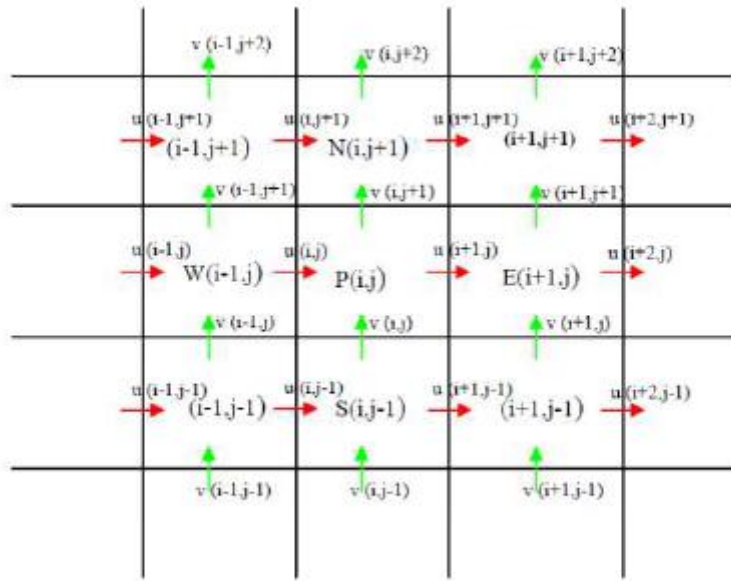


Fig.2.1 maillage à grille décalée

A la fig.2.1 les points (W, P, E, S, N) sont respectivement (West, central, est, sud, nord).

Les quantités scalaires sont placées au centre des mailles alors que les composantes vectorielles (celles du champ de vitesse) sont placées au centre des faces.

Dans FDS, le pas de temps est fonction de la taille de maille et de la vitesse dans ces mailles. Notons que lorsqu'un maillage fin est défini dans une zone d'écoulement rapide, le phénomène est bien capté mais, en contrepartie, le temps de calcul peu devenir considérable. [3]

2.4 TRAITEMENT DE LA TURBULENCE PAR LE MODÈLE LES/DNS :

La plus importante future distinction de tout modèle CFD est le traitement de la turbulence, FDS traite seulement les simulations à grande échelles (LES) et la simulation numérique directe (DNS). Pour une simulation numérique directe (DNS), la viscosité dynamique μ est directement calculée à partir des propriétés des espèces présentes dans l'écoulement. Le maillage doit être suffisamment raffiné pour simuler les plus petites structures turbulentes (échelle de Kolmogorov) qui dissipent par frottement, l'énergie transportée par les plus grosses échelles. Cette condition conduit à des temps de calcul conséquents et nécessite des moyens informatiques importants.

La simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation-LES) est une technique prometteuse pour la prédiction et l'analyse des écoulements instationnaires. Cette technique, à l'inverse de la simulation directe (Direct Numerical Simulation-DNS) qui représente son approximation l'ensemble des tourbillons présents dans un écoulement, repose sur une séparation d'échelles. Ainsi les tourbillons d'une taille supérieure à une limite arbitrairement fixée sont déterminés par le calcul, alors que les autres sont pris en compte au moyen d'un modèle statistique appelé modèle sous-mailles. La qualité des résultats est conditionnée par celle du modèle sous-mailles et par l'erreur du schéma numérique, qu'il faut contrôler.

Pour une simulation numérique en LES, les grosses structures qui contiennent l'essentiel de l'énergie et qui contrôlent le transport et le mélange sont directement simulées. Pour les plus petites structures (dissipatives), la viscosité est modélisée. Cette technique permet de réduire de façon significative les temps de calcul, le maillage pouvant être plus "grossier" (au sens des petites structures dissipatives). [3]

Chapitre3 :
Logiciels de simulation et de
visualisation

CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION ET DE VISUALISATION

3.1. FDS

3.1.1. Présentation du code FDS :

Le code **FDS** (Fire Dynamics Simulator), qui est à sa version 6.5.3, développé par l'institut américain **NIST** est un modèle **CFD** de simulation numérique tridimensionnelle, destiné à prédire les écoulements représentatifs des situations d'incendie.

FDS est un code à champ qui résout une forme simplifiée des équations de Navier-Stokes dans l'approximation d'écoulement à faible nombre de Mach. Par défaut, la turbulence est modélisée par la technique de simulation des grandes échelles **LES** (large Eddy Simulation) avec le modèle de sous maille de Smagorinsky. Il est néanmoins possible de réaliser des Simulations Numériques Directes **DNS** (Direct Numerical Simulation). [1]

3.1.2. Historique des versions :

La version 1 de **FDS** a été rendue publique en Février 2000, la version 2 en Décembre 2001, la version 3 en Novembre 2002, la version 4 en Juillet 2004, la version 5 en Octobre 2007, et la version 6 en Octobre 2013.

A partir de 5 FDS, a été mis en place un système de gestion de révision formelle pour suivre les modifications du code source FDS. Les outils de développement de programmes open-source sont fournis par GitHub. Le numéro de version pour trois parties a FDS. Par exemple, indique que 5.2.12 FDS est ce 5 FDS, la cinquième version majeure. Le 2 indique une mise à jour importante (une version mineure), mais toujours dans le cadre de 5. Le 12 FDS indique la douzième version de maintenance de 5.2, la plupart des corrections de bugs et demandes des utilisateurs mineurs. [3]

3.1.3 Les changements dans FDS 6 :

La plupart des changements de FDS 6 sont des améliorations FDS aux différents sous-modèles qui ne touchent pas la structure ou les paramètres de base du fichier d'entrée. La plupart des changements énumérés ci-dessous ne nécessitent pas de paramètres d'entrée supplémentaires au-delà de ceux utilisés dans les 5 FDS :

a) Espèces et combustion

- ✓ des mélanges d'espèces de mesure « espèces » localisées peuvent être définis avec le groupe d'entrée SPEC.

b) Fonctions de contrôle

- ✓ CTRL fonctions ont été étendues pour inclure des opérations mathématiques.
- ✓ L'évaluation des RAMPE le sable DEVC peut être arrêté, en fonction de l'activation d'une fonction de l'appareil ou de contrôle.

c) Appareils et sortie

- ✓ Les réseaux de tuyaux multiples peuvent être spécifiés pour les gicleurs pour la réduction du débit en fonction du nombre de têtes de fonctionnement.
- ✓ La valeur numérique d'une fonction de contrôle peut être émise avec un DEVC.
- ✓ Peut-être spécifié une ligne de dispositifs en utilisant un certain nombre de POINTS sur une DEVC ligne. [1]

3.1.4. Modèle développeurs :

À l'heure actuelle, **FDS** est développé par Laboratoire technique du **NIST**, division de la recherche incendie, en collaboration avec VTT (Technical Research Centre de Finlande). Les développeurs du **NIST** ont formé une VTT collaboration lâche des parties intéressées, y compris:

À partir de 2007 avec la version **FDS 5**, l'équipe de développement **FDS** a adopté Google Code, un service Internet gratuit conçu pour aider le développement de logiciels open source en fournissant un référentiel pour le code source, le contrôle de révision, la distribution du programme, suivi des bogues, et divers autres services très utiles . En 2015, Google mis fin à ce service, et a fourni tous ses projets un chemin de migration vers GitHub, un service gratuit similaire qui utilise Git, Subversion plutôt que, comme son logiciel de contrôle de version. [3]

3.1.5 Utilisations prévues :

Tout au long de son développement, a été visant **FDS** à résoudre les problèmes pratiques d'incendie dans l'ingénierie de protection contre les incendies, tout en fournissant en même temps un outil pour étudier la dynamique des incendies fondamentaux et de la combustion. **FDS** Peut être utilisé pour modéliser les phénomènes suivants:

- Le transport à vitesse réduite des produits de chaleur et de combustion d'un incendie.
- Radiatif et le transfert de chaleur par convection entre le gaz et les surfaces solides.
- pyrolyse.
- La diffusion de flamme et développement du feu.
- gicleurs, le détecteur de chaleur, et l'activation du détecteur de fumée.
- pulvérisations d'extincteurs automatiques et la suppression par l'eau ou d'autres agents.

Bien a été conçu spécifiquement **FDS** pour les simulations d'incendie, il peut être utilisé pour d'autres simulations d'écoulement de fluide à basse vitesse qui ne comprennent pas nécessairement le feu ou les effets thermiques. À ce jour, environ la moitié des applications du modèle ont été pour la conception des systèmes de contrôle de la fumée et des études d'activation de détecteur. L'autre moitié se compose de reconstructions d'incendie résidentielles et industrielles. [2]

3.1.6. Caractéristiques principales du code fds :

Dans ce paragraphe, on va présenter quelques caractéristiques du code **FDS**, dont ce dernier apparaît comme un outil particulièrement bien adapté pour la simulation des incendies, malgré la relative simplicité de certains de ses sous-modèles. **FDS** est de plus en plus employé par la communauté scientifique dans le domaine de la sécurité contre l'incendie, ce qui lui permet de progresser rapidement et d'être utilisé dans de nombreuses configurations.

Les raisons principales de l'intérêt grandissant pour cet outil sont les suivantes :

- ❖ Il est gratuit et de plus en plus reconnu comme assez fiable dans de nombreuses publications.
- ❖ Il est relativement facile à utiliser.
- ❖ Il est fourni avec un logiciel gratuit de visualisation des résultats particulièrement soigné, nommé « **Smokeview** ».
- ❖ Il peut être utilisé avec la puissance informatique d'un ordinateur de bureau.
- ❖ Sa documentation est bien fournie.
- ❖ ses sources sont libres et écrites essentiellement en **FORTRAN**.
- ❖ pour encourager l'usage et le développement de leur code, les auteurs de **FDS** assurent un échange actif avec les utilisateurs. [1]

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques principales du code :

<p align="center">Solveur des équations de Navier Stokes</p>	<p>Écoulement à faible nombre de Mach Discrétisation par différences finies Précision du second ordre en temps et espace Méthode prédicteur/correcteur Solveur de Poisson explicite Simulation aux grandes échelles, modèle de Smagorinsky</p>
<p align="center">Modèle de combustion</p>	<p>Flamme de diffusion Concept de fraction de mélange Equation de réaction chimique globale unique Chimie infiniment rapide Consommation basée sur le gradient de fraction de mélange</p>
<p align="center">Modèle de rayonnement</p>	<p>Equation de transfert radiatif Rayonnement diffus Gaz gris non dispersif Résolution numérique par volumes finis Utilisation d'une certaine d'angles discrets</p>
<p align="center">Conditions aux limites</p>	<p>Transfert thermique 1D au niveau de chaque maille Propriété thermique dépendant de la température Transfert d'énergie basée sur des corrélations empiriques</p>

Table 3.1 : Les caractéristiques principale de FDS.

3.1.7. Ressource en ligne et support utilisateur :

Le site Web **FDS-SMV** constitue la principale source d'informations détaillées sur le téléchargement des fichiers exécutables, des manuels, du code source et des utilitaires associés:

➤ <http://firemodels.github.io/fds-smv/>

FDS a deux manuels distincts :

- référence technique FDS6.
- Guide de l'utilisateur FDS6.

3.1.8. Installation sur Windows :

Pour installer ou réinstaller FDS et Smokeview sur un système Windows, téléchargez le package d'installation Windows à partir du site Web officiel.

Le fichier Windows est une archive compressée à extraction automatique qui installera FDS, Smokeview et tous les fichiers associés dans le dossier Program Files / FDS.

On lance l'installation en double-cliquant sur le fichier téléchargé. À la fin du processus d'installation, le système Windows est prêt à effectuer des calculs en série.

3.1.9. Exécution de séries FDS sous Windows:

Après avoir configuré un fichier d'entrée, ouvrez une fenêtre d'invite de commande: sélectionnez le menu Démarrer-> Exécuter, puis on tape cmd. On déplace dans le dossier mycase, où se trouve le fichier d'entrée de l'affaire, à l'aide de la commande cd.

3.1.10. Structure de FDS :

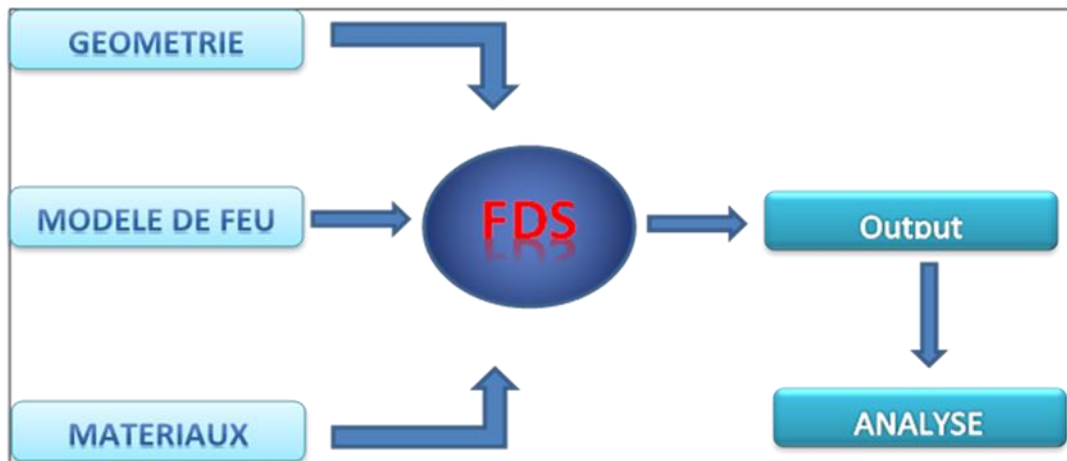


Figure 3.1: Les données principale de code FDS.

L'exécution du code FDS est structurée de la manière suivante :

- ✓ La géométrie de base et la position des quelque éléments doivent être spécifiées. Les Surfaces rondes sont difficiles à construire.
- ✓ Le modèle de feu est un paramètre d'entrée critique.
- ✓ Les propriétés des matériaux doivent être spécifiés ou prises du data base FDS.
- ✓ Les commandes de simulation FDS sont détaillées sur le guide des techniques et le guide d'utilisateur.
- ✓ FDS produit plusieurs formes de sortie (résultats).

✓ Il est important de déterminer les paramètres de sortie et l'analyse des résultats. [1]

3.1.10.1 Structure de base d'un fichier fds :

Introduction de données :

- Ouvrir un fichier texte ex : job_name.fds
- On peut utiliser le même nom dans la ligne d'identification de la simulation du groupe de liste des noms HEAD (fichier d'entrée).

Format :

- Chaque ligne fds commence & et se termine par /.
- Le groupe de listes de nom peut avoir plusieurs lignes.
- Les paramètres peuvent être séparés par des virgules, espaces ou par des lignes de pauses.
- Pas de commentaires et notes entre & et /.

3.1.10.2. Paramètre dans le fichier d'entrée:

- ✓ Entiers, comme dans **T_END=5400**.
- ✓ Nombres réels, comme dans **CO_YIELD=0.008**.
- ✓ Groupes de nombres réels, comme dans **XYZ=6.04, 0.28, 3.65**.
- ✓ Groupes d'entiers, comme dans **IJK=90, 36, 38**.
- ✓ Groupes de chaînes de caractères, comme dans **SURF_IDS='burner','steel'**
- ✓ Paramètres logique comme dans

POROUS_FLOOR=.FALSE. Ou POROUS_FLOOR=.TRUE.

A. Forme générale:

Un fichier FDS commence par &HEADet se termine par &TAIL /.

B. Configuration générale

Tout d'abord, la configuration générale est effectuée.

Le cas reçoit un nom via le groupe de listes de noms **HEAD**, l'heure de simulation est définie via le groupe de listes **TIME**. D'autres paramètres divers sont prescrits via le groupe de listes de noms **MISC**.

La réaction de combustion en phase gazeuse est ensuite configurée via le groupe de listes de noms **REAC**, le modèle de rayonnement étant configuré avec **RADI**.

C. Domaine de calcul:

Le domaine de calcul est défini via le groupe de listes de noms **MESH**. Tous les calculs FDS doivent être effectués dans un domaine constitué de volumes rectilignes appelés mailles. Chaque maille est divisée en cellules rectangulaires, dont le nombre dépend de la résolution souhaitée de la dynamique du flux.

Certaines conditions initiales sont prescrites pour le domaine de flux via le groupe de listes de noms **INIT**.

D. Propriétés :

Certaines propriétés sont définies:

- ✓ les propriétés de chaque matériau (**MATL**).
- ✓ les propriétés des espèces de gaz supplémentaires (**SPEC**).
- ✓ les propriétés des particules lagrangiennes (**PART**).
- ✓ les types de conditions aux limites (**SURF**).

C'est la partie la plus difficile de la simulation: tout d'abord, que ce soit pour des incendies réels ou simulés, la croissance de l'incendie est très sensible aux propriétés thermiques des matériaux environnants. Deuxièmement, même si toutes les propriétés du matériau sont connues dans une certaine mesure, les phénomènes physiques d'intérêt risquent de ne pas être simulés correctement en raison des limitations des algorithmes du modèle ou de la résolution du maillage numérique.

Il vous incombe de fournir les propriétés thermiques des matériaux, puis d'évaluer les performances du modèle pour vous assurer que les phénomènes qui vous intéressent sont capturés.

E. Géométrie solide

La géométrie du solide est entrée via les **OBST**, **VENT** et **HOLE**. La mise en place d'un calcul demande beaucoup de travail. Elle consiste à spécifier la géométrie de l'espace à modéliser et à appliquer des conditions aux limites à ces objets. La géométrie est décrite en termes d'obstacles à l'écoulement en phase gazeuse.

Une condition aux limites doit être affectée à chaque surface limite du domaine en phase gazeuse décrivant ses propriétés thermiques. Les deux faces d'obstruction solides et les limites extérieures du domaine de calcul doivent être affectées d'une condition aux limites. Un feu n'est qu'un type de condition aux limites.

F. Logique de contrôle

Certaines logiques de contrôle et d'automatisation sont introduites via des groupes de listes de **DEVC PROP**, **DEVC** et **CTRL** : les périphériques peuvent être utilisés pour contrôler diverses actions, telles que la création et la suppression d'obstructions, ou l'activation et la désactivation de ventilateurs et de ventilations.

G. Sortie

Enfin, l'utilisateur **DEVC** quantités de sortie (**DEVC**, **SLCF**, **BNDF**, **ISOF**). Toutes les quantités de sortie doivent être spécifiées au début du calcul. Dans la plupart des cas, il n'existe aucun moyen de récupérer des informations à la fin du calcul si elles n'ont pas été spécifiées dès le début. Comme dans une expérience réelle, l'utilisateur doit décider avant le calcul quelles informations enregistrer.

H. Les unités de mesure

FDS utilise les unités de mesure du système international (SI). Les longueurs sont exprimées en m, temps en s, masse en kg, température en ° C, pression en Pa, chaleur en kJ, puissance en kW, conductivité en W / m / K, flux de chaleur en kW / m², poids moléculaire en g / mol, ...

Pour une liste complète, consultez la documentation.

I. Système de coordonnées de référence

Le système de coordonnées FDS est conforme à la règle de la main droite. Par défaut, l'axe z est considéré comme la verticale.

Pour des raisons de calcul, il est toujours préférable que la dimension horizontale la plus longue du modèle soit alignée sur l'axe des x. Cela raccourcit souvent le temps de calcul. [3]

3.1.10.3. Quantités De Sortie :

FDS calcule la température, la densité, la pression, la vitesse, la composition chimique, et diverses autres quantités dans chaque cellule de la grille numérique à chaque pas de temps discret. Il y a généralement des centaines de milliers à des millions de cellules du réseau et des milliers à des centaines de milliers de pas de temps. En outre, FDS calcule à des surfaces solides, la température, le flux de chaleur, le taux de perte de masse, et diverses autres quantités. Même si seulement une petite fraction de l'information calculée peut être enregistrée, la sortie se compose généralement de fichiers de données assez grandes.

