



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Energétique

Thème :
Simulation numérique des effets thermiques lors
D'un incendie en feu de bac cas du dépôt de carburants de
« NAFTAL_CHIFFA »

Proposé et encadré par :
A. Benarous (USD Blida 1)

A. Meliani (CDS Naftal_Chiffa)

Réalisé par :
SEFRANI NESRINE

AGUIB ROUMAISSA

Remerciement :

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

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

MR. Meliani Notre encadrant de mémoire de fin d'étude, et notre promoteur MR Benarous pour ses précieux conseils et son orientation 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, leur collaboration ou leurs relectures, ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DEDICACES

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais 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*

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 mes frères Mohamed, Sid Ali et Abd Elghani

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

A mon cher binôme Nesrine,

Pour son 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

AGUIB ROUMAÏSSA.

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 dîne.

A mes chères sœurs Chaïma, bassma, et roua

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

Études.

A mon cher binôme Roumaïssa,

Pour son 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 et ceux qui m'aiment.

MERCI

SEFRANI NESRINE

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

INTRODUCTION GENERALE01

CHAPITRE 01 : Généralités sur les incendie des DLI

Introduction02

1.1. Définitions principales.....03

1.2. Effets thermiques09

1.3. Les carburants10

1.3.1. Essence.....10

1.3.2. Gazole10

1.4. Les caractéristiques des carburants11

1.4.1. Les caractéristiques physiques11

1.4.2. Les caractéristiques chimiques12

1.4.3. Les caractéristiques physiques de l'essence12

1.4.4. Les caractéristiques chimiques de l'essence12

1.4.5. Les caractéristiques physiques du gasoil13

1.4.6. Les caractéristiques chimiques du gasoil12

1.5. Analyse statistique du retour d'expérience13

1.5.1. Stockage des hydrocarbures liquides dans des réservoirs à toit fixe.....	13
a- Typologie des accidents	13
b- Causes des accidents	14
c- Conséquences des accidents	15
1.5.2. Stockage des hydrocarbures liquides dans des réservoirs à toit fixe et à Ecran	
Flottant.....	15
a- Typologie des accidents	15
b- Cause des accidents	16
c- Conséquence des accidents	16
d- Circonstances des accidents (pour les différents types Réservoir.....	17
1.6. Les techniques de prévention	18
1.6.1. Prévention passive	18
1.6.2. Prévention active	28
Conclusion	19

CHAPITRE2 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques.

Introduction	20
2.1. Modèles pour le pouvoir émissif « radiatif »de la flamme	21
2.1.1. TNO/ Yellow Book (1992).....	21
2.1.2. Mudan et Croce	22
2.1.3. Modèle d'IT-89	22
2.2. Modèle pour le facteur d'atténuation atmosphérique	23
2.2.1. Définition	23
2.2.2. Présentation des corrélations	23

2.2.3. La corrélation de Brzustowski et Sommer	23
2.2.4. La corrélation de Bagster	23
2.2.5. La corrélation de Lannoy	23
2.2.6. Corrélation de Wayne	23
2.3. Modèle pour le facteur de vue	24
2.3.1. Facteur de vue cylindrique.....	25
• Facture de vue d'un cylindre vertical	25
• Facture de vue pour une flamme inclinée	26
2.3.2. Facture de vue plan.....	28
• Facture de vue plan vertical.....	28
• Facture de vue plan incliné	29
2.4. Modèle d'IT-89 pour les distances critiques	29
Conclusion	31

CHAPITRE 03 : Présentation du code de calcul FDS.

Introduction	32
3.1. Le Fire Dynamic Simulatur (FDS).....	32
3.1.1. Définition de code FDS	32
3.1.2. Historique de versions.....	32
3.1.3. Utilisation prévues	33
3.1.4. Caractéristiques principales du code FDS.....	33
3.1.5. Structure du Solveur FDS.....	34
3.2. Les équations de base	35
• Équation de continuité (conservation de la masse).....	35
• Équations de la quantité de mouvement	36
• Équation de conservation de l'énergie	37
• Équation d'état	38

3.3. Modèles existants dans FDS.....	39
3.3.1. Modèle hydrodynamique.....	39
3.3.2. Modèle de combustion.....	39
3.3.3. Modèle de rayonnement.....	42
3.4. Résolution numérique.....	42
3.5. Utilisation de la méthode LES.....	44
3.5.1. Compréhension de la turbulence.....	44
3.5.2. Utilisation de la méthode LES dans FDS.....	45
3.6. Modélisation des conditions aux limites	47
3.6.1. Transfert de chaleur convectif.....	47
3.6.2. Transfert thermique dans les parois.....	48
• Paroi thermique épaisse.....	48
• Paroi thermiquement mince	48
Conclusion	49

CHAPITRE 04 : Etude de cas, résultats et discussions.

Introduction	50
4.1. Présentation du dépôt de carburant NAFTAL	50
4.1.2. Historique	51
4.1.3. Installation composant l'unité	53
4.1.4. Zonage de contre de CHIFFA	54
4.1.5. La Réception du produit	55
4.1.6. Stockage des produits	56
4.1.7. Transfert des produits	56

4.1.8. Les Moyens de lutte contre l'incendie	59
4.2. Présentation de l'étude numérique	60
4.2.1. Géométrie du local.....	60
4.2.2. Structures de domaine de calcul	61
4.3. Les puissances thermiques imposées	64
4.3.1. Feu en bac de Gasoil	64
4.3.2. Feu en bac d'essence super	64
4.4. Les Maillages	64
4.4.1. Maillage pour les fronts de flammes	64
4.4.2. Les calculs des grilles de maillage	66
4.4.3. Les maillage utilisé	67
a- Maillage fin	67
b- Maillage moyen	67
c- Maillage grossier	68
4.5. Les condition opératoires.....	68
4.6. Modélisation géométrique sur FDS.....	69
4.7. Hypothèses de calcul	69
4.8. Résultats et interprétation	70
4.9. Distribution du flux thermique avec la distance d'effet	75
4.10. Les distances sécurité par les formules d'IT-89	76
Conclusion	77
CONCLUSION GENERALE	80

Listes des figures :

Figure 1.1. Triangle du feu	04
Figure 1.2. Zones de la flamme	05
Figure 1.3. Graphe de domaine d'inflammation.....	06
Figure 1.4. Prévention contre l'incendie	07
Figure 1.5. Explosion d'un dépôt de carburant	08
Figure 1.6. Typologie des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe	12
Figure 1.7. Cause des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe	13
Figure 1.8. Conséquences des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe	14
Figure 1.9. Typologie des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran Flottant.....	15
Figure 1.10. Causes des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran flottant...15	
Figure 1.11. Conséquences des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran Flottant.....	16
Figure 1.12. Circonstances des accidents étudiés	16
Figure 2.1. Fraction radiative en fonction du diamètre de nappe	22
Figure 2.2. Schéma général entre une flamme et une cible	24
Figure 2.3. Cylindre verticale (surface perpendiculaire au sol).....	26
Figure 2.4. Inclinaison de la flamme sous l'effet du vent	27
Figure 2.5. Surface orienté perpendiculaire ou plan (cible vertical).....	28
Figure 2.6. Surface orienté perpendiculaire au plan (cible horizontale).....	29
Figure 2.7. Notion relative à la boule de feu	30
Figure 3.1. Les données principale de code FDS	34