Temps histoires de diverses quantités à un seul point en quantités espace ou mondiales telles que le taux de dégagement de chaleur du feu (RRH) sont enregistrés dans un langage simple, des fichiers texte délimité par des virgules qui peuvent être représentées graphiquement à l'aide d'un tableur.

Cependant, la plupart des champs ou des données de surface sont visualisées avec un programme de visualisation.

Grandeurs de sortie typiques pour la phase gazeuse comprennent:

- Température du gaz.
- Vitesse du gaz.
- Concentration de l'espèce gazeuse (vapeur d'eau, CO₂, CO, N₂).
- Les estimations de concentration de fumée et de visibilité.
- Pression.
- Taux de dégagement de chaleur par unité de volume.
- Densité de gaz.
- Masse des gouttelettes d'eau par unité de volume.

Sur des surfaces solides, FDS prédit des quantités supplémentaires associés à l'équilibre d'énergie entre le gaz et la phase solide, comprenant:

- La température de surface et de l'intérieur.
- Flux de chaleur, à la fois radiatif et convectif.
- Taux de combustion.
- Masse des gouttelettes d'eau par unité de surface.

Quantités Globales Enregistrées Par Le Programme Comprennent:

- Taux total de chaleur de presse (RRH).
- Temps d'activation et de détection de gicleurs.
- Les flux de masse et de l'énergie à travers des ouvertures ou des solides.

La figure ci-dessous résume toutes les fonctions de base de FDS.

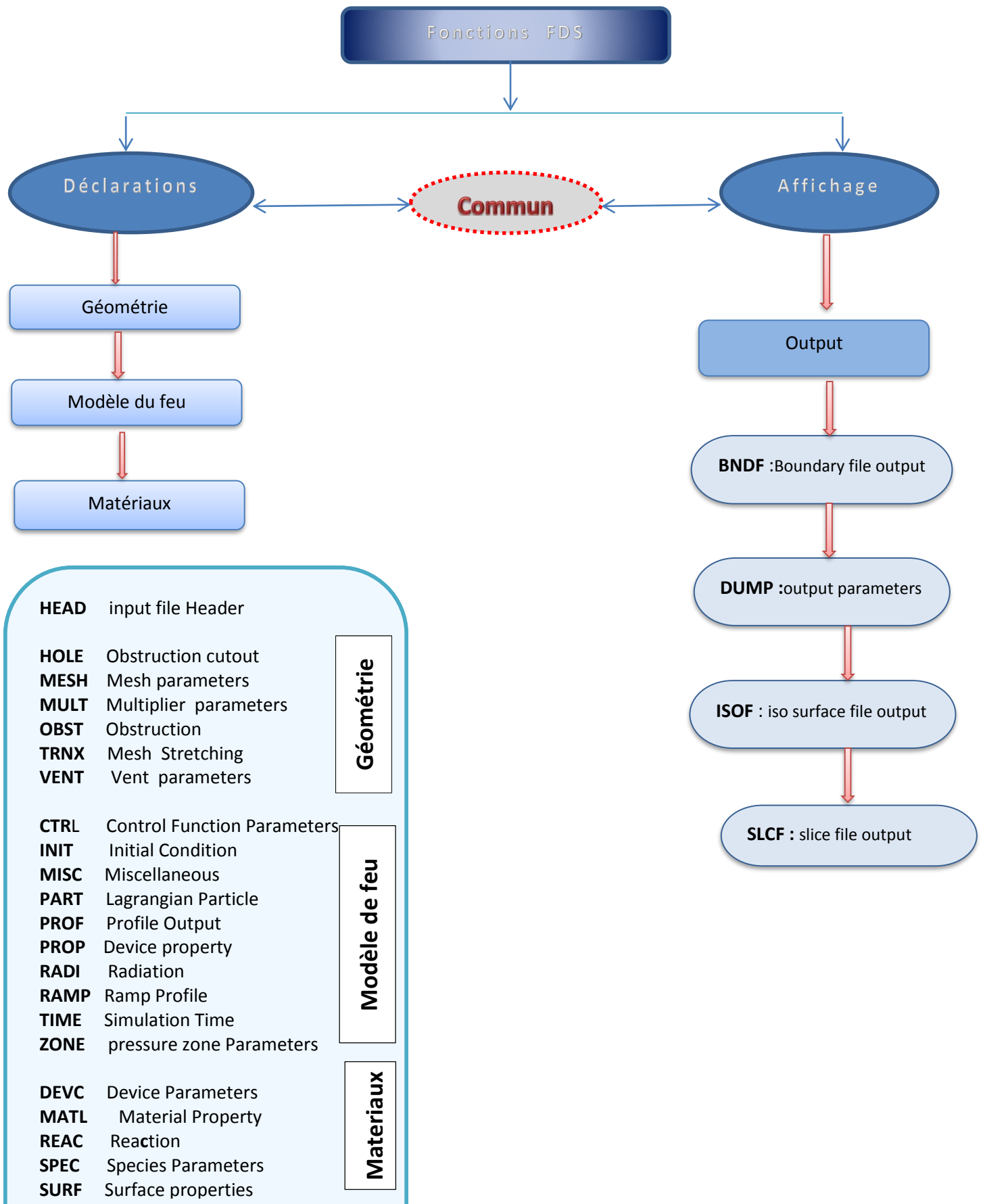


Figure 3.2 : les fonctions de base de FDS.

3.2. SMOKEVIEW :

3.2 .1 Description de base de SMOKEVIEW :

Smokeview est un logiciel conçu pour visualiser les prédictions numériques générées par le modèle de simulation dynamique du feu (FDS) qui utilise pour calculer l'évolution de la propagation de la fumée, des gaz d'incendie et de la température. Smokeview est principalement écrit en langage de programmation C à l'aide de la bibliothèque graphique 3D OpenGL pour mettre en œuvre des algorithmes de visualisation pour interagir à la fois avec l'utilisateur et avec le système.

Plus précisément, OpenGL est utilisé pour spécifier l'emplacement, la couleur et l'éclairage des objets résidant dans un monde 3D défini par **FDS**. Dans le contexte de FDS, ces objets peuvent être utilisés pour représenter la géométrie (comme les blocages) ou de visualiser des données. Smokeview utilise ces techniques sous-jacents comme blocs de construction pour visualiser les données telles que les particules de traceur, les contours de l'ombre 2D ou 3D au niveau des iso-surfaces. Les données de suie ou de fumée peuvent également être visualisées en utilisant une variation d'un contour 2D ombragé, où la transparence plutôt que la couleur est utilisée pour représenter l'opacité ou l'épaisseur optique de fumée. Ce rapport décrit ces algorithmes donnant certains détails techniques et programmatiques.

Smokeview est constitué d'environ 120 000 lignes de code. La majeure partie est écrite en **C**, une petite mais importante partie est écrite en **Fortran 90**. Cette dernière est utilisée pour lire les données générées par FDS. Des bibliothèques de logiciels supplémentaires (environ 250 000 lignes de code) sont utilisées pour la mise en œuvre de dialogues, le rendu d'images et la décompression de fichiers de données. L'utilisation de bibliothèques portables permet à Smokeview de fonctionner sur de nombreuses plates-formes comprenant Windows, Linux et OS X.

L'objectif fondamental de la visualisation est de mieux comprendre les phénomènes étudiés. Il n'y a pas de meilleure méthode pour visualiser les données. Chaque technique de visualisation met en évidence un aspect différent des données. Smokeview visualise les données de dynamique d'incendie, généralement issues du simulateur d'incendie dynamique. Ces données prennent plusieurs formes. Certaines données sont statiques, tandis que d'autres évoluent avec le temps. Certaines données représentent des objets géométriques alors que d'autres représentent la solution aux équations de flux résolues par FDS.

Smokeview affiche les données de dynamique du feu permettant une évaluation quantitative à l'aide de techniques de visualisation telles que des particules de traçage animées qui suivent le flux, des contours animés 2D et 3D ombrés affichant des quantités de flux et des vecteurs de flux animés affichant des quantités de flux et leur direction. Smokeview visualise également la fumée de manière réaliste en convertissant la densité de la suie en une opacité de fumée, en affichant la fumée telle qu'elle apparaîtrait. Chacune de ces techniques de visualisation met en évidence différents aspects des phénomènes d'écoulement sous-jacents.

3.2.2. Historique des versions :

À partir du début des années 1980 et dans les années 90, Howard Baum et Ronald Rehm du **NIST** ont mis au point le solveur de flux de base qui a évolué pour devenir le simulateur de dynamique du feu, rendu public en 2000. Leur technique de résolution, connue sous le nom de Large Eddy Simulation ou **LES**, permet de capturer des dynamiques de panache de feu très complexes sur le plan numérique. Malheureusement, la puissance de la méthodologie n'a pas pu être appréciée sans moyen efficace d'afficher les résultats du calcul. Les premières tentatives pour visualiser les résultats du calcul ne consistaient en rien de plus que de petites particules tourbillonnant dans une boîte Cela a été utile pour les développeurs de modèles, mais à peine à quelqu'un d'autre. Il n'a tout simplement pas l'air comme un feu.

Smokeview a été écrit pour résoudre ce problème. C'est un outil de visualisation scientifique avancé dont les algorithmes de dessin sont basés sur la physique, pas seulement un outil pour dessiner de belles images. La version 1 de Smokeview a été publiée en février 2000, la version 2 en décembre 2001, la version 3 en novembre 2002, la version 4 en juillet 2004 et la version 5 en septembre 2007. La version actuelle de Smokeview est la 6, publiée officiellement en juin 2012.

En plus du suivi des particules comme auparavant, il visualisait les données de flux d'incendie en colorant et en animant les flux d'incendie / fumée, facilitant ainsi l'interprétation des résultats de simulation **FDS**. Immédiatement après septembre Le 11 juillet 2001, les travaux sur **FDS** et Smokeview ont commencé pour leur permettre de modéliser et de visualiser des problèmes beaucoup plus vastes. En conséquence, les scénarios d'incendie avec plusieurs millions de cellules de grille peuvent maintenant être modélisés et visualisés.

La prochaine étape importante du développement de Smokeview a été la mise en œuvre d'un algorithme permettant de visualiser de manière réaliste la fumée. La ligne entre

FDS qui effectue des calculs de flux de fumée et Smokeview qui effectue la visualisation des flux de fumée est devenue floue, Smokeview effectuant maintenant des calculs basés sur la physique. L'algorithme actuel de visualisation de la fumée ne prend en compte que les effets de l'absorption, à savoir combien d'objet est obscurci par la fumée. Les travaux futurs impliquent la modélisation des effets de la diffusion, comment l'interaction entre la lumière et la fumée affecte la visualisation et la coloration du feu de façon plus réaliste sur la base de principes physiques tels que la courbe de température du corps noir.

Le défi consiste à représenter la couleur de manière appropriée, en tenant compte des complexités associées à la perception.

3.2.3 Modèle de développement :

À l'heure actuelle, Smokeview est maintenu par le Laboratoire d'ingénierie (EL) de l'Institut national des normes et de la technologie. L'équipe de développement FDS-Smokeview utilise Git pour le contrôle de version et le " GitHub.com " de site Web pour aider le développement de logiciels open source en fournissant un référentiel pour le code source, le contrôle de révision, la distribution du programme, suivi des bogues, et divers autres services très utiles. Les manuels Smokeview sont composés avec LATEX, plus précisément PDF LATEX. Les fichiers LATEX sont essentiellement des fichiers texte sous contrôle de version GIT. Les figures sont soit sous forme de fichiers PDF ou jpeg, selon qu'elles sont au format vectoriel ou raster. Il existe une variété de forfaits LATEX disponibles, y compris MiKTeX, une version Windows. Les développeurs de FDS-Smokeview éditent les manuels au quotidien et entretiennent le modèle. Les différentes éditions des manuels se distinguent par leur date.

Les modifications apportées à Smokeview sont retracées à l'aide du logiciel de contrôle de révision. Pas tous les résultats de changement dans une modification du numéro de version. Le numéro de version change après il est jugé que les modifications du code source justifient un changement de numéro de version. Pour des modifications mineures et corrections fixes, les versions incrémentielles sont libérées, référencées selon les fractions du numéro de version entier. Par exemple, la version 5.1.4 serait une version de maintenance de fonction version 5.1, ce qui est une mise à jour au sein de la principale version de l'application appelée Smokeview 5. Cela se produit toutes les quelques semaines. Une version mineure de 5,2 à 5,3, par exemple, peut ne se produire que quelques fois par an, lorsque des améliorations significatives ont été apportées aux visualisations. Une série de visualisations de vérification

simples sont régulièrement exécutées pour garantir que les modifications quotidiennes n'ont pas modifié les algorithmes de visualisation importants. [4]

3.2.4 Aperçu :

Smokeview visualise la fumée et d'autres attributs du feu à l'aide de techniques quantitatives et réalistes. Smokeview utilise des techniques d'affichage quantitatives telles que le contourage 2D et 3D. L'affichage réaliste des données renvoie à l'intention de présenter les données sous une forme telle qu'elle apparaît réellement. Dans cette partie on présente certains des détails liés à l'utilisation de ces techniques pour l'affichage des données générées par FDS.

Pour mettre en œuvre ces techniques, Smokeview utilise divers outils et techniques tels que la couleur, l'éclairage, le mouvement et la transformation. Ces éléments de base, sont utilisés par chacun des techniques utilisées par Smokeview pour visualiser les données, en particulier la visualisation de la fumée. [4]

3.2.5 Exécution de SMOKEVIEW :

Une procédure typique pour l'utilisation et Smokeview est FDS à:

1. Créez un fichier nommé case nom. Fds décrivant le scénario feu.
2. Tapez fds case nom. Fds dans un interpréteur de commandes pour exécuter le cas.
3. Double-cliquez sur le fichier nommé case nom.smv ou de type smokeview case nom dans un interpréteur de commandes (sur d'autres plateformes) pour démarrer Smokeview.
4. Un clic droit dans la scène et sélectionnez un fichier à charger dans le Chargement / Déchargement menu. Ce rapport décrit l'étape 3 et l'étape 1 et 2 sont documentés dans le Guide de l'utilisateur FDS [3].

Les menus de Smokeview sont activés en cliquant avec le bouton droit de la souris n'importe où dans la fenêtre de Smokeview. Les fichiers de données peuvent être visualisés en sélectionnant l'option de menu souhaitée Charger / Décharger.. De nombreuses commandes de menu ont des raccourcis clavier équivalents. Les fonctions de visualisation non contrôlables par le menu peuvent être personnalisées à l'aide du fichier de préférences Smokeview, **smokeview.ini**. [5]

Smokeview est démarré sur un PC Windows en double-cliquant sur le fichier nommé casename.smv, où casename est le nom spécifié par le mot clé **CHID** défini dans le fichier de

données d'entrée FDS. Les menus sont accessibles en cliquant avec le bouton droit de la souris. Le menu Charger / Décharger peut être utilisé pour lire les fichiers de données à visualiser. Le menu Afficher / Masquer peut être utilisé pour modifier la présentation des visualisations. Pour la plupart, les choix de menu sont explicites. Des éléments de menu existent pour afficher et masquer divers éléments de simulation, créer des captures d'écran, obtenir de l'aide, etc.

Pour utiliser Smokeview à partir d'une ligne de commande, ouvrez un interpréteur de commande. Ensuite, accédez au répertoire contenant le dossier FDS à afficher et tapez: **smokeview casename** ou encore une fois **casename** est le nom spécifié par le mot clé CHID défini dans le fichier de données d'entrée FDS.

Les fichiers de données peuvent être chargés et les options sélectionnées en cliquant avec le bouton droit de la souris et en sélectionnant l'élément de menu approprié.

Smokeview ouvre deux fenêtres, l'une affiche la scène et l'autre affiche des informations sur l'état. Fermer l'une ou l'autre des fenêtres mettra fin à la session Smokeview. Plusieurs copies de Smokeview peuvent être exécutées simultanément si l'ordinateur dispose des ressources adéquates.

Normalement, Smokeview est exécuté pendant une exécution **FDS**, une fois l'exécution terminée et comme aide à la configuration. On peut alors vérifier que ces éléments de modélisation ont bien été définis et localisés comme prévu. On peut sélectionner la couleur de ces éléments en utilisant les paramètres de couleur du fichier **smokeview.ini** pour distinguer un élément d'un autre.

Bien que certaines marques de cartes vidéo ne puissent pas être recommandées, elles devraient être haut de gamme en raison des exigences graphiques élevées de Smokeview. Ces exigences ne feront qu'augmenter à mesure que de nouvelles fonctionnalités seront ajoutées. Une carte vidéo conçue pour fonctionner correctement sur des jeux d'ordinateur sophistiqués devrait bien fonctionner pour Smokeview. Certains bogues apparents dans Smokeview résultent de problèmes rencontrés dans les cartes vidéo d'anciens ordinateurs. [5]

3.3. PyroSim

3.3.1. Introduction :

PyroSim est une interface utilisateur graphique pour le simulateur FDS (Fire Dynamics Simulator). Les modèles FDS peuvent prévoir la fumée, la température, le monoxyde de carbone et d'autres substances lors d'incendies. Les résultats de ces simulations servent à assurer la sécurité des bâtiments avant la construction, à évaluer les options de sécurité des bâtiments existants, à reconstituer les incendies pour les enquêtes post-accidentelles et à faciliter la formation des pompiers. FDS est étroitement intégré à PyroSim.

L'interface PyroSim fournit un retour d'information immédiat et garantit le format correct du fichier d'entrée FDS. Quelques faits saillants incluent :

- ✓ Importez des fichiers **CAO** pour créer et gérer des modèles complexes.
- ✓ Outils de dessin de géométrie 2D et 3D de haut niveau.
- ✓ Traitement parallèle intégré.
- ✓ Système d'unités flexible prenant en charge le travail en unités métriques ou anglaises.
- ✓ Outils pour gérer plusieurs maillages.
- ✓ Traductions multilingues.
- ✓ Systèmes **HVAC** (chauffage, ventilation et climatisation) intégrés à la simulation **CFD**.
- ✓ Importation de modèles FDS existants.
- ✓ Post-traitement intégré.

En résumé, PyroSim vous aide à construire rapidement et de manière fiable des modèles d'incendie complexes. [6]

3.3.2. Télécharger et installer :

La version actuelle de PyroSim est disponible sur le Web à l'adresse **<http://www.pyrosim.com>**. La page de support vous permet de vous inscrire à une version d'évaluation gratuite, d'acheter le logiciel et de télécharger le programme d'installation. Cette page fournit également des instructions pour l'installation, l'activation, le transfert sur un autre ordinateur et les licences flottantes. Il n'y a pas de différence fonctionnelle entre la version d'évaluation de PyroSim et la version complète.

Lors de l'installation de PyroSim, le programme d'installation mettra à niveau une version existante ou installera PyroSim vers un nouvel emplacement. Ce comportement est basé sur la version. Dans le cas de mises à jour mineures (mise à niveau de PyroSim 2015.1 à

PyroSim 2015.2, par exemple), le programme d'installation supprimera l'ancienne version et la remplacera par la nouvelle version. Lors de l'installation d'une mise à jour majeure (PyroSim 2013 à PyroSim 2015, par exemple), l'ancienne version ne sera pas modifiée et la version la plus récente sera installée dans un autre dossier. Des privilèges d'administrateur sont requis pour installer PyroSim. Cela est nécessaire car le programme d'installation ajoute des processus au système d'exploitation pour la gestion des licences et la simulation FDS parallèle.