Figure 3.2. Maillage à grille décalée.....	43
Figure 3.3. Spectre d'énergie d'un écoulement turbulent.....	45
Figure 3.4. Echanges de chaleur avec la paroi	48
Figure 4.1. Plon de situation géographique	50
Figure 4.2. Vue satellite de centre	51
Figure 4.3. Plan de masse.....	52
Figure 4.4. Photo de bac R120 de stockage d'Essence Supere dans centre NAFTAL-CHIFFA	53
Figure 4.5. Photo de poste chargement carburant NAFTAL-CHIFFA	54
Figure 4.6. Schéma de fonctionnement du centre.....	58
Figure 4.7. Photo d'exercice de simulation NAFTAL-CHIFFA	59
Figure 4.8. Schématisation 3D du domaine d'étude par (Smokeview)	60
Figure 4.9. Diagramme schématique montrant les distances réelles (après mesures)	62
Figure 4.10. Maillage de domaine de calcul avec FDS présenté par (Smokeview)	68
Figure 4.11. Feu de bac R100 avec FDS présenté par (Smokeview)	70
Figure 4.12 (a, b). Evaluation du flux radiatif incident (bassin d'eau).....	71
Figure 4.13. Histogramme clarifier le flux radiative entre CFD et le modèle analytique (Bassin d'eau).....	72
Figure 4.14 (a, b). Evaluation du flux radiatif incident (bac R120).....	73
Figure 4.15. Histogramme clarifier le flux radiative entre le CFD et modèle analytique(bac R120).....	74
Figure 4.16. Flux thermique en fonction de distance de cible	75

Liste des tableaux :

Tableau 4.1. Compositions du parc de stockage	57
Tableau 4.2. Dimension structures	61
Tableau 4.3. Dénomination et dimension du bac de stockages	63
Tableau 4.4. Calculs grille de maillage cas incident dans un bac de Gasoil	66
Tableau 4.5. Calculs grille de maillage cas incendie	67
Tableau 4.6. Résultats sur FDS	75

LISTE DES ABREVIATIONS :

ARIA : Analyse Recherche et Information sur les Accidents.

AGA : American Gas Association.

API : acronyme de l'anglais Application Programming Interface que l'on traduit en français Par interface de programmation applicative.

ASTM : (acronyme de l'anglais American Society for Testing and Materials) est un Organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les Matériaux, les produits, les systèmes et les services.

BLEVE : (acronyme de l'anglais Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) est une Vaporisation violente a caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir.

BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels.

CST : Centistokes.

CDS : Centre de Distribution et de Stockage.

CA : Carburant Auto

CFD : Computational Fluide Dynamics (mécanique des fluides numérique)

ESS : Essence.

FDS : Fiche de Données de Sécurité.

FVUE : Facteur de Vue.

Fizéro : Pouvoir émissif en $r=0$.

FDS : Faire Dynamics Simulator

GO : Gasoil.

GTDLI : Groupe de Travail Dépôt de Liquides Inflammables.

HSE : hygiène et sécurité de l'environnement.

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

IT-89 : Instrument Titanium Calculators.

JP-5 : (acronyme de l'anglais Jet Propellant) est un carburants pour avion .

L_{flamme} : Longueur de flamme.

LES : Large Eddy Simulation

MTBE : Léthyl Tert-Butyl Ether (composé organique de formule $CH_3(CH_3)_3$).

NAFTAL : Entreprise Nationale de commercialisation et de distribution des produits Pétroliers.

P_I : Point Initial.

P_F : Point Final.

P_V : Procès-Verbal.

SONATRACH : acronyme de Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures.

S.C.A : Super Carburant Auto.

TNO : The Netherlands Organizations of Applied Scientific Resarch.

TVR : La Tension de Vapeur Reid

Nomenclature :

A_{fire} : Surface du bac	[m ²]
B : Longueur ou largeur de la surface en feu	[m]
Cp_0 : Capacité calorifique du gaz de référence (air)	[J/ kg.K]
Deq : Diamètre équivalent de la surface en feu	[m]
D : Distance de la cible à la source	[m]
d : Distance de la cible à la source	[m]
F : Facteur de vue sans dimension	
F_h : Facteur de vue horizontal (-) Sans dimension	
F_v : Facteur de vue vertical (-) Sans dimension	
FR : Fraction radiative sans dimension	
F_r : Nombre de Froude Sans dimension	
g : L'accélération de la pesanteur (9,81 m/s ²)	[m/s ²]
H : Hauteur de flamme	[m]
K : Longueur du côté d'une cuvette carrée de même ne surface que la surface examinée	[m]
L : Longueur ou hauteur de flamme	[m]
$M \gg$: Débit massique de combustion par unité de surface en feu	[kg/ m ² /s]
m' : Débit de combustion ($m' = m'' \times$ Surface de combustible au sol)	[kg/s]
$P_{VAP_{H_2O}}$: Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air	[Pa]
Q : Puissance dégagée par la combustion	[kw]