3.3.3. Quelques suggestions de modélisation :

Dans cette section, nous formulons quelques suggestions susceptibles d'accélérer le développement de votre modèle. Les principaux problèmes rencontrés par la plupart des utilisateurs sont les suivants: sélection d'un maillage, définition de votre géométrie, sélection d'une réaction et définition des conditions aux limites correctes. Nous allons discuter de manière approfondie de chacun de ces sujets, mais avant de commencer à y réfléchir, veuillez:

- Prenez le temps de travailler à travers les exemples. Sur la page Didacticiels PyroSim (<http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/tutorials/>), nous fournissons une série d'exemples qui vous guident à travers des concepts de modélisation de plus en plus complexes. Cela vaut la peine de travailler à travers ces exemples.
- N'oubliez pas de «commencer petit». Lorsque vous développez un nouveau modèle, ne vous contentez pas de vous précipiter pour créer le modèle final. Utilisez de petits modèles pour vous assurer de bien comprendre les détails.

3.3.4. FDS s'enclenche dans le maillage :

Toute la géométrie dans FDS est définie à la résolution du maillage. Même si vous entrez la géométrie d'une obstruction ou d'un événement pour qu'elle se situe entre les points de coin des cellules, lorsque FDS exécute la solution, toute la géométrie est «accrochée» à la grille.

Si vous dessinez votre propre géométrie dans PyroSim, vous pouvez sélectionner l'option Aligner sur les grilles de modèle afin de vous assurer que votre géométrie correspond à la grille. Vous pouvez également vous assurer que les objets rempliront des cellules entières de la grille plutôt qu'une face de cellule en activant l'option Épaissir dans les propriétés d'obstruction

3.3.5. Utilisation d'un exécutable FDS différent :

Chaque version de PyroSim est fournie avec FDS. Une version particulière de PyroSim est conçue et testée par rapport à la version fournie de FDS. Vous pouvez utiliser PyroSim pour exécuter n'importe quelle version de FDS. Toutefois, PyroSim générera le fichier d'entrée en fonction de la version fournie de FDS et il est important de comprendre les différences de format d'entrée entre les versions de FDS avant de modifier la version de FDS de PyroSim.

Pour changer la version de FDS utilisée par PyroSim:

1. Téléchargez et installez une nouvelle version de FDS à partir de NIST.
2. Dans le menu Fichier, cliquez sur Préférences.
3. Cliquez sur l'icône Dossier appropriée dans la section Exécution de FDS pour sélectionner le fichier exécutable que PyroSim doit utiliser.
4. Cliquez sur OK pour fermer la boîte de dialogue Préférences.

3.3.6. Interface PYROSIM

PyroSim fournit quatre éditeurs pour votre modèle de tir: la vue 3D, la vue 2D, la vue de navigation et la vue de l'enregistrement. Ceux-ci représentent tous votre modèle actuel. Si un objet est ajouté, supprimé ou sélectionné dans une vue, les autres vues reflètent simultanément le changement. Chaque vue est brièvement décrite ci-dessous :

- **Vue de navigation:** cette vue répertorie de nombreux enregistrements importants dans le modèle. Il vous permet d'organiser la géométrie de votre modèle en groupes tels que la pièce ou le canapé. La localisation et la modification des enregistrements sont souvent plus rapides et plus faciles dans cette vue.
- **Vue de navigation:** cette vue répertorie de nombreux enregistrements importants dans le modèle. Il vous permet d'organiser la géométrie de votre modèle en groupes tels que la pièce ou le canapé. La localisation et la modification des enregistrements sont souvent plus rapides et plus faciles dans cette vue.
- **Vue 2D:** Cette vue est utile pour dessiner rapidement des géométries telles que des murs et des meubles. Vous pouvez choisir parmi trois plans de visualisation et effectuer de nombreuses manipulations géométriques utiles.
- **Vue d'enregistrement:** cette vue donne un aperçu du fichier d'entrée FDS qui sera généré pour la simulation. Il fournit également un moyen d'ajouter des

enregistrements personnalisés qui ne seront pas traités par PyroSim, mais qui seront envoyés à FDS. [6]

```

room - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
&HEAD CHID='room', TITLE='room fire model' /
&MESH IJK=40,40,24, XB=0,4,0,4,0,2.4 /
&TIME T_END=900. /
&OBST XB=1,3,1,3,0,1 /
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=125 /
&REAC FUEL = 'HEPTANE'
FYI = 'Heptane, C_7 H_16'
C = 7.
H = 16.
CO_YIELD = 0.008
SOOT_YIELD = 0.015 /
&VENT XB=1,3,1,3,1,1, SURF_ID='FIRE' /
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX' /
    
```

Figure 3.3 : le fichier d'entrée de code FDS.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\Dell>cd desktop
C:\Users\Dell\Desktop>cd room mira
C:\Users\Dell\Desktop\room mira>fds room.fds
Mesh      1 is assigned to MPI Process      0
Completed Initialization Step 1
Completed Initialization Step 2
Completed Initialization Step 3
Completed Initialization Step 4

Fire Dynamics Simulator

Current Date      : June 30, 2019  03:59:33
Version          : FDS 6.5.3
Revision        : FDS6.5.3-598-geb56ed1
Revision Date   : Thu Jan 19 16:12:59 2017 -0500
Compilation Date: Fri 01/20/2017  09:11 PM

MPI Enabled; Number of MPI Processes:      1
OpenMP Enabled; Number of OpenMP Threads:  1

MPI version: 3.0
MPI library version: Intel(R) MPI Library 5.1.3 for Windows* OS

Job TITLE       : room fire model
Job ID string   : room

Time Step:      1, Simulation Time:      0.10 s
Time Step:      2, Simulation Time:      0.20 s
Time Step:      3, Simulation Time:      0.31 s
Time Step:      4, Simulation Time:      0.41 s
Time Step:      5, Simulation Time:      0.51 s
Time Step:      6, Simulation Time:      0.58 s
Time Step:      7, Simulation Time:      0.66 s
Time Step:      8, Simulation Time:      0.74 s
Time Step:      9, Simulation Time:      0.82 s
Time Step:     10, Simulation Time:      0.89 s
Time Step:     20, Simulation Time:      1.27 s
Time Step:     30, Simulation Time:      1.49 s
Time Step:     40, Simulation Time:      1.67 s
Time Step:     50, Simulation Time:      1.85 s
Time Step:     60, Simulation Time:      2.00 s
Time Step:     70, Simulation Time:      2.15 s
Time Step:     80, Simulation Time:      2.30 s
Time Step:     90, Simulation Time:      2.45 s
Time Step:    100, Simulation Time:      2.60 s
Time Step:    200, Simulation Time:      4.14 s
Time Step:    300, Simulation Time:      5.70 s
Time Step:    400, Simulation Time:      7.28 s
Time Step:    500, Simulation Time:      8.96 s
Time Step:    565, Simulation Time:     10.00 s
MPI process      0 has completed
    