R : Distance entre la cible et le front de flamme (formule de it-89)	[m]
r_s : Rapport stœchiométrique air/combustible.	
RH : Taux d'humidité relative de l'air	[%]
S : Surface en feu	[m ²]
S : Coefficient expérimental égal à 0,12	[m ⁻¹]
T : La température	[C°]
T_f : Température de flamme	[C°]
T_0 : Température de l'air	[C°]
T_a : Température ambiante	[C°]
u_w : La vitesse du vent	[m/s]
u^* : Vitesse adimensionnelle du vent	[m/s]
u_c : Vitesse caractéristique	[m/s]
u_{10} : Vitesse adimensionnelle du vent à 10 m d'altitude. [m/s]	
ν : Viscosité cinématique de l'air	[m ² . s]
v : Vitesse de régression de la nappe	[m/s]
w Ou RA : Humidité absolue de l'atmosphère ambiante (g/kg d'air sec) [g vapeur d'eau/kg air sec]	
\emptyset : Flux thermique [kW/m ²]	
\emptyset_{max} : Pouvoir émissif d'une flamme sans fumées noires	[kW/m ²]
\emptyset_{soot} : Pouvoir émissif des fumées (20 000 W/m ² pour T= 800K)	[kW/m ²]
$\emptyset_{fumées}$: Pouvoir émissif des fumées (20 kW/m ²)	[kW/m ²]
ζ : Pourcentage du flux absorbé par les fumées noires	[%]
Γ : facteur de transmissivité atmosphérique	

ρ : Masse volumique du combustible [Kg/m³]

ρ_{air} : La masse volumique de l'air ambiant [Kg/m³]

ρ_g : Masse volumique des vapeurs de combustibles à la température d'ébullition (pression Atmosphérique) [Kg/m³]

Résumé :

Ce travail est une étude numérique de la simulation des effets thermique lors d'un incendie de bac de combustion dans un dépôt de liquides inflammable (DLI),cas de NAFTAL_CHIFFA.Nous utilisons un outil de simulation à grandes échelles,le code FDS qui permet de représenter les incendies et leur extinction,en termes de température et de flux thermiques par une résolution des équations de Navier_Stokes de l'énergie et des équations de la turbulence.

Le projet vise à prédire les flux radiatifs incidents sur des parois sensibles (bac,batiments,bassin,...) et à confronter les distances de sécurité obtenues numériquement par rapport aux corrélations existantes dans le domaine de la sécurité industrielle.

Mots clés : FDS(fire Daynamic Somulitor) ,DLI(Dèpot de Liquides Inflammable), CFD (Computational Fluide Dynamics), distance critique, flux radiatifs.

Abstract:

This work is a numerical study of the simulation of the thermal effects during a fuel tank fire in a depot of flammable liquid (DLI),case of NAFTAL_CHIFFA.we use a simulation tool at large scales,the code FDS which allows to represent the fires and their extinction,in terms of temperature and heat flux by solving the equations of, energy and turbulence equations.

The project aims to predict the radiative fluxes incident on sensitive walls (tank,buildings,basin...)and to compare the security issues obtained numerically in relation to existing correlations in the field of industrial security.

Key words: FDS(fire Daynamic Somulitor) , DLI (deposit of flammable liquid),CFD (Computational Fluide Dynamics).critical distance,radiative flux.

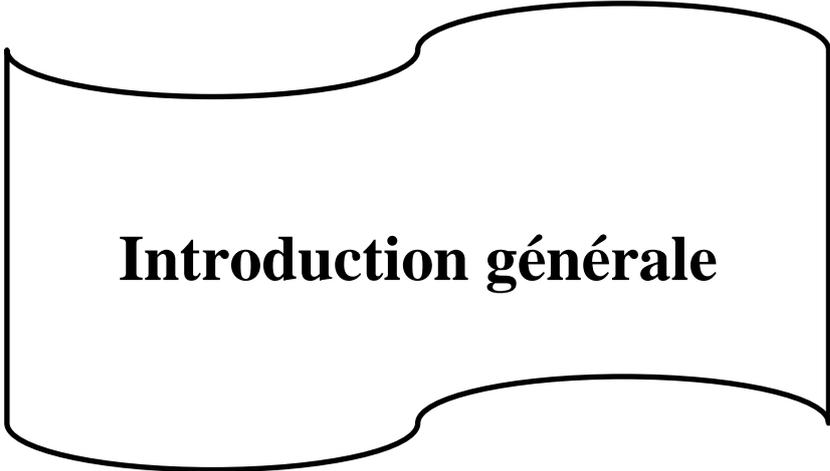
ملخص :

هذا العمل عبارة عن دراسة رقمية لمحاكاة التاثيرات الحرارية اثناء حريق خزان الوقود في مستودعات الوقود السائل القابل للاشتعال حالة NAFTAL-CHIFFA.نستخدم اداة محاكاة واسعة النطاق, كود FDS الذي يسمح بدراسة الحرائق و عواقبها من حيث درجة الحرارة والتدفقات الاشعاعية المحسوبة من المعادلات الاساسية لمكانيك الموائع Navier-Stokes للطاقة ومعادلة الاضطراب.

يهدف المشروع الى التنبؤ بتدفقات الحادث في الجدران الحساسة(خزان المبنى,الحوض,.....) ومقارنة مسافات الامان التي تم الحصول عليها بشكل عدديا مقارنة بالا رتباطات الحالية في مجال السلامة الصناعية .

الكلمات المفتاحية :

(محاكاة ديناميكية النار)FDS . (مستودع السوائل القابل للاشتعال) DLI .مسافة حرجة .التدفق الاشعاعي .حسابية ديناميكية الموائع CFD .



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les Hydrocarbures restent la source d'énergie la plus utilisée pour le bon fonctionnement de l'économie mondiale et ils continueront à jouer ce rôle stratégique aussi longtemps que l'homme n'aura pas trouvé d'autre source d'énergie, qui pourront remplir leur rôle avec plus de rentabilité et d'efficacité.

En Algérie, NAFTAL est une entreprise de groupe SONATRACH. Elle a pour mission principale, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers.

Pour assurer la préservation de ce patrimoine tant humain que matériel, SONATRACH a opté pour un système de management intégré (HSE) qui vise à la fois la promotion de la santé des travailleurs, la sécurité des installations et le respect de l'environnement.

L'incendie sur les lieux de travail est un sujet très préoccupant et d'actualité permanente. Chaque année, des victimes sont à déplorer lors d'incendies d'établissement.

Pour notre étude, le centre de stockage et de distribution concerné est situé au niveau de la wilaya de Blida – Chiffa, les principaux produits commercialisés sont : les Essences et le Gasoil. Dans ce centre, on a effectué un stage pratique en Avril 2021, prévu pour une période de trois mois.

Les incendies en feu de bacs dans les dépôts de liquides inflammables (DLI), restent parmi les scénarios les plus critiques, provoquant des effets thermiques lointains pouvant aléier les actions d'intervention des équipes de secours, et causer de possibles réinflammations sur les bacs avoisnant le foyer d'incendie.

Il est donc important de pouvoir prédire les flux rayonnants à des distances variables autour du foyer, tout en estimant la durée d'exposition à ces flux, selon les limites des doses thermiques relatives aux personnes et aux structures annexes.

L'objectif principal de notre étude est la distribution spatio-temporelle des flux thermiques autour d'un bac de dépôt de carburant liquides, en s'appuyant sur des simulations numériques réalisées à l'aide d'un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamic) et comparées avec un modèle analytique.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres ;