```

Figure 3.4 : l'exécution de fichier d'entrée.

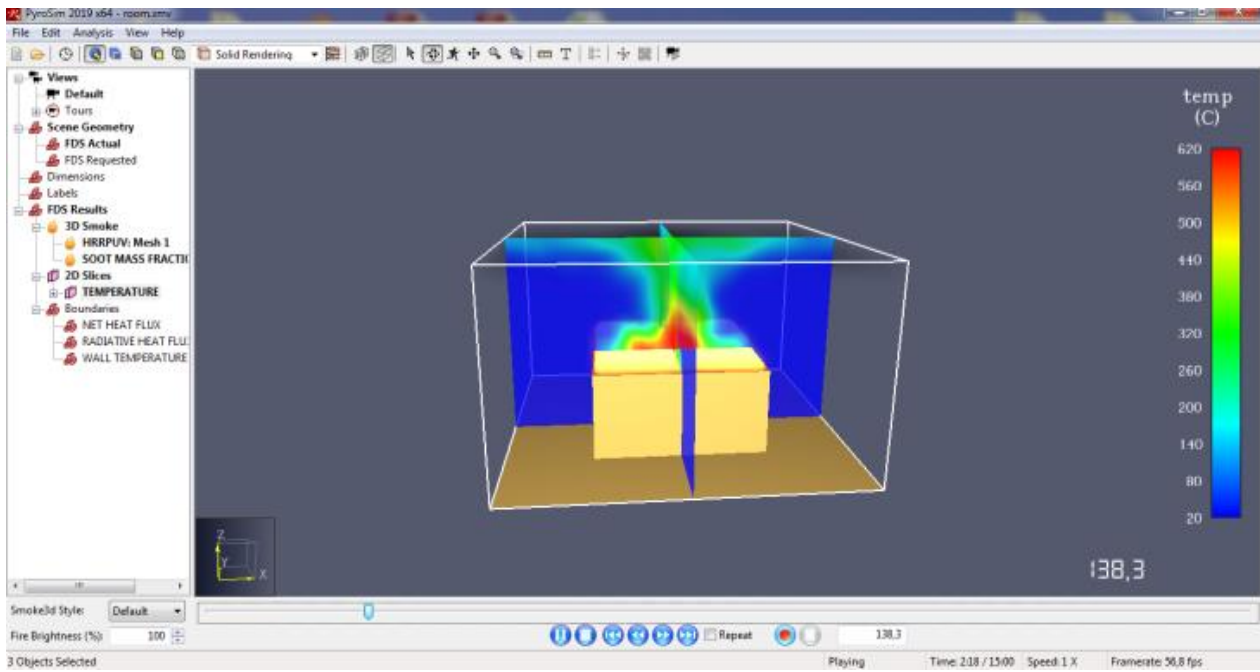
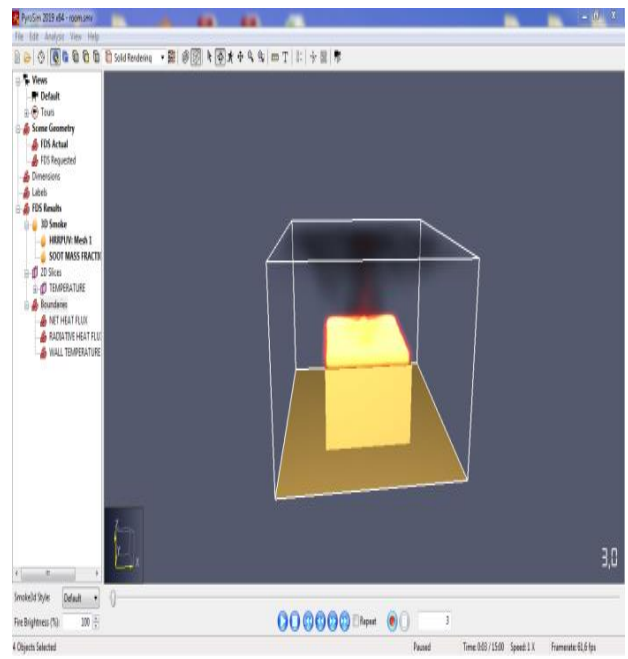
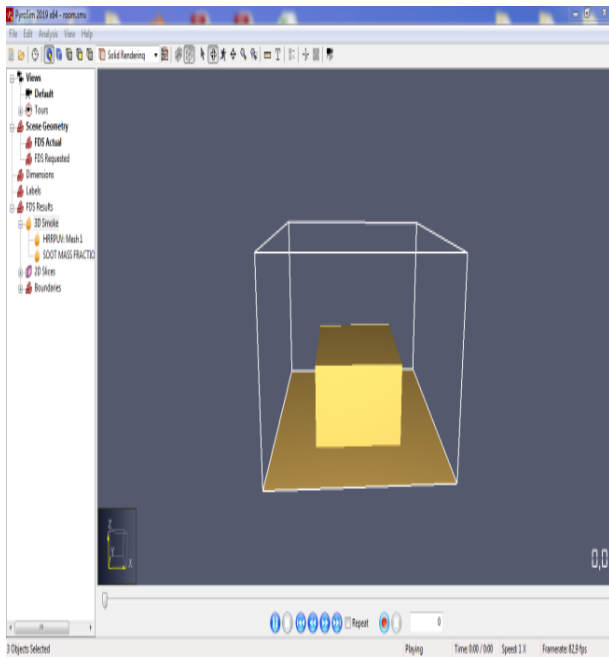


Figure 3.5 : visualisation des données et des résultats avec le PyroSim.

Chapitre 4

Simulation de crash Boufarik

CHAPITRE 4 : SIMULATION DE CRASH DE BOUFARIK

4.1. Introduction :

Le quatrième chapitre est à propos de simulation de crash Boufarik, d'abord on va citer les conditions initiales et aux limites, après on rapporte le scénario de ce mauvais évènement pour tous les algériens, la catastrophe de 11/04/2018 Boufarik en détails. Ensuite on va parler de l'expérience de BLEVE à des points bien définis pour une brève explication, puis on va faire une étude de sensibilité pour le maillage et les capteurs, avant finaliser ce chapitre on va donner une explication de comment faire la simulation dans le FDS et l'affichage de PyroSim. Enfin on va déterminer la vitesse de flamme et faire une petite comparaison entre nos résultats et les résultats de BLEVE.

4.2. Définition des conditions initiales et aux limites :

4.2.1. Les conditions atmosphériques du crash :

La température initiale :

Dans le jour de l'accident la température extérieure a été 18 C°.

L'humidité relative initiale :

L'humidité on générale est relative de la température donc il a été de plage (4.92 RH-18.02 RH).

La pression atmosphérique :

Ainsi que Blida a une altitude de 256 m par rapport la mer donc la pression atmosphérique est 1013 hPa.

Le vent :

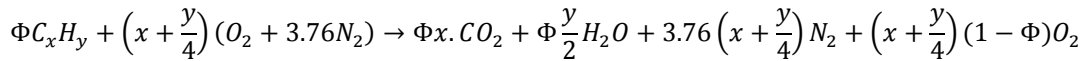
Le vent de 11/04/18 a été de 10km/h ouest/sud/ouest.

4.2.2 La réaction de combustion :

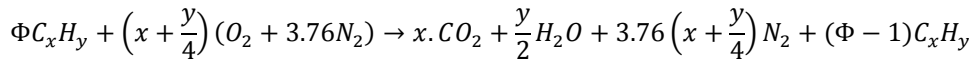
On va définir un terme appeler la richesse Φ :

$$\Phi = \frac{\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse de comburant}}}{\left(\frac{\text{masse de combustible}}{\text{masse de comburant}}\right)_{st}} = \frac{Y_F/Y_O}{\left(Y_F/Y_O\right)_{st}}$$

Pour $\Phi \leq 1$ (mélange pauvre), la réaction globale est donné par :

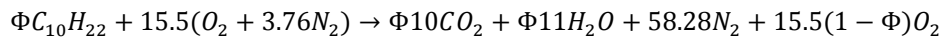


Pour $\Phi \geq 1$ (mélange riche), la réaction globale est donné par :

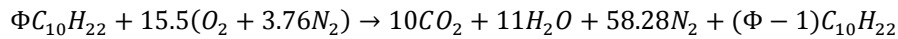


On a donc pour n-Décane ($C_{10}H_{22}$) :

Pour $\Phi \leq 1$:



Pour $\Phi \geq 1$:



4.2.3 Conditions initiales et aux limites :

- ✓ L'air est considéré composé de 79.5 % de N_2 et 20.5 % d' O_2 .
- ✓ La pression initiale dans l'enceinte sphérique est $P_0 = 1.01325 \cdot 10^5$ Pa.
- ✓ La température initiale des gaz frais qui est la température initiale du mélange gazeux est fixée selon les conditions de préchauffage du mélange.
- ✓ La masse molaire du $C_{10}H_{22}$ 142 g/mole.
- ✓ Les fractions massiques initiales des espèces sont calculées à partir des lois de mélange pour chaque richesse, elles vérifient l'expression :

$$\sum_{j=1}^N X_j = \sum_{j=1}^N Y_j = 1.$$

X_j et Y_j sont respectivement les fractions molaire et massique de l'espèce j.

- ✓ La chaleur de combustion (kJ/kg) : La quantité d'énergie dégagée par unité de masse de carburant consommé, elle est calculée à partir de l'expression donnée par FDS-User Guide :

$$\Delta H \approx \frac{v_{O_2} W_{O_2}}{v_f W_f} EPUMO2 \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$$

Avec v_{O_2}, v_f : Sont respectivement les coefficients stœchiométriques de l'oxygène et du fuel.

W_{O_2}, W_f : Sont respectivement les masses molaires de l'oxygène et du fuel EPUMO2 est la quantité d'énergie dégagée par unité de masse d'oxygène consommée. Par défaut, elle est de 13 100 [kJ / kg].

- ✓ L'allumage est réalisé en spécifiant un taux de chaleur libéré par unité de surface (HRRPUA) en (kJ/kg), sur une ligne SURF_ID à une obstruction ou VENT, appliquée pour une durée de l'ordre de quelques millisecondes avec une valeur de l'ordre de la quantité de chaleur de combustion libérée par unité de masse de carburant consommé.
- ✓ Le maillage utilisé est de (140 x 140 x 70).

4.3 Scenario :

Un avion militaire algérien s'est écrasé, mercredi 11 avril, peu après son décollage vers 7h50 heures locales, près de l'aéroport de Boufarik, à une trentaine de kilomètres au sud d'Alger. Le premier bilan officiel fait état de 257 morts, dont une majorité de militaires et des membres de leurs familles.

Les victimes sont les dix membres d'équipage et 247 passagers, dont la plupart sont des personnels de l'Armée nationale populaire ainsi que des membres de leurs familles, précise le ministère, sans faire état d'éventuels survivants. D'après le FLN, parti au pouvoir, 26 membres du Polisario étaient à bord de l'appareil.

Un Iliouchine IL-76 – un appareil militaire de fabrication russe - devait se rendre à Béchar puis Tindouf dans le sud-ouest du pays.

L'appareil s'est écrasé dans un champ dans le périmètre de la base de Boufarik, a précisé le ministère de la Défense. D'après des témoins, l'avion a décollé avec un feu sur l'aile et le pilote, en tentant de revenir à l'aéroport, n'a pas pu éviter qu'il s'écrase sur une ferme et explose au sol, expliquant le nombre des victimes.

Plus de 350 hommes de la protection civile sont mobilisés sur les lieux de l'accident. Ils ont passé plus de deux heures à essayer d'éteindre le feu qui a ravagé la quasi-totalité de l'avion. Maintenant, ils assurent les secours des victimes.

L'avion a évité de justesse l'axe routier qui relie Alger à Oran, les axes routiers alentours ont été fermés pour laisser les secours passer.

4.4. Expérience de BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) :

Peut être défini comme une vaporisation violente à caractère explosif consécutif à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique. Le BLEVE peut survenir avec tout liquide, inflammable ou non, lorsqu'il est chauffé et contraint dans une enceinte fermée. Il peut être distingué deux types de BLEVE, le BLEVE froid et le BLEVE chaud en fonction de la température à laquelle se produit la rupture de l'enceinte (température qui est propre au produit stocké: appelée TLS, Température Limite de Surchauffe, fonction de la température critique du produit).

Les gaz liquéfiés sous pression présentent un risque important en cas de rupture du réservoir lorsqu'ils sont soumis à une source de chaleur importante (cas d'une citerne prise dans un incendie par exemple): l'ébullition-explosion, ou en anglais BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion). Lorsque l'on comprime un gaz, à partir d'une certaine pression, il se transforme en liquide ; cette propriété permet de stocker de grandes quantités de gaz dans des réservoirs : butane, propane, gaz de pétrole liquéfié (GPL)... On a au-dessus du liquide un « ciel gazeux » (la plus grande partie du produit est liquide, une petite partie est gazeuse et occupe le volume restant). Lorsque l'on soutire du gaz du réservoir, le liquide bout

(À température ambiante) et la vapeur ainsi produite vient compenser le volume retiré ; c'est le fonctionnement normal.

Si maintenant le réservoir se rompt (à la suite d'une montée en pression et une fragilisation de l'enceinte par un feu), il peut alors se produire une explosion catastrophique :

- La pression du ciel gazeux se libère et crée à l'extérieur une onde de surpression aérienne; la pression baisse brusquement dans le réservoir.
- Le liquide se met à bouillir violemment dans toute sa masse pour retrouver un équilibre thermodynamique, la quantité de gaz libérée « regonfle » le réservoir (le gaz n'a pas le temps de s'échapper par la fuite) ; le réservoir explose alors littéralement, provoquant une deuxième onde de surpression (bien plus importante que la première) ainsi que la projection d'éclats métalliques.
- Le gaz libéré se mélange à l'air ; s'il s'agit d'un gaz inflammable, il peut former une véritable boule de feu.

4.5. Etude de sensibilité de maillage :

La résolution ou l'étude de la sensibilité du maillage est une étape cruciale et indispensable pour les simulations numériques. Dans le présent travail, un maillage de taille optimale est sélectionné à travers une analyse de sensibilité des cellules du maillage. La Fig.4.1 illustre la variation des températures du front de flamme pour trois thermocouples avec trois maillages différents. Ensuite le tableau 4.1 donne informations sur le temps de simulation de chaque maillage.

Maillage	130-130-65	140-140-70	150-150-75
Temps de simulation	3h et 50 mn	4h et 24 mn	6h et 16mn

Table 4.1 : temps de simulation pour chaque maillage.

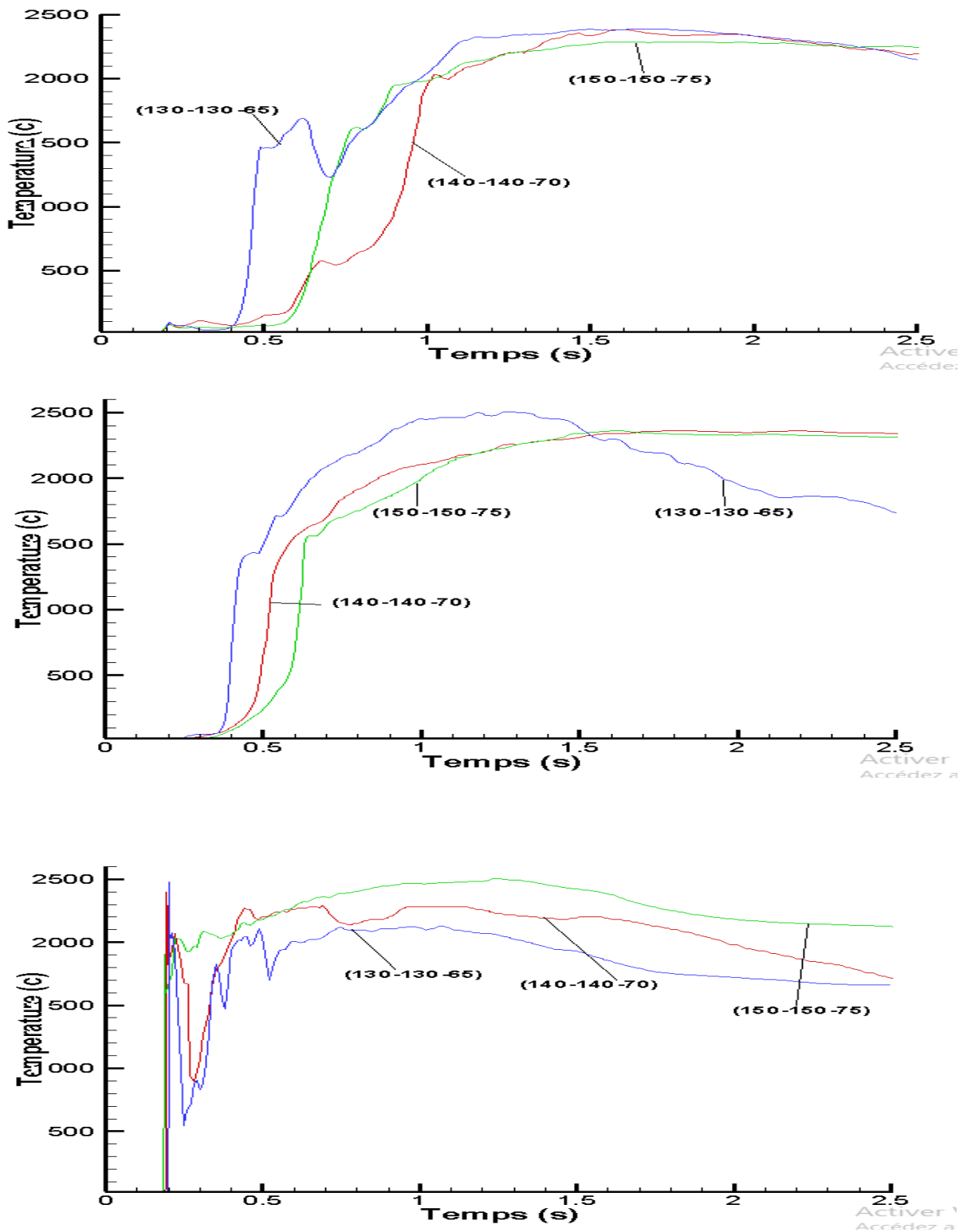


Figure 4.1 : les courbes de température pour trois différentes positions selon les axes (x-y-z) et trois maillages en fonction de temps.

4.6. Etude de sensibilité de capteur :

Etude de sensibilité de capteur est une étape supplémentaire pour assurer le nombre de capteurs suffisant ou la distance optimale entre deux capteurs pour le bon résultat, on va définir le nombre optimal de capteurs par choisit 3 postions déférentes sur l'axe x à hauteur de z=14.76m c'est-à-dire endors l'avion et calculer la vitesse de propagation de flamme et à l'aide de Smokeview on va voir quelle est la distance suffisante pour être dans la plage de vitesse donnée par SMV ?

On a choisi 3 nombre déférent de capteurs : 140-28-35.

- **Maillage 1 de 140 capteurs (la distance entre deux capteurs est 1m) :**

Position de capteur (m)	(23, 0, 14.76)	(24, 0, 14.76)	(-25, 0, 14.76)
Vitesse de flamme (m/s)	11.95	12.37	-12.23

Table 4.2: vitesse de flamme en 3 positions pour le premier maillage.

On calcule la vitesse de flamme par :

$$u_i(x_i, 0, 14.76) = \frac{x_i}{t_{T_{max}}}$$

$t_{T_{max}}$: L'instant où le feu a passé de capteur et Tmax est le pic de la courbe de température à position précisé en fonction de temps T (xi, 0, 14.76, t)

Exemple :

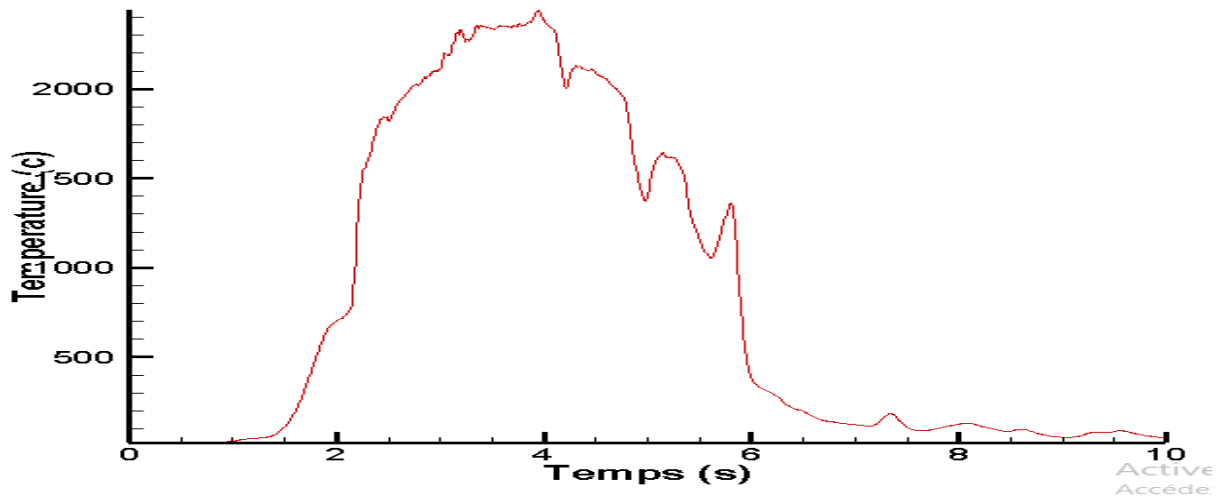


Figure 4.2 : la courbe de température (30, 0, 14,76) en fonction de temps.

- **Maillage 2 de 28 capteurs (la distance entre deux capteurs est 5m) :**

Position de capteur(m)	(20, 0, 14.76)	(-25, 0, 14.76)	(-15, 0, 14.76)
Vitesse de flamme (m/s)	9.75	-5.76	-4.39

Table 4.3 : vitesse de flamme en 3 positions pour le deuxième maillage.

- Les négatives vitesses signifient que le feu est contre l'axe (la face derrière de l'avion)

- **Maillage 3 de 35 capteurs (la distance entre deux capteurs est 2m) :**

Position de capteur (m)	(30, 0, 14.76)	(-30, 0, 14.76)	(-40, 0, 14.76)
Vitesse de flamme (m/s)	7.59	-8.19	-10.41

Table 4.4 : vitesse de flamme en 3 positions pour le troisième maillage.

4.7. Simulation avec le FDS :

Ce projet a pour but d'apprendre à simuler un cas simple d'incendie afin de comprendre la logique du code, de comprendre les hypothèses réalisées, de connaître les informations nécessaires pour modéliser des scénarios d'incendie et enfin d'apprendre comment intégrer ces informations dans le code. Pour cela, il intègre les différents phénomènes physiques qui sont directement associés à un scénario d'incendie :

- La géométrie de l'avion.
- La réaction de combustion.
- Les transferts thermiques (rayonnement, convection et conduction).
- La mécanique des fluides (air, gaz combustible, produit de la combustion, ;).

Les résultats seront visualisés grâce à l'interface graphique de sortie Smokeview v6 et le PyroSim.

4.7.1. Simulation de crash :

4.7.1.1. Le domaine de calcul :

Il est à noter que le domaine de calcul (140, 140, 70) est ouvert vers l'extérieur. Ceci signifie que le domaine de calcul se trouve dans les conditions atmosphériques en température et en pression mais surtout que si de la fumée est produite, celle-ci peut s'échapper du domaine.

Le maillage est un élément clef de la modélisation sous FDS. Il est choisi ici de mailler de manière cubique avec des cellules de 1 m de côté.

4.7.1.2. La géométrie :

Un avion **IL-76** avec une longueur de **46.59 m** et une envergure de **50.50 m** plus une hauteur de **14.76 m** et on ne prend pas en considération la forme cylindrique de fuselage.

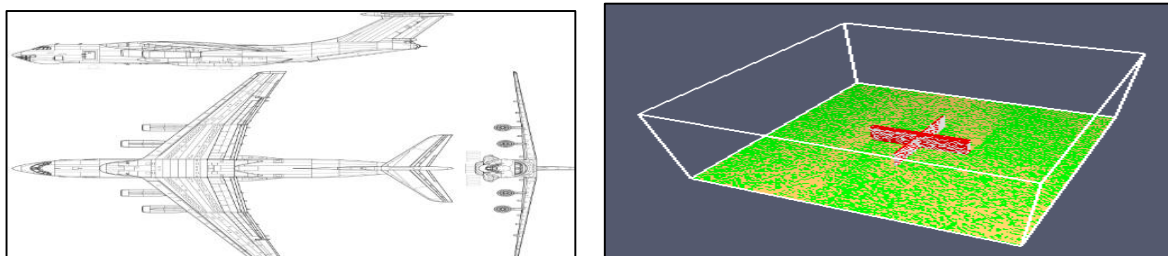


Figure 4.3 : la géométrie d'Iliouchine-76 dessin schématique et simulation par FDS.

4.7.1.3. Les matériaux:

Les matériaux mis en jeu sont les suivants :

- ✓ Matériaux composite.
- ✓ Herbe.
- ✓ Décane.

Sur chaque matériau, il faut au minimum les données suivantes :

- ✓ Masse volumique [kg/m³].
- ✓ Chaleur spécifique massique [kJ/kg.K].
- ✓ Conductivité thermique [W/m.K].

Matériaux	Masse volumique [kg/m ³].	Chaleur spécifique massique [kJ/kg.K].	Conductivité thermique [W/m.K].
Matériaux composite	2800	1	1.27
Herbe	3730	2.5	0.038
Décane	730	2	0.15

Table 4.5 : les propriétés de matériaux utilisés dans la simulation.

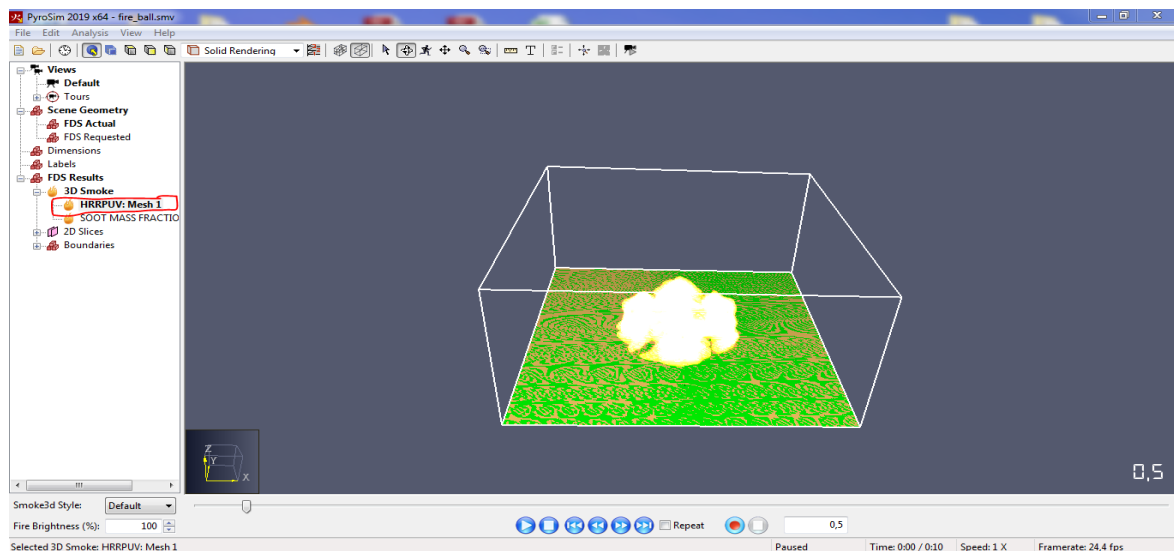


Figure 4.4: la simulation sans l'effet de suie à t=0.5s.

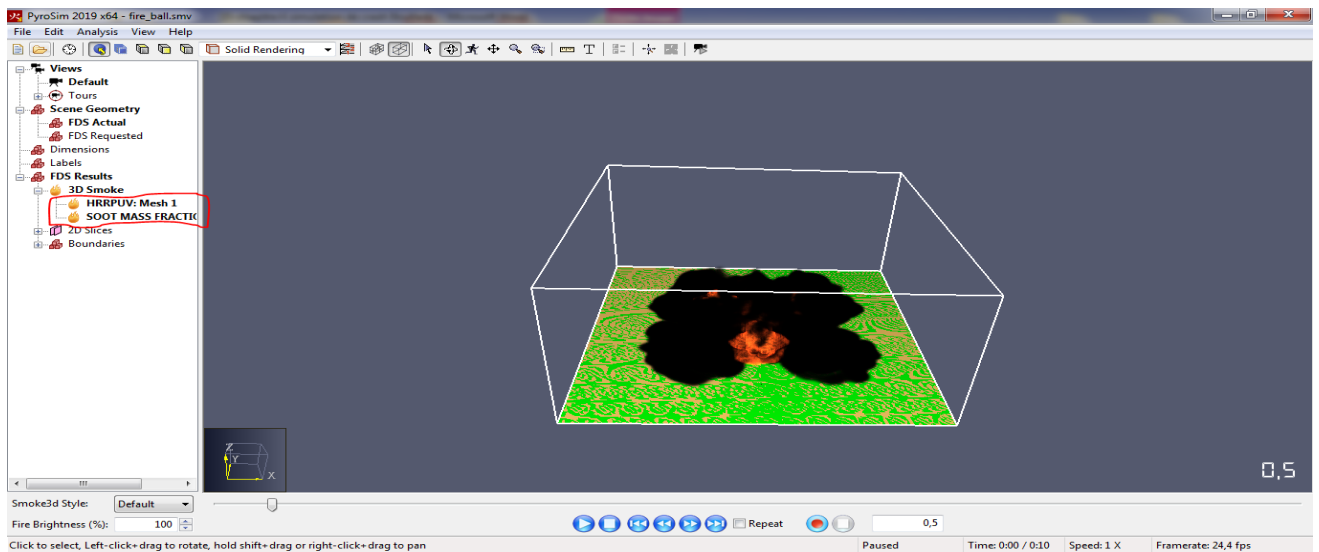


Figure 4.5 : la simulation avec l'effet de suie à $t=0.5s$.

4.7.2. Simulation de BLEVE :

4.7.2.1 Domaine de calcul et la géométrie :

Le domaine de calcul de cette simulation de BLEVE est (5, 5, 5) et le maillage choisi ici manière cubique avec des cellules de 0.07 m de côté et la géométrie utilisée est (3, 2, 2).

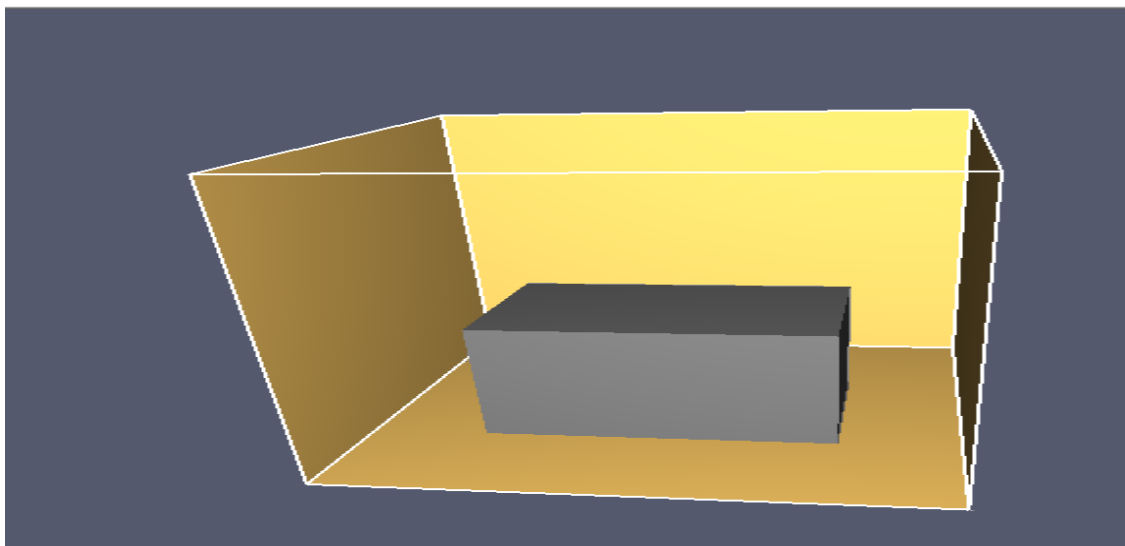


Figure 4.6 : la géométrie utilisée pour le BLEVE.

4.7.2.2. Les matériaux:

Les matériaux mis en jeu sont les suivants :

- ✓ Acier.
- ✓ Benzène C_6H_6 .

Sur chaque matériau, il faut au minimum les données suivantes :

- ✓ Masse volumique [kg/m³].
- ✓ Chaleur spécifique massique [kJ/kg.K].
- ✓ Conductivité thermique [W/m.K].

Matériaux	Masse volumique [kg/m ³].	Chaleur spécifique massique [kJ/kg.K].	Conductivité thermique [W/m.K].
Acier	7897	54	46.5
Benzène	874	1.72	0.14

Table 4.7 : les propriétés de matériaux utilisés dans la simulation.