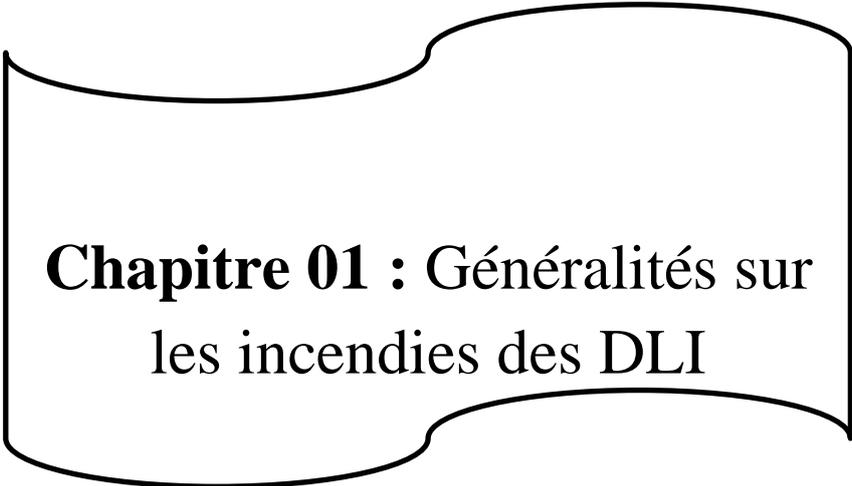
Introduction générale

Après une introduction, une généralités sur les incendie des dépôts de liquide inflammables dans le premier chapitre et d'identifier les effet thermique du feu sur l'homme et structures .

Dans le deuxième chapitre on présente de la formulation mathématique du problème .Le

chapitre trois est consacré à la présentation du code de calcul FDS (Fire Dynamic Simulator),Et la résolution numérique .

Le dernier chapitre présente le centre carburent NAFTAL-CHIFFA. Et l'étude numérique par le code FDS , avec des interprétation et de comparition avec des résultats de modèle CFD avec le modèle analithique .



**Chapitre 01 : Généralités sur
les incendies des DLI**

Introduction

Dans ce chapitre on va décrire les phénomènes d'incendie , et en parlant des effets thermique sur l'homme et structure , en passant aux caractéristiques des carburants.

En va voir aussi :

- les statistiques des accident.
- les technique active et passive de prévention.

1.1.Définition principales

La combustion :

C'est une réaction chimique exothermique entre deux corps don't l'un est appelé combustible et L'autre comburant. Cette réaction ne peut avoir lieu qu'en présence d'une quantité suffisante et Nécessaire de chaleur et sous l'effet d'une énergie d'activation ; à une température donnée et Produisant des produits de combustion.

Le feu :

C'est la manifestation visible de la combustion sous le contrôle de l'homme.

Le triangle du feu :

Pour que la combustion se produise il faut rassembler les trois éléments de base.

Le combustible :

C'est un corps susceptible de brûler et qui se présente sous trois états (solide, liquide,Gazeux).

Solide : bois, papier, PVC, autres composés organiques et chimiques

Liquide : essence, pétrole, alcool, acétone...

Gazeux : propane, méthane, GPL etc...

Le comburant :

C'est un composé chimique, quand il est mit en présence d'un combustible il permet et Entretien la combustion. Le comburant le plus rencontré est l'oxygène contenu dans l'air ; nousPouvons également retrouver le chlore.

L'énergie d'activation :

Énergie permettant l'élévation de température afin d'atteindre le point d'inflammation. Elle peut être d'origine mécanique, électrique, calorifique ou chimique.

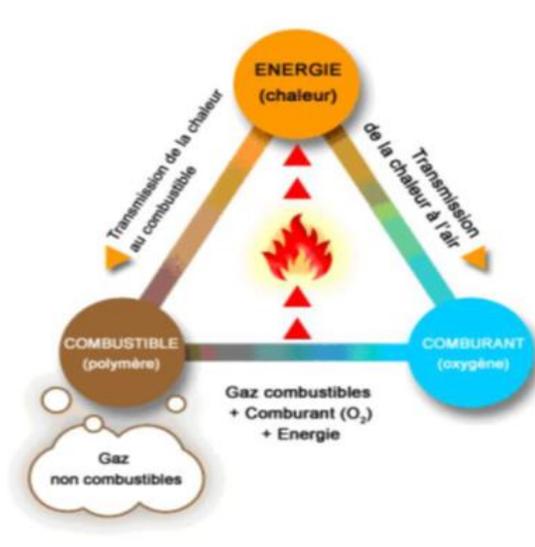


Figure 1.1. le triangle de feu [1].

L'incendie :

C'est une combustion qui se développe de manière incontrôlée dans l'espace et le temps.

Feu de nappe :

Le feu de nappe résulte de la combustion d'un liquide inflammable.

Dans le cas d'un stockage, la surface en feu peut être :

- La surface d'un réservoir,
- La surface d'une cuvette de rétention,
- La surface au sol en unité, autour d'un séparateur, d'une pompe, d'un

Manifold...

Flamme:

C'est défini comme la zone où a lieu la combustion en phase gazeuse. La flamme peut ainsi être assimilée à une surface séparant gaz frais et produits de combustion

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

gazeux($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \dots$) et suies résultant d'une combustion incomplète. Elle correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion.

De manière simple, une flamme est composée essentiellement de trois parties :

- Une zone persistante située à la base de la flamme, au-dessus de la surface de combustible. Celle-ci a une forme et une température constantes. La flamme est lumineuse et possède des températures élevées de l'ordre de 1300 K qui lui donnent un fort pouvoir émissif. La partie centrale de cette zone est riche en vapeur de combustible.
- Une zone intermittente qui présente un caractère fluctuant. Les réactions chimiques et les températures y sont moins importantes.
- Une zone de panache qui est turbulente et non réactive. Les vitesses et la température y décroissent avec la hauteur. Cette zone est principalement constituée des fumées et la flamme n'est plus visible car la température n'est plus suffisante pour que les particules de suies rayonnent dans le spectre visible.

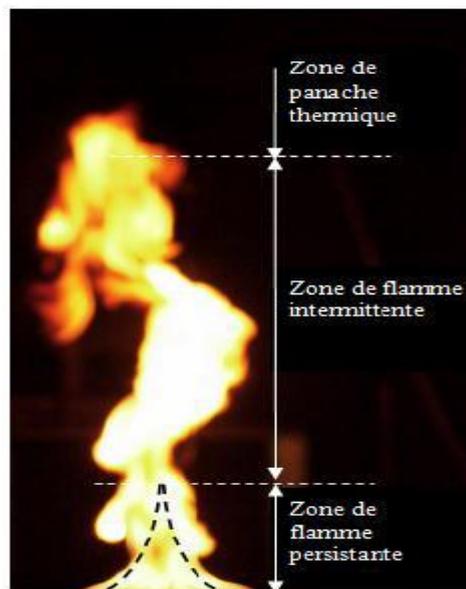


Figure 1.2 : Zone de la flamme [2]

Inflammation :

D'un mélange gazeux composé des vapeurs de combustible et de l'air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air (domaine d'inflammation).

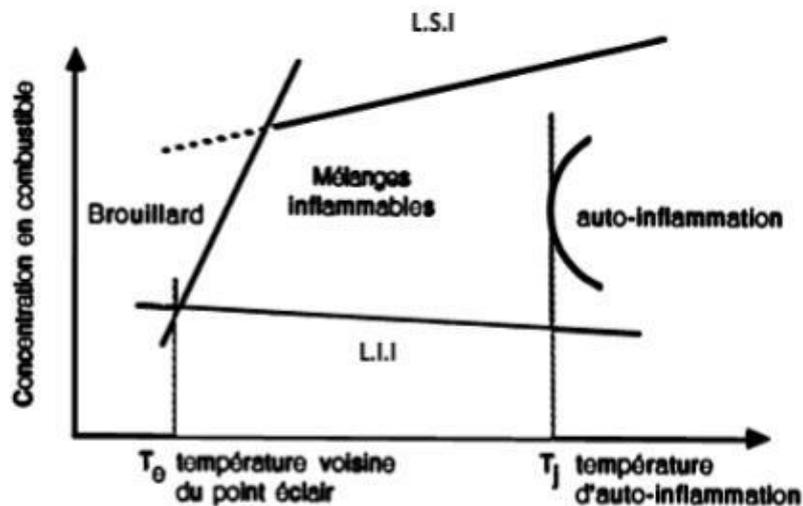


Figure 1.3. Graphe de domaine d'inflammation [2].