```

bleve - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
&HEAD CHID='bleve',
TITLE='simulation de BLEVE' /

&MESH XB = 0.0,5.0,0.0,5.0,0.0,5.0,
IJK = 65,64,64/

&TIME T_END = 10/
&MISC TMPA = 18/

&MATL ID = 'BENZENE'
CONDUCTIVITY = 0.14
DENSITY = 874.
SPECIFIC_HEAT = 1.72/

&MATL ID = 'STEEL'
SPECIFIC_HEAT = 0.465
DENSITY = 7897.
CONDUCTIVITY = 54.0/

&SURF ID = 'SURF_STEEL'
MATL_ID = 'STEEL'
THICKNESS = 0.005
BACKING = 'EXPOSED'
COLOR = 'GRAY'/

&SURF ID = 'SURF_BENZENE'
MATL_ID = 'BENZENE'
THICKNESS = 0.1
BACKING = 'EXPOSED'
COLOR='GRAY'/

&OBST XB= 1, 4, 1.5, 3.5, 0, 2, SURF_IDS='SURF_BENZENE','SURF_STEEL','SURF_STEEL'

&SURF ID='FIRE_BENZENE',
COLOR='GRAY'
HRRPUA=93232.222/

&VENT XB= 1, 4, 1.5, 3.5, 2, 2 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre
&VENT XB= 4, 4, 1.5, 3.5, 0, 2 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre
&VENT XB= 1, 4, 3.5, 3.5, 0, 2 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre
&VENT XB= 1, 4, 1.5, 1.5, 0, 2 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre
&VENT XB= 1, 4, 1.5, 3.5, 0, 0 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre
&VENT XB= 1, 1, 1.5, 3.5, 0, 2 SURF_ID='FIRE_BENZENE' // Bac au centre

&REAC ID='BENZENE'
C=6,
H=6,
HEAT_OF_COMBUSTION = 40100,
CO_YIELD=0.067,
SOOT_YIELD=0.181/
    
```

Figure 4.7 : Le fichier d'entrée de BLEVE.

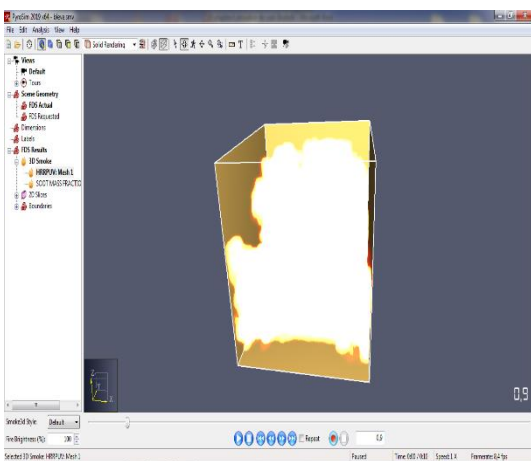


Figure 4.8: La simulation sans l'effet la suie à t=0.9s

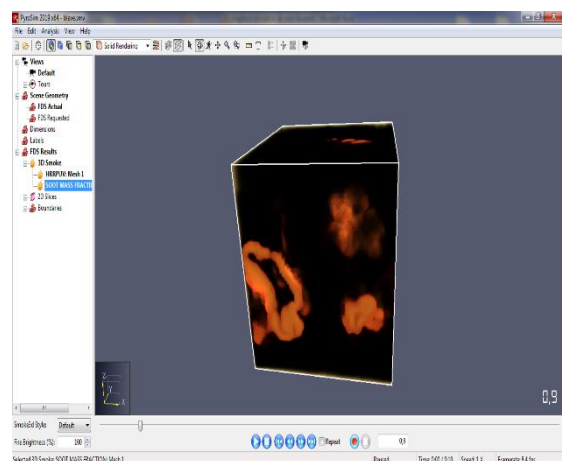
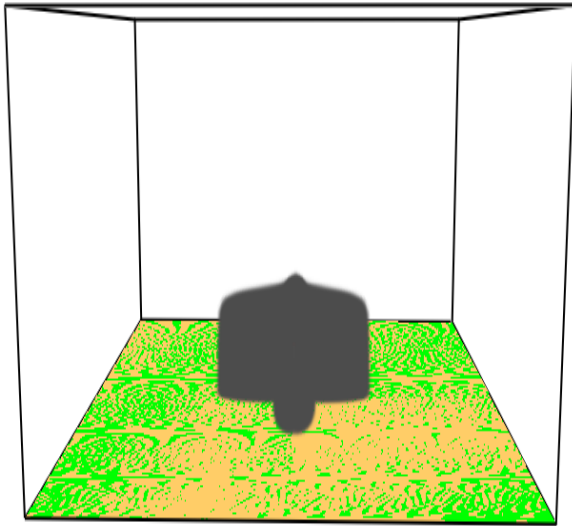


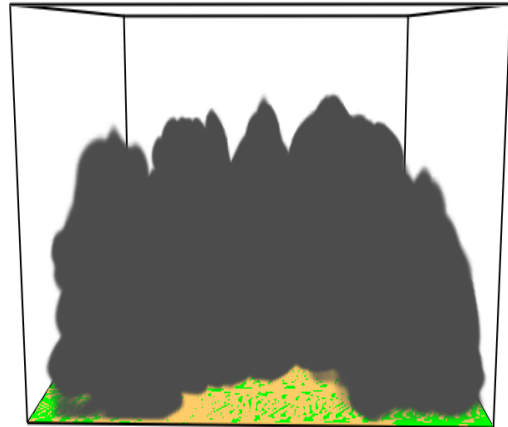
Figure 4.9: la simulation avec l'effet de suie à t=0.9s

4.7. Affichage du Smokeview :

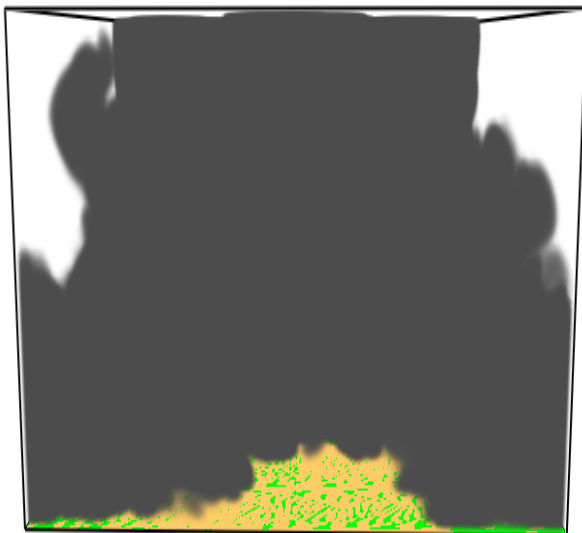
Comme le nom indique vision de la fumée donc l'objectif principal de Smokeview est suivi la fumée parce que la chose la plus danger dans les feux est les gaz toxiques (Le monoxyde de carbone (CO) avec un haut pourcentage) alors on fait les études sur les feux pour réduire les risques des gaz toxiques.



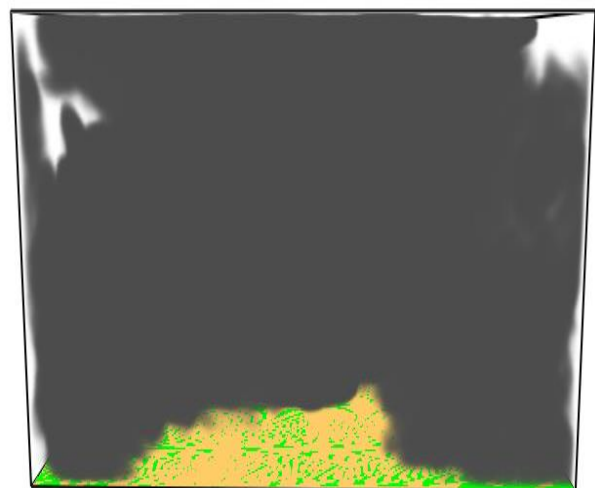
Pour $t=0.2s$.



Pour $t=2.5s$.



Pour $t=5s$



Pour $t=10s$.

Figure 4.10 : la vision de la fumée pour des différents instants avec SMV.

4.8.1. Simulation de pourcentage de la fumée dans l'air :

On va voir dans cette partie la variation du pourcentage de la fumée dans l'air en fonction du temps pour une position donnée pour les trois axes :

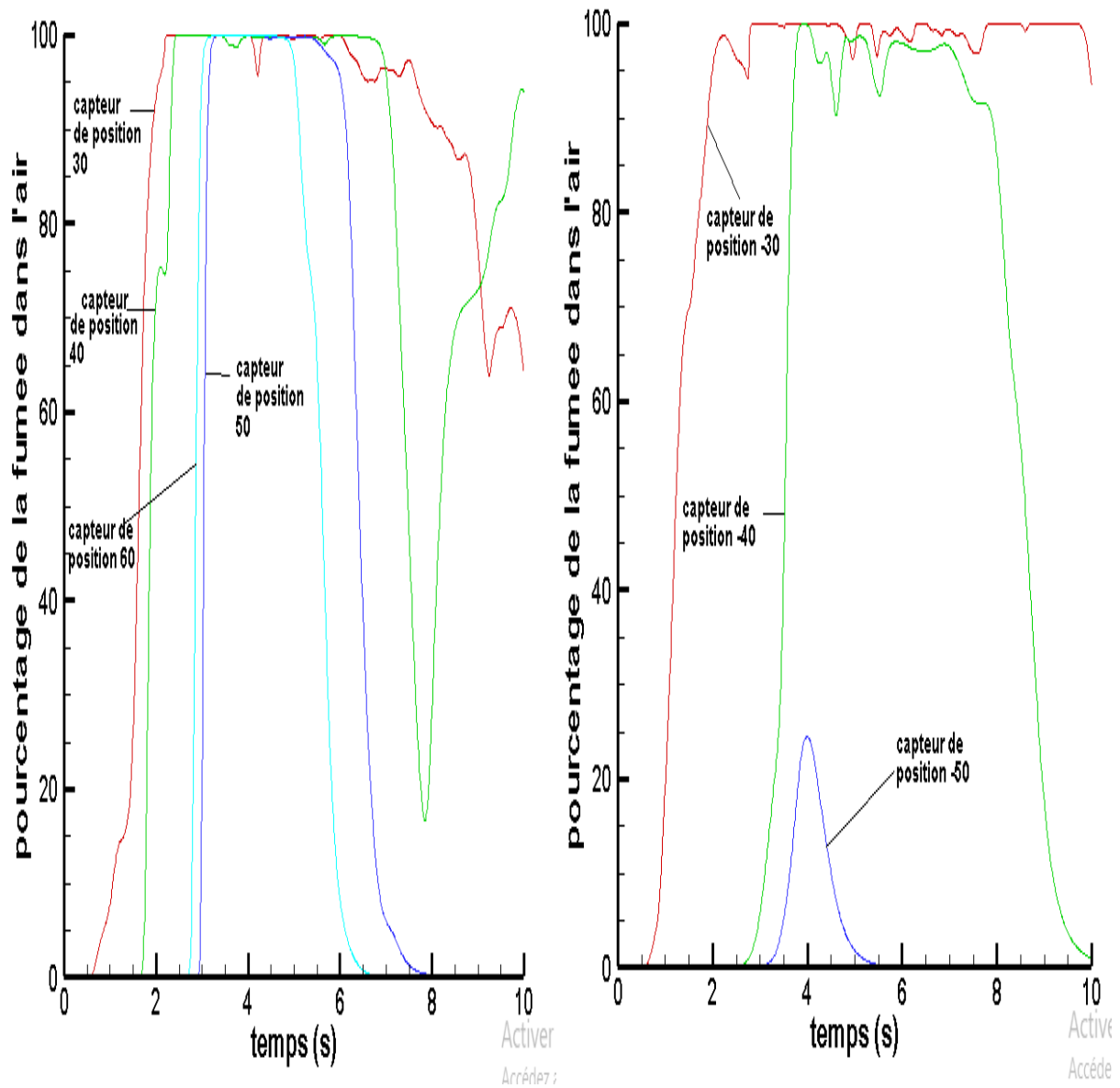


Figure 4.11 : pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe x.

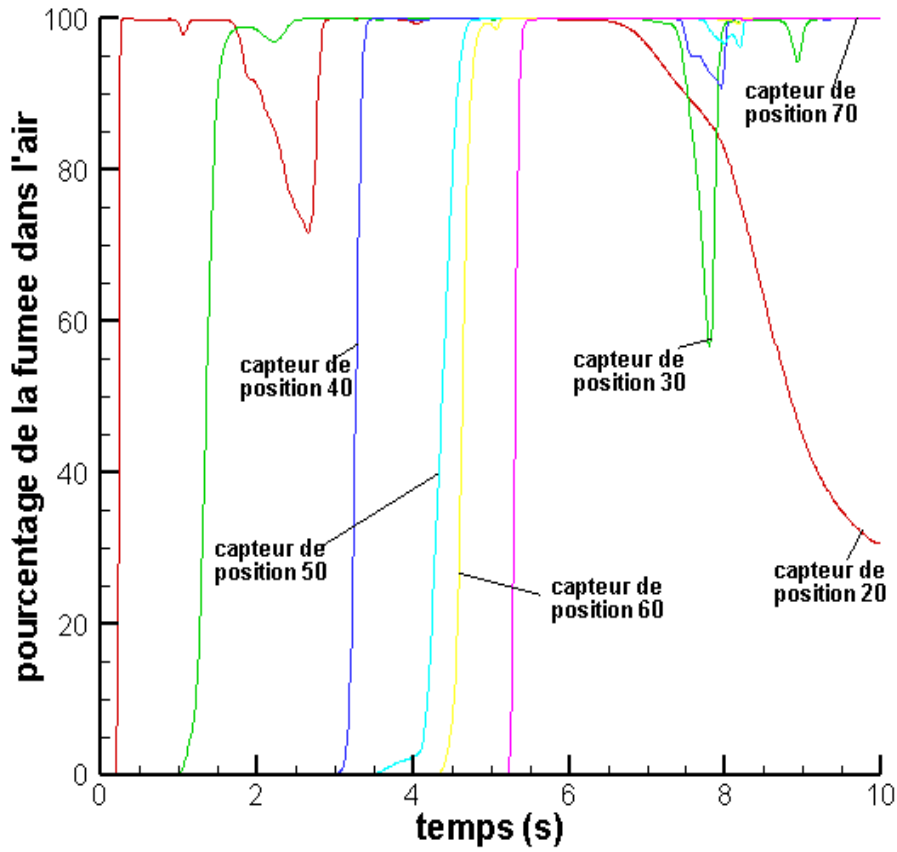


Figure 4.12 : pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe y.

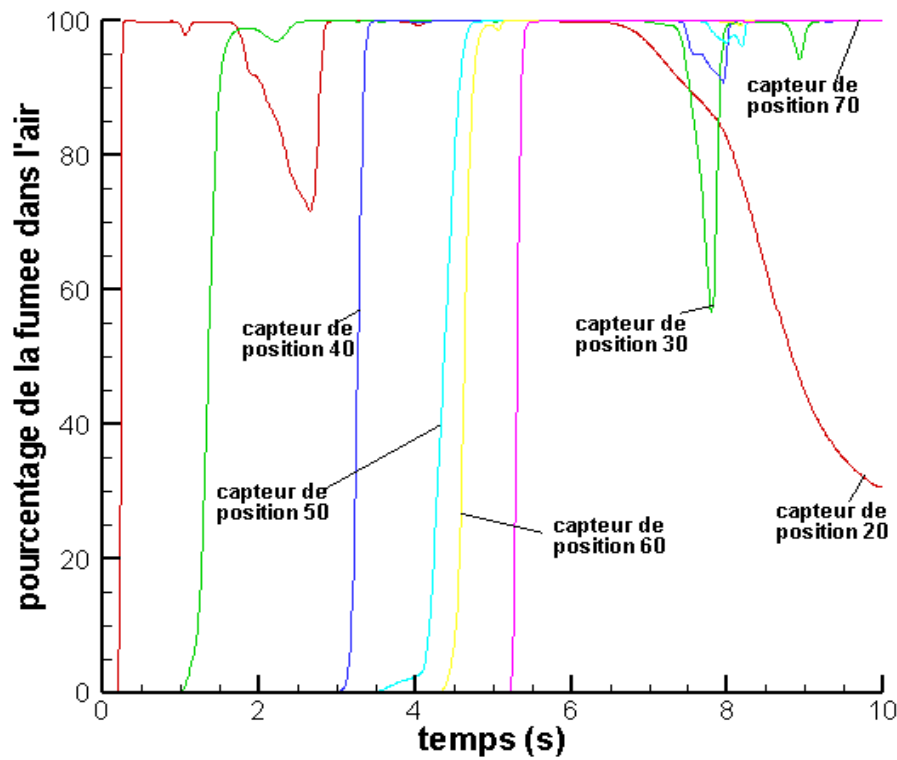


Figure 4.13 : pourcentage de la fumée dans l'aire pour différentes positions d'axe z.

4.9. Détermination de la fonction de vitesse de flamme :

4.9.1. Détermination de la fonction de vitesse verticale :

Pour déterminer la fonction de vitesse verticale on a besoin de l'interpolation et comme on le sait il y'a plusieurs des interpolations on va choisir le polynôme de Newton.

- **Polynôme de Newton :**

L'interpolation de Newton donne une suite de (n+1) points et une fonction f, on doit déterminer un polynôme de degré n qui interpole f aux points considérés. On utilisera pour cela la notion de différences divisées.

Le polynôme est donné comme suit :

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n \alpha_k e_k(x)$$

$$= \alpha_0 + \alpha_1(x - x_0) + \alpha_2(x - x_0)(x - x_1) + \dots + \alpha_n(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})$$

Avec :

$$\alpha_k = \frac{f[x_1, \dots, x_k] - f[x_0, \dots, x_{k-1}]}{x_k - x_0} = f[x_0, \dots, x_k]$$

Polynôme de la vitesse verticale en fonction de la position :

On détermine les coefficients de polynôme à l'aide de fortran, on va choisir 5 points donc on va avoir polynôme de degré 4.

La position(m)	16	17	19	20	21
La vitesse verticale (m/s)	10	8.58	5.24	5.61	4.23

Table 4.8 : les valeurs de vitesse verticale en fonction de position.

```

b      polynome de Newton
      real a(10,10),x(10),f(10)
      integer n
      write(*,*) 'donner n'
      read(*,*) n
      write(*,*) 'donner la valeur de x(i)'
      read(*,*)(x(i),i=1,n)
      write(*,*) 'donner la valeur f(i)'
      read(*,*)(f(i),i=1,n)
      do i=1,n
      a(i,1)=f(i)
      end do
      do i=2,n
      do j=2,n
      if(i.lt.j)then
      a(i,j)=0
      else
      a(i,j)=(a(i,j-1)-a(i-1,j-1))/(x(i)-x(i-j+1))
      end if
      end do
      end do
      do i=1,n
      write(*,*)(a(i,j),j=1,i)
      end do
      stop
      end
  
```

Figure 4.14 : Les courbes des diamètres de BEVE et de ballon de crash en fonction de temps.

```

donner n
5
donner la valeur de x(i)
16
17
19
20
21
donner la valeur f(i)
10
8.58
5.24
5.61
4.23
10.000000
8.580000      -1.420000
5.240000      -1.670000      -8.333334E-02
5.610000      3.700004E-01      6.800001E-01      1.908334E-01
4.230000      -1.380000      -8.750002E-01      -3.887501E-01
-1.159167E-01
Stop - Program terminated.
Press any key to continue
  
```

Figure 4.15 : l'exécution de programme pour la vitesse verticale.

Le programme nous donne les coefficients α_n et après les simplifications on obtint le polynôme suivant :

$$V_v(z) = -0.11z^4 + 8.11z^3 - 223.2533z^2 + 2718.4189z - 12341.4576$$

4.9.2. Détermination de la fonction de vitesse radiale :

On recherche l'expression de vitesse radiale à partir de vitesse cartésien :

$$V_r = \frac{r}{t}$$

Tous les positions de capteurs sont de (x,0) et comme on le sait :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Donc : } r = x \rightarrow V_r = \frac{x}{t}$$

A l'aide de l'interprétation de Newton on peut obtenir l'expression de vitesse radiale en fonction de rayon :

La position (m)	23	25	27	29	31
Vitesse radiale (m/s)	11.95	12.195	9.15	7.23	8.611

Table 4.9 : les valeurs de la vitesse radiale en fonction de rayon.

```

donner n
5
donner la valeur de x(i)
23
25
27
29
31
donner la valeur f(i)
11.95
12.195
9.15
7.23
8.611
      11.950000
      12.195000      1.224999E-01
      9.150000      -1.522500      -4.112500E-01
      7.230000      -9.599998E-01      1.406251E-01      9.197918E-02
      8.611000      6.905000E-01      4.126250E-01      4.533331E-02
      -5.830733E-03
Stop - Program terminated.
Press any key to continue
    
```

Figure 4.16 : l'exécution de programme pour la vitesse radiale.

La fonction de la vitesse radiale :

$$V_r(r) = -0.0058r^4 + 0.6942r^3 - 30.7028r^2 + 594.8562r - 4251.215$$

4.9.3 Comparaison entre le diamètre max de BLEVE et de ballon de feu de crash:

D'abord il faut donner une expression de diamètre en fonction de temps pour arriver à faire la comparaison :

$$V_r(r) = \frac{r}{t} \rightarrow r(t) = V_r \cdot t ; d = 2r = 2V_r \cdot t$$

Temps (s)	0.5	1	2	3.2	4	5.2
Diamètre de BLEVE (m)	38	60	83.6	83	83	90.8

Table 4.10 : l'évolution de diamètre de BLEVE en fonction de temps.

Temps (s)	1.94	1.95	2.05	2.5	2.95	3.35	3.5	3.51	4.9	5
Diamètre de ballon (m)	48	46	50	52	54	56	70	72	76	77

Table 4.11 : l'évolution de diamètre de ballon de crash en fonction de temps.

Temps (s)	3.75	3.8	3.83	3.9	3.98	4.11	5
Diamètre de ballon (m)	46	48	50	52	54	56	64

Table 4.12 : le diamètre de notre BLEVE en fonction de temps.

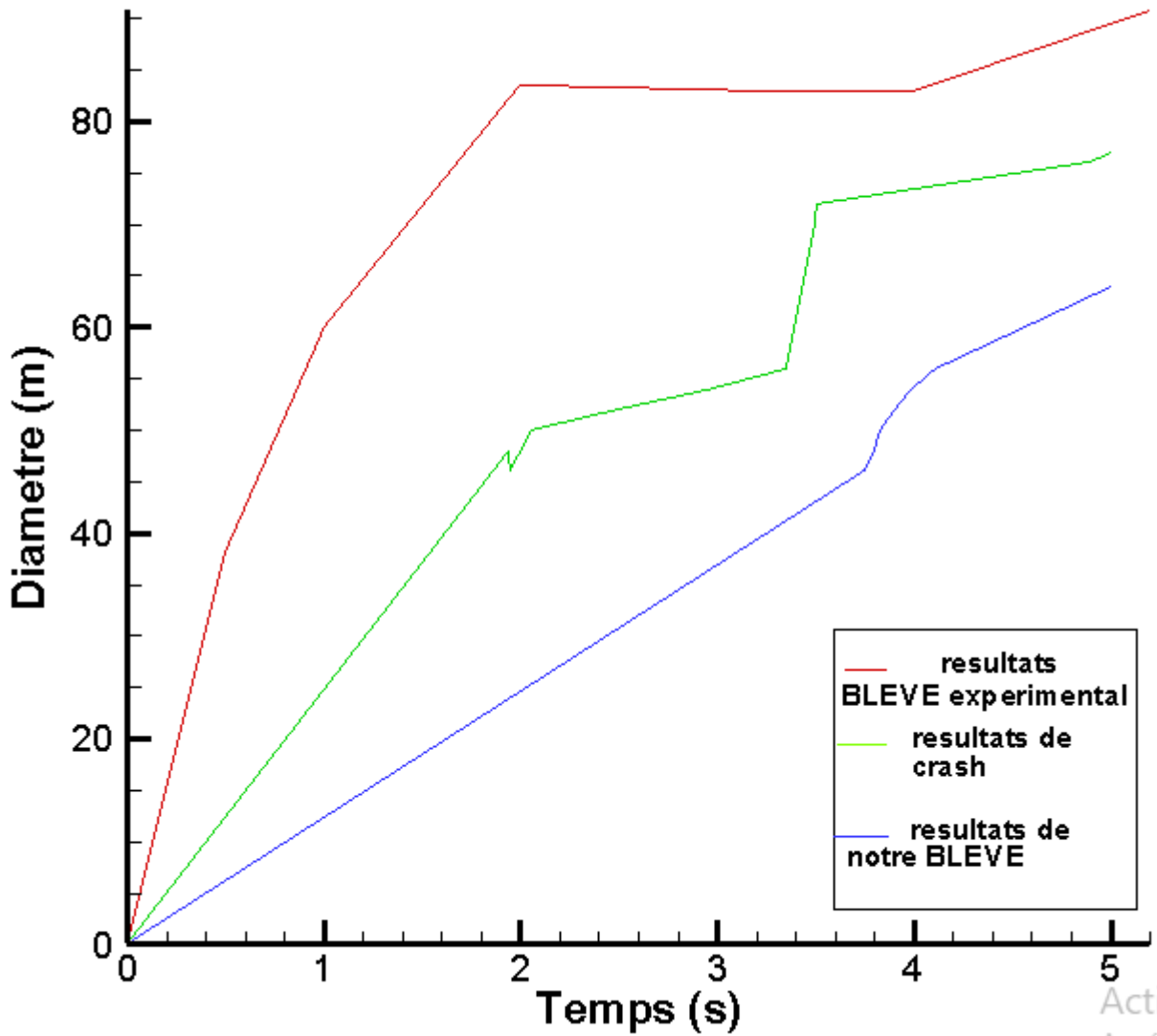


Figure 4.17 : Les courbes des diamètres de BEVE et de ballon de crash en fonction de temps.

Activer
Accédez a

Chapitre 5

Résultats et commentaires

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET COMMENTAIRES

5.1.Introduction :

Dans le cinquième chapitre on discute les résultats et on interprète les graphes. D'abord on démarre par les résultats et les graphes de sensibilité de maillage pour les trois maillages (130-130-65,140-140-70,150-150-75) et on explique le choix de notre maillage.

Ensuite on fait la même chose pour étude de sensibilité de capteurs et on argumente le choix de nombre de capteurs. Puis il y'a les fonctions de vitesse verticale et radiale pour ces deniers on calcul l'erreur entre la solution numérique et la vitesse de flamme qu'a été donnée par la simulation.

Enfin on discute la différence entre le diamètre de BLEVE et de ballon de feu de crash pour répondre aux questions quelle est la déférence entre l'expérience et la simulation ? Et pourquoi il y'a les paradoxes entre eux.

5.2. Analyse de la sensibilité de maillage:

Pour arriver à choisir un bon maillage et optimal on a fait une étude de sensibilité de maillage pour trois volumes de contrôle et nombres de cellules différents mais avec les mêmes dimensions de géométrie (avion Iliouchine IL-76) :

- **Maillage (130-130-65) :**

Nombre de cellules	la longueur (axe x)	La largeur (axe y)	La hauteur (axe z)
1098500	130	130	65

Table 5.1 : notions sur le premier maillage.

- **Maillage (140-140-70) :**

Nombre de cellules	la longueur (axe x)	La larguer (axe y)	La hauteur (axe z)
1372000	140	140	70

Table 5.2 : notions sur le deuxième maillage.

• **Maillage (150-150-75) :**

Nombre de cellule	La longueur (axe x)	La largeur (axe y)	La hauteur (axe z)
1687500	150	150	75

Table 5.3 : notions sur le troisième maillage.

• **Les dimensions de l'avion Iliouchine IL-76 :**

Type	Envergure (m)	Longueur (m)	Hauteur (m)
ILIOUCHINE IL-76	50.50	46.59	14.76

Table 5.4 : la géométrie de l'avion Iliouchine IL-76.

On va faire l'analyse de résultats de l'étude de sensibilité pour le premier maillage (130-130-65) le nombre des cellules n'est pas grand donc le temps de simulation est petit mais la précision n'est pas haute.

Ensuite le deuxième maillage (140-140-70) a un nombre des cellules assez grand avec un temps de calcul acceptable (4h-24mn) et la précision n'est pas mal par rapport le premier maillage.

Enfin le troisième maillage celui qui a le nombre des cellules le plus grand et la meilleure précision mais il y'a un problème avec le temps de simulation (6h-16mn) est grand donc il y'a risque de divergence.

On conclure qu'après l'analyse d'étude de sensibilités le deuxième maillage est le meilleur car la précision est bien et le temps de simulation est moyen en plus n'y'a pas de risque de divergence.

5.3. Analyse de la sensibilité de capteurs :

Etude de sensibilité de capteurs est pour but de déterminer le nombre suffisant de capteur ou la distance optimale entre deux capteurs on a choisi trois distances (1m-2m-5m) donc les nombres des capteurs pour ces distances sont 140, 35 et 28. Après on discute les résultats pour trouver le meilleur nombre de capteurs, la figure 5.1 montre que pour la même

position (30m) on trouver des différents profils de température en plus la table 5.5 affiche que les capteurs nous donnent les mêmes vitesses pour la même position aussi.

A l'aide de SMV (figure 5.2) qui nous donne tous les détails pour le profil de température et le PyroSim (figure 5.3) qui affiche la plage de vitesse on peut dire que la meilleure distance entre deux capteurs est 1m ou le nombre de capteurs approprié est 140 capteurs.

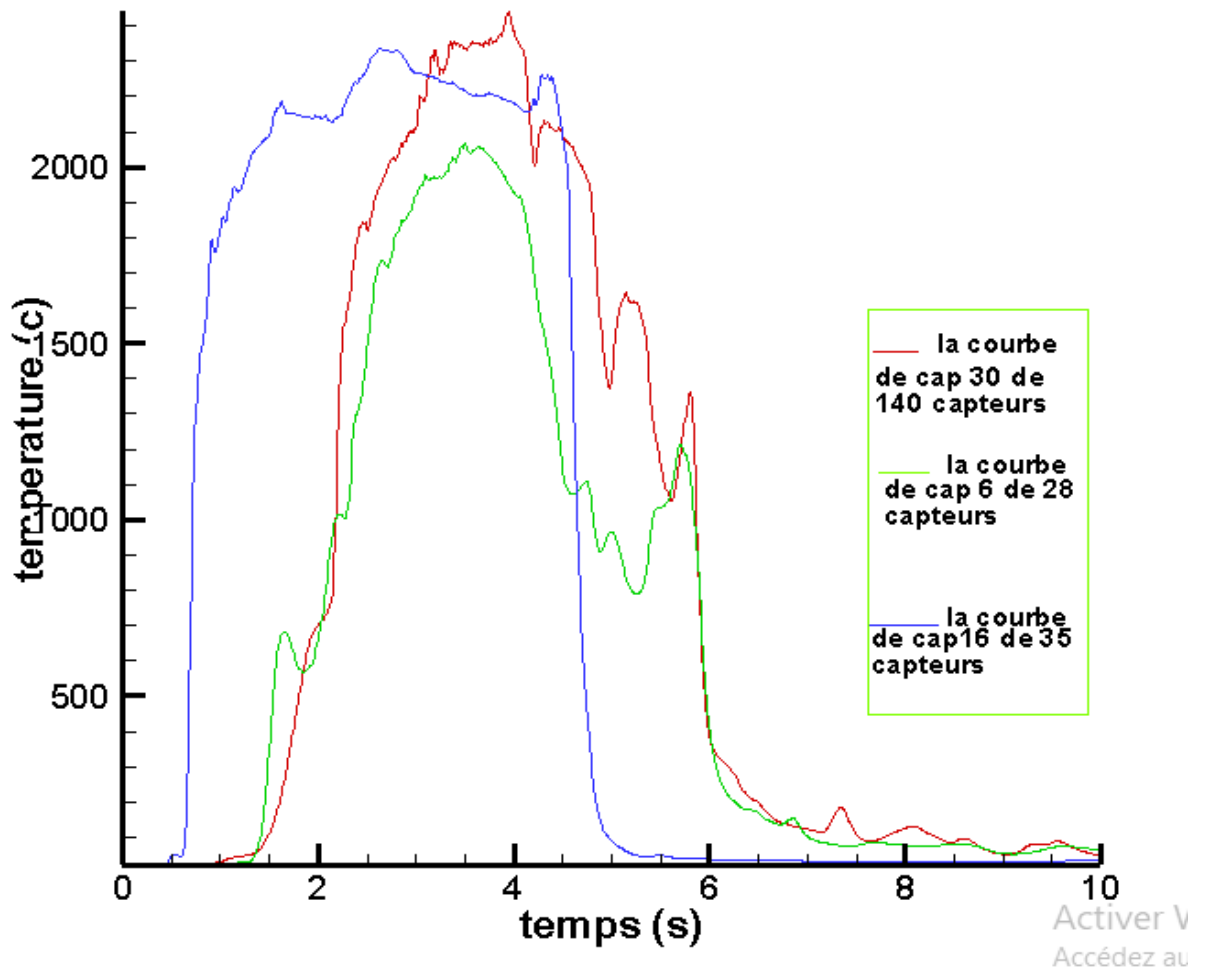


Figure 5.1 : profils de température pour la position 30m mais différents capteurs.

Numéros de capteur par rapports les autres	Cap 30 de 140 capteurs	Cap16 de 35 capteurs	Cap 6 de 28 capteurs
La vitesse (m/s)	7.59	7.59	7.59

Table 5.5 : les valeurs de vitesse pour la position 30m de différents capteurs.

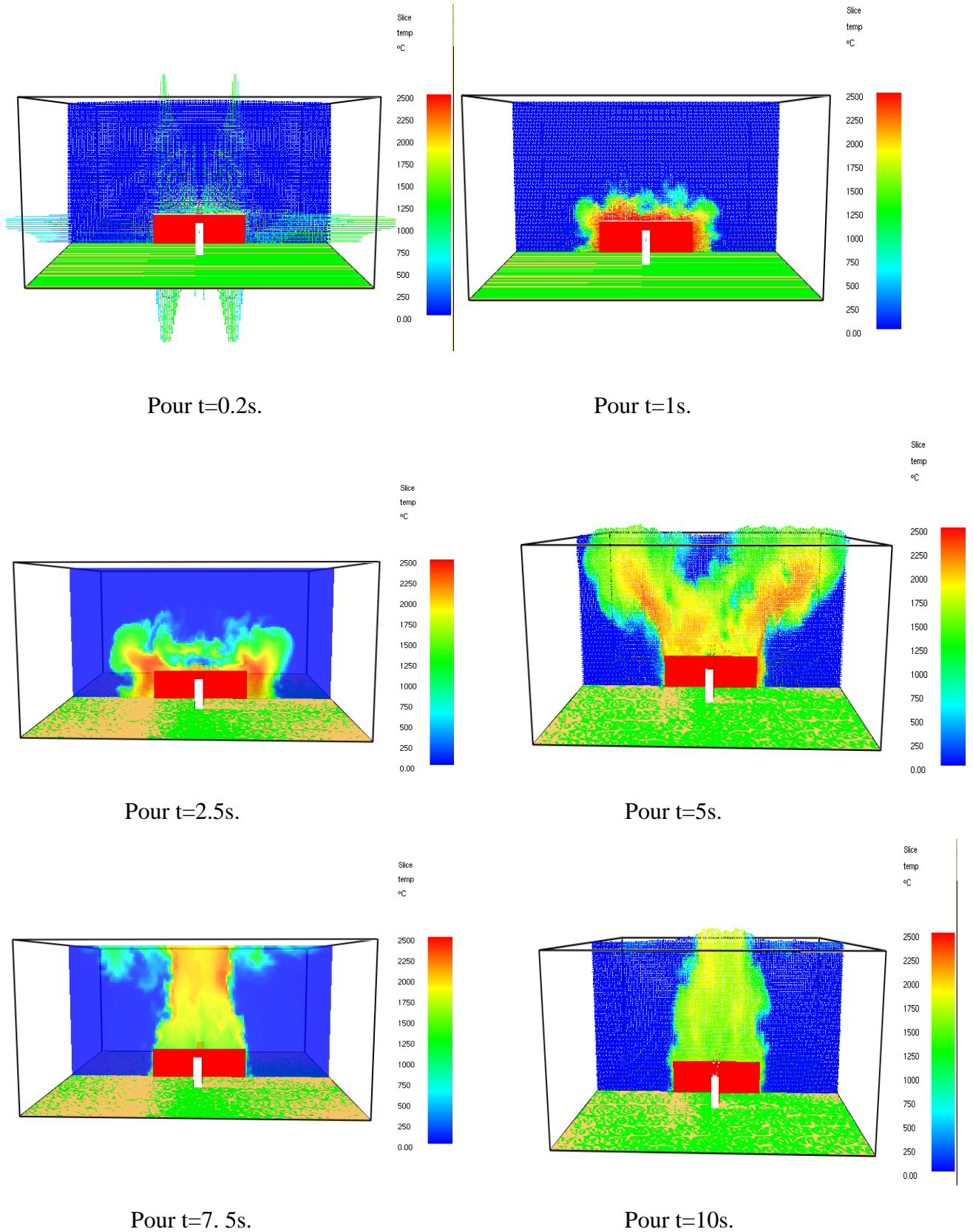


Figure 5.2 : le profil de température pour différents instants avec SMV.

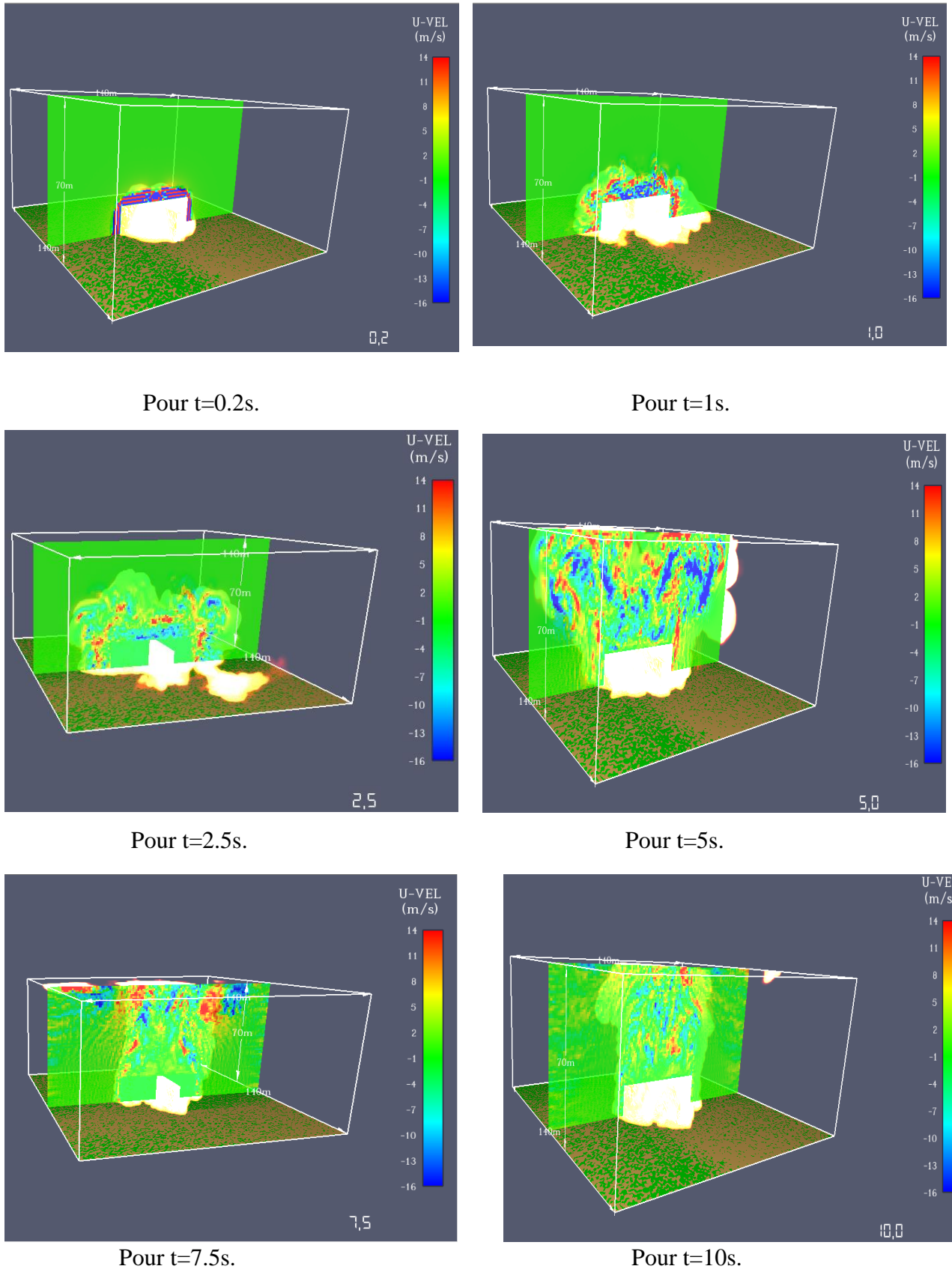


Figure 5.3 : la plage de vitesse avec PyroSim.

5.4. Commentaire sur la fonction de vitesse verticale :

Dans cette partie on va essayer de faire une petite comparaison entre les valeurs de vitesse qu'on a calculées par la méthode de distance/temps et les valeurs de polynôme, la comparaison sera réalisée sur deux phases la première avec les point qu'on a trouvés le polynôme avec le deuxième on va choisir des points différents des premiers :

- **La première phase (16-21) :**

D'après la table 5.6 et la figure 5.4 on voit que les valeurs de vitesse de première méthode et les valeurs de polynôme sont presque les mêmes.

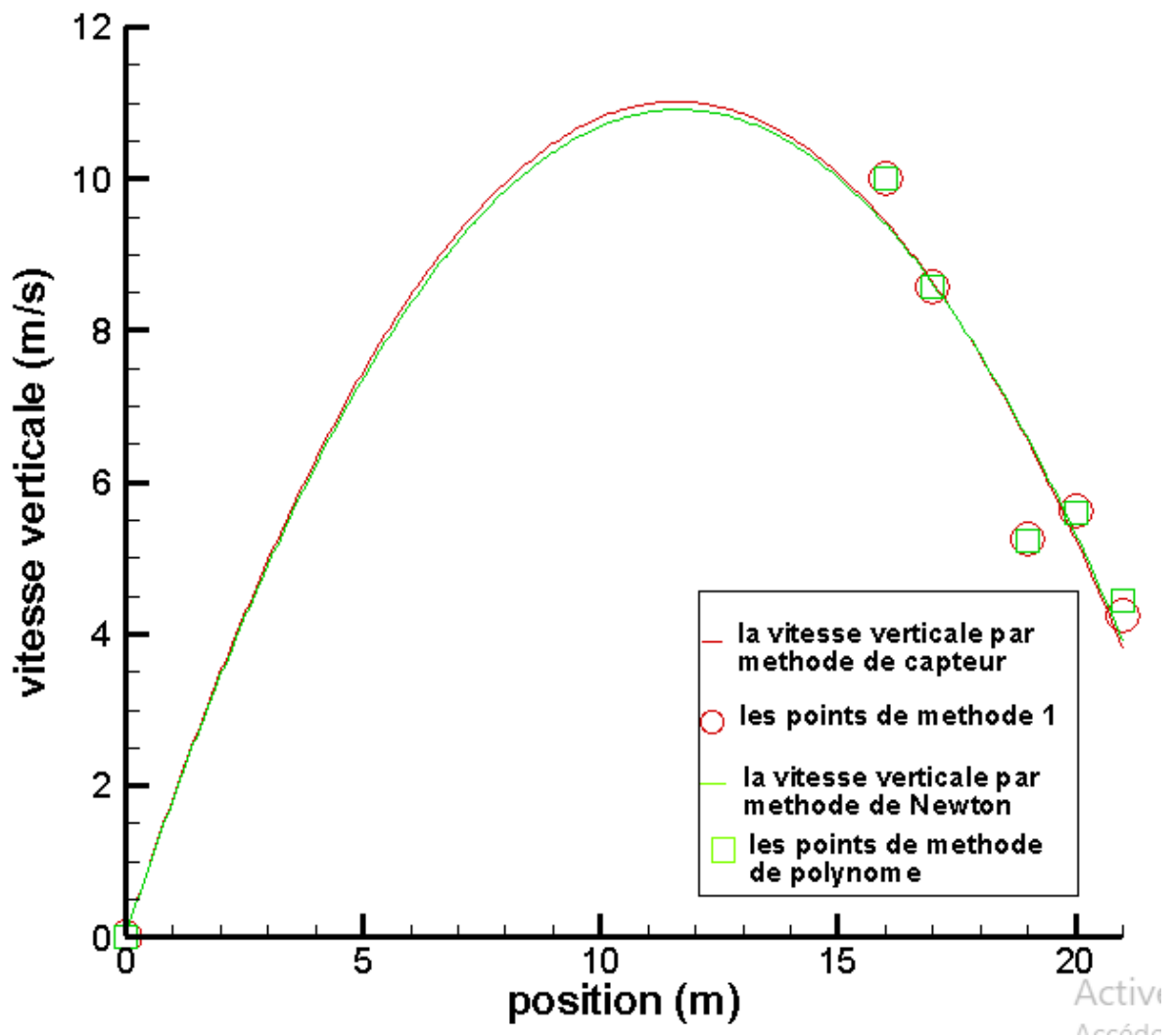


Figure 5.4 : la vitesse verticale pour les deux méthodes.

La position (m)	16	17	19	20	21
La vitesse verticale de la méthode 1 (m/s)	10	8.58585859	5.24861878	5.61797753	4,23387097
La vitesse verticale de polynôme (m/s)	10	8.58	5.2402	5.6004	4.434

Table 5.6 : les valeurs de vitesse verticales par les deux méthodes.

Maintenant on va calculer l'erreur relative de chaque point et déterminer la valeur moyenne de l'erreur relative :

$$E_1 = \left| \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \right| = 0$$

$$E_2 = \frac{8.58585859 - 8.58}{8.58585859} = 6.4 * 10^{-4}$$

$$E_3 = 1.6 * 10^{-3}$$

$$E_4 = 3.12 * 10^{-3}$$

$$E_5 = 0.047$$

La valeur moyenne de l'erreur : $E_m = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5} =$

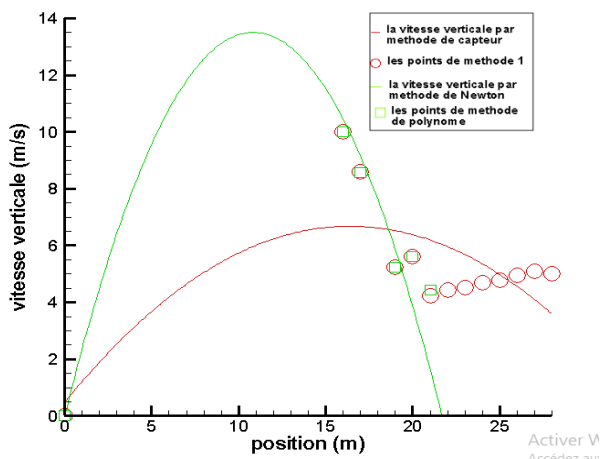
$$E_m = 0.01$$

• **La deuxième phase (22-28) :**

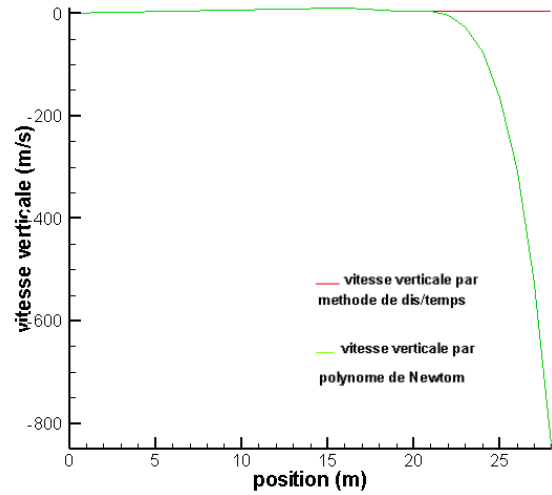
D'après la figure 5.5 et la table 5.7 et sans calculer de l'erreur on peut dire que le polynôme n'est plus valide pour l'utilisation hors des points de détermination peut-être car la vitesse verticale de flamme est instable et Tourbillonnaire.

position (m)	22	23	24	25	26	27	28
Vitesse verticale méthode1 (m/s)	4.426559	4.527559	4.678362	4.780114	4.952380	5.094339	5
Vitesse verticale de polynôme (m/s)	-3.719	-26.95	-76.02	-164.29	-307.79	-525.18	-837.75

Table 5.7 : les valeurs de vitesse verticale par les deux méthodes.



La vitesse verticale de 0 à 10 m/s.



La vitesse verticale de -800 à 0 m/s

Figure 5.5 : la vitesse verticale pour les deux méthodes.

5.5. Commentaire sur la fonction de vitesse radiale :

On va faire la même chose dans cette partie une comparaison entre la vitesse déterminée par le polynôme et par la méthode de distance/temps. On divise la comparaison aussi dans cette partie à deux phases comme la partie avant :

- **La première phase (23-25-27-29-31) :**

La figure 5.6 et la table 5.8 montrent que pour les points de détermination de polynôme la vitesse radiale de méthode une et de polynôme sont très proche :

La position (m)	23	25	27	29	31
Vitesse radiale De méthode 1 (m/s)	11.95	12.195	9.15	7.23	8.611
Vitesse radiale De polynôme (m/s)	11.932	12.03	9.06	7.11	8.41

Table 5.8 : les valeurs de vitesse radiale par les deux méthodes.

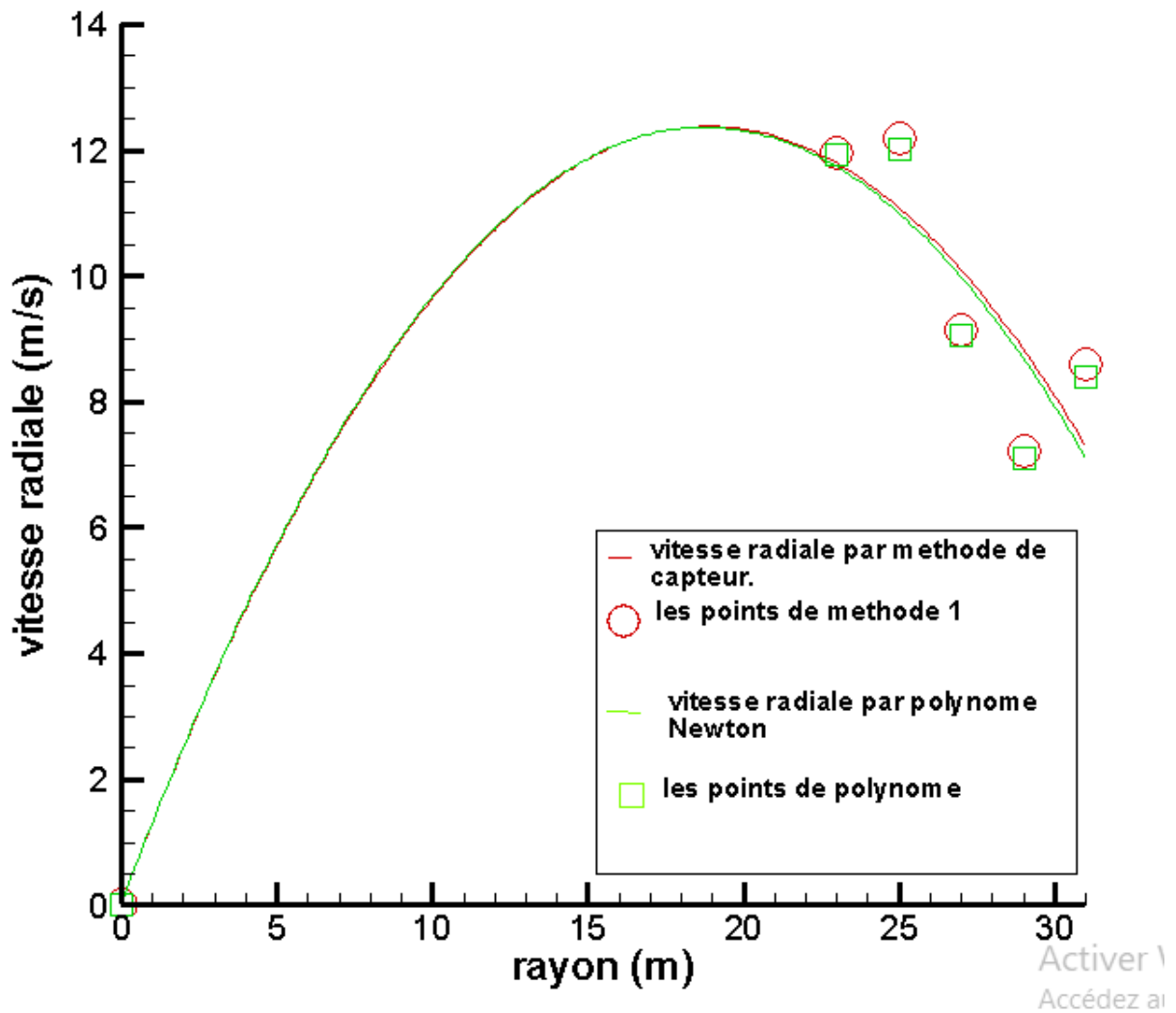


Figure 5.6 : la vitesse radiale pour les deux méthodes.

On calcule l'erreur relative pour cette phase :

$$E_1 = 1.5 * 10^{-3}$$

$$E_2 = 0.0135$$

$$E_3 = 9.83 * 10^{-3}$$

$$E_4 = 0.016$$

$$E_5 = 0.023$$

L'erreur moyenne :

$$E_m = 0.012676$$

• La deuxième phase (32-33-34-35-36) :

A partir de la figure 5.7 et la table 5.9 on voit que les valeurs de la vitesse radiale déterminées par polynôme de Newton est loin de celles de première méthode mais par rapport à la vitesse verticale la vitesse radiale plus stable ou on peut dire que la propagation radiale est la plus proche de propagation de flamme.

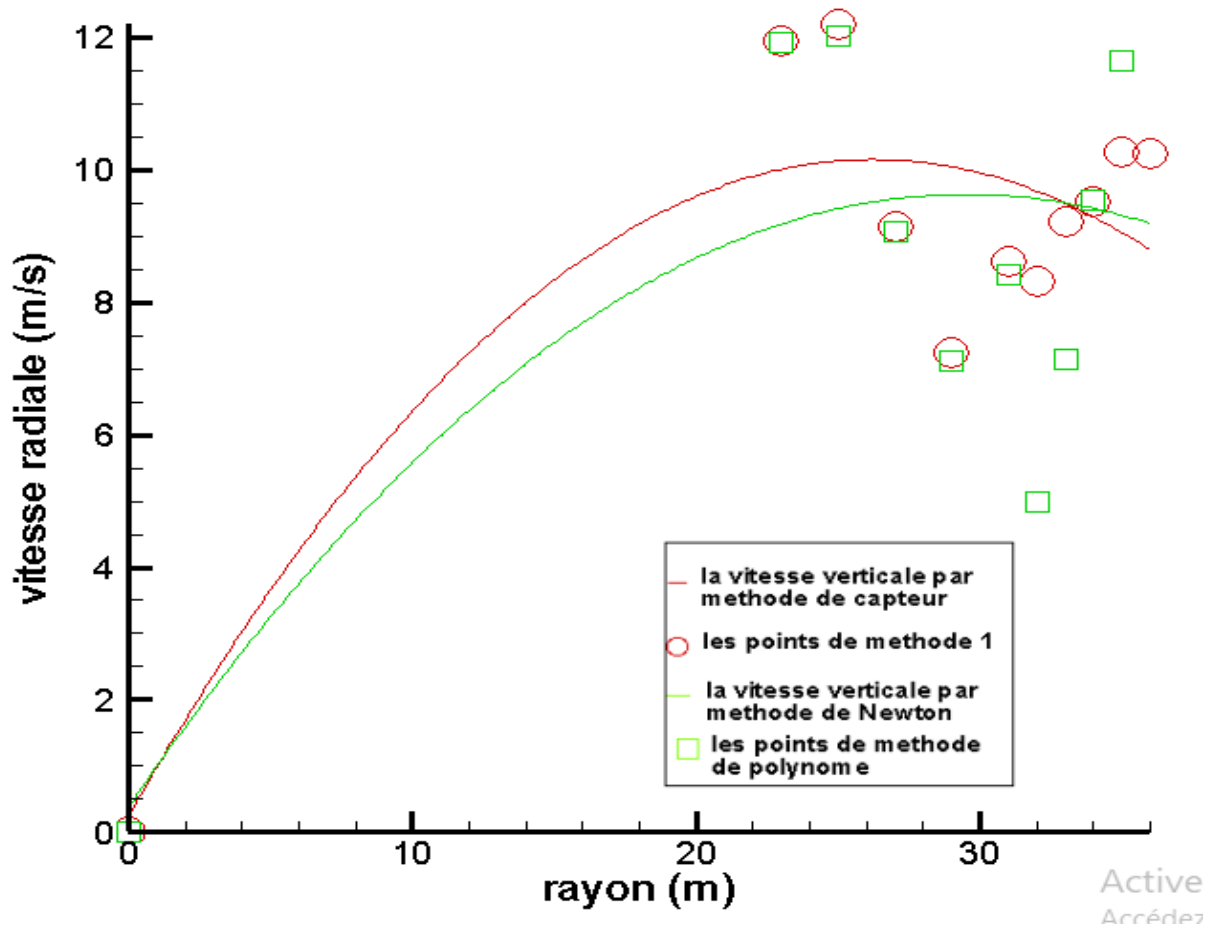


Figure 5.7 : la vitesse radiale pour les deux méthodes.

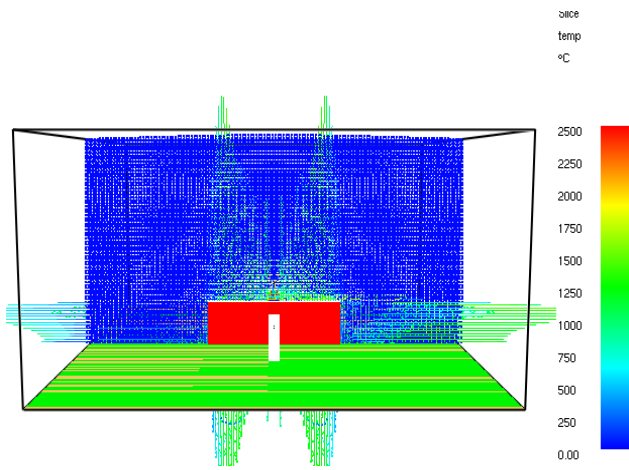
La position (m)	32	33	34	35	36
La vitesse radiale de méthode 1 (m/s)	8.31	9.21	9.52	10.28	10.25
La vitesse radiale de polynôme (m/s)	4.9962	7.1512	9.5358	11.652	12.8623

Table 5.9 : les valeurs de vitesse radiale par les deux méthodes

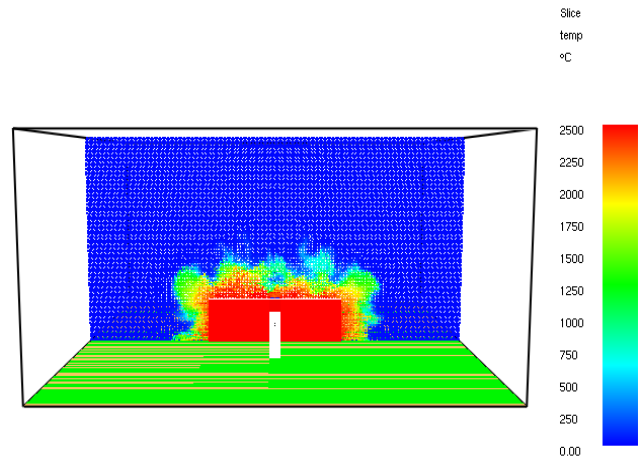
5.6. Comparaison entre BLEVE et le ballon de feu de crash :

5.6.1. Comparaison entre la simulation de BLEVE et du crash :

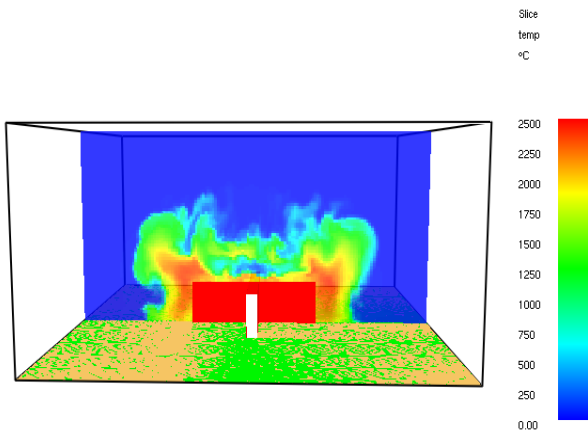
Au début on compare les deux par ces flux nets et profil de température qui ont affichés par la SMV, d'après les figures 5.8 et 5.9 la température max de crash est plus haute que celle de BLEVE et la propagation de flamme de BLEVE est plus régulier par rapport la propagation de flamme de crash. Les figures 5.10et 5.11 montrent que le BLEVE et le crash ont les mêmes flux nets.



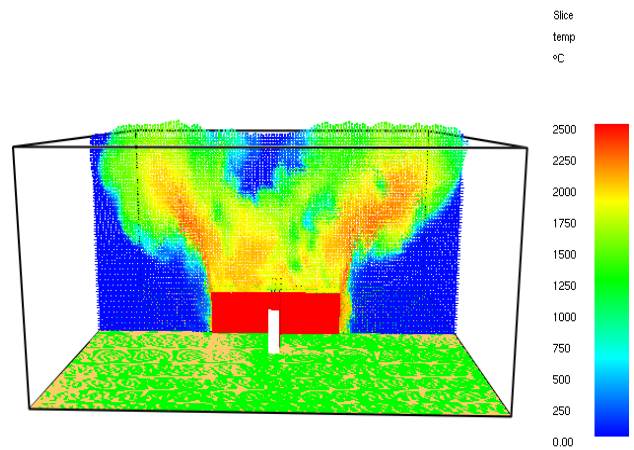
Pour $t= 0.2s$



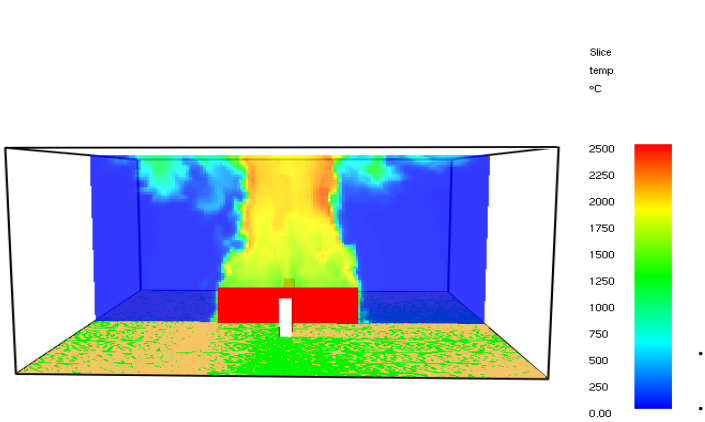
Pour $t= 1s$



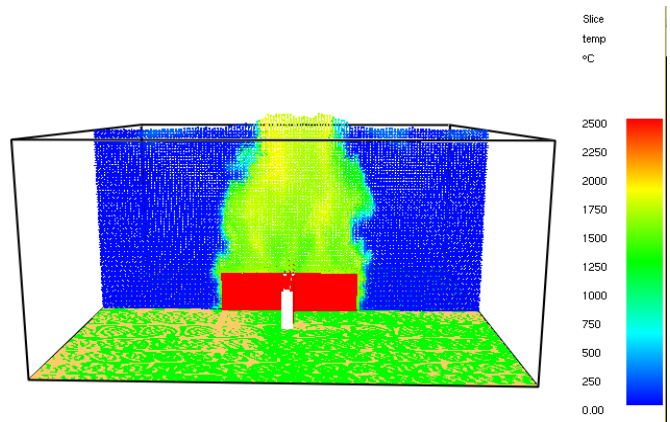
Pour $t= 2.5 s$



pour $t= 5 s$



Pour $t=7.5s.$



Pour $t=10s.$

Figure5.8 : profil de température de crash avec SMV.

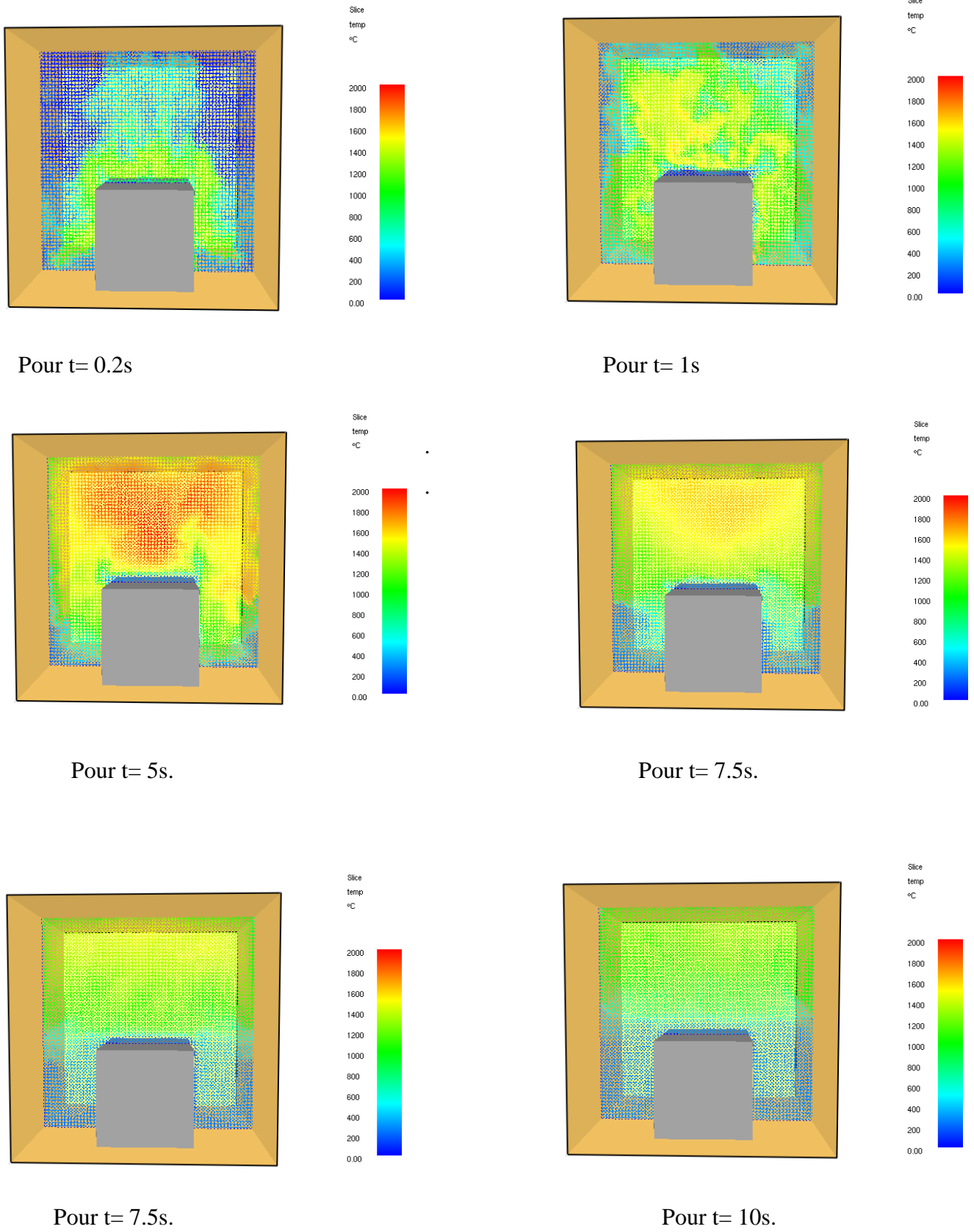


Figure5.9 : profil de température de BLEVE avec SMV.

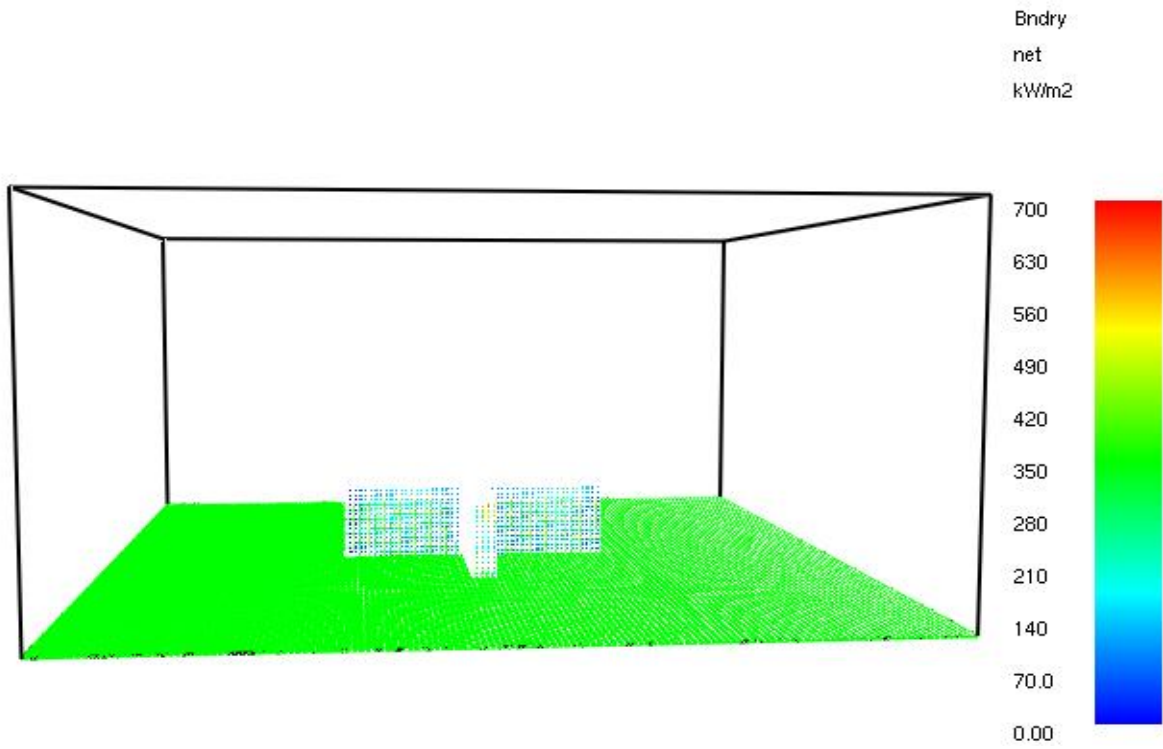


Figure 5.10 : le flux net de crash par SMV.

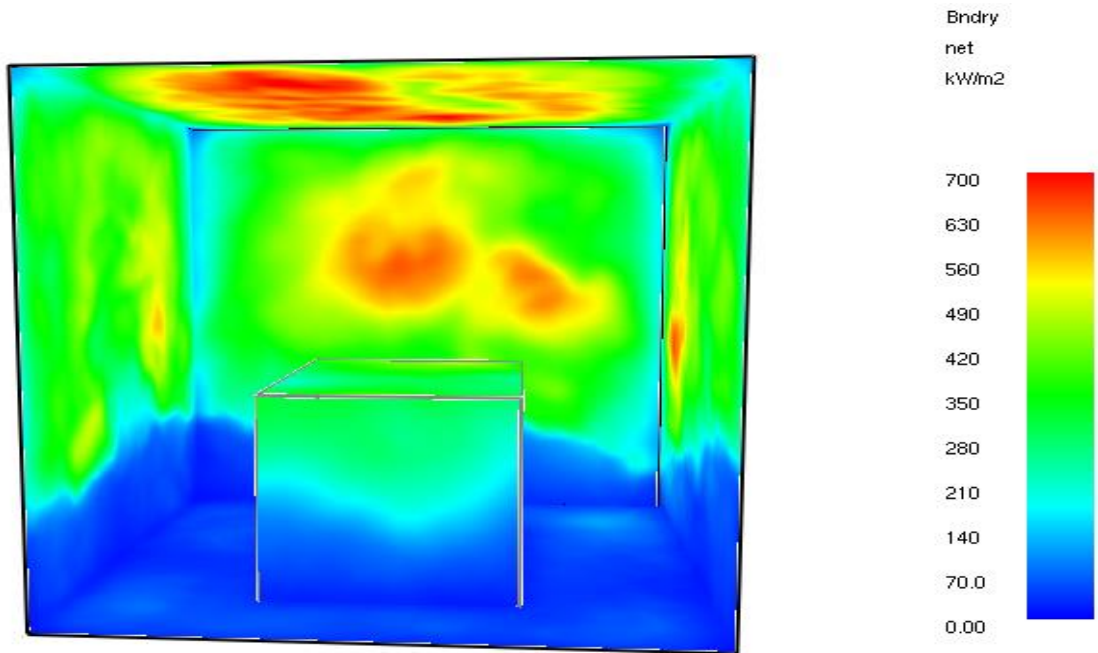


Figure 5.11 : le flux net de BLEVE avec SMV.

5.6.2. Analyse de Comparaison entre le diamètre de BLEVE et du ballon de crash :

Le diamètre de BLEVE est plus grand que diamètre de ballon de crash, les fonctions sont différents mais les deux se comportent de même manière l'augmentation par rapport le temps, le diamètre max de ballon de crash est 77 m à 5s.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de mémoire est une contribution dans la simulation des flammes turbulente de diffusion à faible nombre de Mach, en utilisant un outil de simulation numérique à source libre, c'est le code FDS-v6.5.3 qui utilise le concept de simulation à grandes échelles LES (Large Eddy Simulation), ce dernier avec le logiciel « SMOKEVIEW » nous a permis de simuler un cas d'incendie relatif un crash d'avion, où nous avons pris comme cas test l'accident aérien de l'Iliouchine Il-76 à Boufarik du 11 Avril 2018. Le défi majeur dans cette étude était la maîtrise du code FDS avec le logiciel « SMOKEVIEW » et le traitement des données réelles relate au crash à savoir la quantité et la nature de carburant en exploitation et ses propriétés physiques, les dimensions géométriques et les caractéristiques des matériaux constituant les éléments de l'avion et son entourage ; En outre, l'intégration de toutes les données qui rentrent dans la modélisation et la simulation du scénario de crash à savoir la géométrie du domaine, les réactions de combustion, les transferts thermiques (rayonnement, convection et conduction) et enfin la traduction de toutes ces données en instructions exécutables qui forme le programme FDS.

Parmi les conclusions tirées:

La simulation de l'incendie à l'aide du code « FDS » nous a permis de parachever la modélisation et la simulation de la combustion de diffusion relative au scénario du crash de l'avion Iliouchine par la simulation des vitesses de propagation des flammes verticales et radiales du mélanges (n-Décane/Air et/ou Kérosène/Air) ainsi, Le calcul instantané des températures de combustion. Les résultats de calcul du diamètre du ballon de feu « fire ball diameter » obtenues par le code FDS corroborent avec les résultats de l'expérience de BLEVE.

La vitesse de propagation de flamme et de fumée à l'aide des capteurs et des senseurs intégrés dans le simulateur « FDS/ SMOKEVIEW » peuvent être employés dans des cas similaires, où on peut prévenir les dangers pour prendre les précautions appropriées.

Cette étude démontre que le code FDS constitue un outil adéquat pour simuler les effets de la boule de feu provoquée par le crash d'un avion malgré le temps de copulation relativement important, donc on peut affirmer que ce dernier est un outil très utile pour évaluer les dangers potentiels et déterminer les mesures d'atténuations.

LES PERSPECTIVES

Différentes études peuvent être encore menées. L'un des avantages du logiciel est qu'il est possible de changer facilement de scénario et de pouvoir visualiser les mêmes résultats de sortie entre deux simulations.

Voici une liste non exhaustive des possibles études à réaliser dans l'avenir :

- Etude liée à la différence de produits : étude sur les phénomènes en comparant par exemple décane et benzène;
- Etude sur la quantité de suie produite : pour un même matériau, ne pas prendre en compte les indications de la littérature sur la production de suie et regarder l'influence de ce paramètre
- Etude sur la pyrolyse de matériaux solides.
- Augmentation du nombre de paramètres pris en compte : à partir de l'étude précédente, mesure de nouveaux paramètres tels que la concentration en oxygène, la hauteur de la couche de fumée.
- Influence de la géométrie : position de l'avion dans le domaine, hauteur, surface interne, dimension des ouvrants, ...
- Comparaison entre différents types d'avion
- On peut aussi changer les conditions initiales comme la température ambiante, la pression, la vitesse et la direction de vent.....
- On prend en considération la vitesse d'impacte.
- Le changement de la nature de domaine de calcul par exemple : l'avion crashé sur un quartier résidentiel, ou bien proche d'une pompe à essence.....
- La quantité de carburant qui a aussi un grand effet.
- L'étude qui prend en considération les différents types de transfert de chaleur.
- La durée totale de l'incendie, c'est-à-dire jusqu'à que le carburant finisse et sans l'intervention des pompiers.
- L'étude sur les composantes de la fumée.
- La comparaison entre deux simulations de deux crashes de même type d'avion dans différentes conditions.

LES REFERENCES:

[1]: **Introduction FDS/SMV**, Application: Simulation de la flammé de prémélange dans un tunnel, Présenté par: R. RANANE, Proposé et dirigé par: O. Séro-guillaume.

[2]: FDS and Smokeview introduction.en.fr.

[3]: **McGrattan, Kevin Simo Hostikka, Randall McDermott, Jason Floyd, Craig Weinschenk, Kristopher Overholt. January 18, 2017**, Fire Dynamics Simulator, User's Guide, Sixth Edition. NIST Special Publication 1019.

[4]: **Forney, Glenn January 18, 2017**. Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume II: User's Guide, Sixth Edition. Gaithersburg, Maryland, USA. NIST Special Publication 1017-2.

[5]: **Forney, Glenn January 18, 2017**. Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: Technical Reference Guide, Sixth Edition. Gaithersburg, Maryland, USA. NIST Special Publication 1017-1.

[6]: **Manhattan, 2019**, PyroSim User Manual, Suite B, KS 66502 USA.

[7]: **These de doctorat**, Caractérisation et modélisation par la méthode (LES) d'une chambre de combustion tubulaire sous l'influence des charges dynamiques et de combustion, mars 2013.

[8]: dictionnaire des notions -Jean-paul DELAHAYE.

[9]: statique et dynamique des fluides -Stephane CHAUSSIDENT.