Les différents points d'inflammabilité :

La température (agitation moléculaire) est la quantité de chaleur sous toutes ces formes Nécessaires pour élever un combustible à une température (point éclair, d'inflammation ou D'auto inflammation); lui permettant de continuer de brûler.

Point éclair : C'est la température minimale à laquelle un liquide ou solide combustible émet Suffisamment de vapeur pour former avec l'air ambiant, une atmosphère inflammable. La Combustion se produira à l'approche d'une flamme pilote et s'arrêtera au retrait de celle-ci.

Point d'inflammation : C'est la température minimale à laquelle un mélange combustible de Gaz et d'air s'enflamme en présence d'une flamme avec persistance de la flamme.

Point d'auto inflammation : C'est la température à laquelle un mélange gazeux combustible Peut s'enflammer spontanément sans présence de flamme où étincelle.

Les dépôts de carburants liquides :

- Dans l'industrie pétrolière, les dépôts de carburants sont des entrepôts de stockage de bruts ou des hydrocarbures liquides : essences, kérosène, gazole et fioul. Dépendant de l'importance du trafic régional ou local, ces dépôts sont de tailles différentes et tous les dépôts ne stockent pas forcément tous les produits.

On peut dire que les activités des dépôts sont : La Réception des produits par (canalisation ; wagon citerne ; navire / barge).

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

- Le stockage des produits reçus.
- Le chargement des produits pétroliers dans des camions citernes.

Identification des dangers :

Incendie : est un feu non maîtrisé, ni dans le temps, ni dans l'espace. La caractéristique d'un incendie est de pouvoir s'étendre rapidement et occasionner des dégâts généralement importants.



Figure 1.4 . Prévention contre l'incendie .

• **Boil over** : Le terme de boil over est attribué à un événement survenant lors d'un incendie de certains hydrocarbures contenus dans un réservoir à ciel ouvert, lorsqu'une soudaine augmentation de l'intensité du feu [de réservoir] est observée, accompagnée de l'expulsion de l'hydrocarbure hors du réservoir, après une longue période de combustion régulière [de l'hydrocarbure]. Le boil over a lieu lorsque les résidus de combustion, issus de la surface en feu, deviennent plus denses que les hydrocarbures non brûlés et sombrent formant une couche chaude qui progresse vers le fond plus rapidement que la régression de la surface de liquide. Lorsque cette couche chaude, également

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

appelée onde de chaleur, atteint l'eau ou une émulsion d'eau dans l'hydrocarbure située en fond de bac, l'eau est d'abord surchauffée, puis portée à ébullition de façon quasi explosive entraînant le débordement du bac.

• **Explosion** : est une augmentation rapide de volume et une libération d'énergie, généralement avec génération de hautes températures et de gaz.



Figure 1.5. Explosion d'un dépôt de carburant .

1.2. Effets thermiques

D'une manière tout à fait générale, afin d'estimer les effets d'un phénomène Physique dangereux sur l'homme ou l'environnement, il est nécessaire d'évaluer à La fois :l'intensité des conséquences du phénomène. Cette intensité peut par Exemple s'exprimer en terme de concentration (ppm) pour ce qui concerne La dispersion de gaz toxiques ou de densité de flux thermiques pour des Phénomènes de combustion (incendie, BLEVE...), la durée d'exposition, soit le temps pendant lequel la cible est exposé aux Conséquences du phénomène dangereux, ces deux paramètres définissent ainsi la notion de dose, qui relie le fonction de l'intensité des conséquences du Phénomène et de la durée d'exposition.A priori, dans le cas d'un feu industriel, la cible peut être exposée à des flux Thermiques radiatifs pendant toute la durée de l'incendie. C'est pourquoi, pour L'évaluation des effets d'un phénomène aussi long dans le temps, la durée D'exposition n'est pas prise en compte et il faut s'appuyer alors sur les seuils D'effet définis dans la réglementation dans l'arrêté du 29 septembre 2005 qui sont:

Pour les effets sur l'homme :

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

- 3 kW/m², seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs Pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m², seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie Humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement ;
- 8 kW/m², seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très

Graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement.
Pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives ;
- 8 kW/m², seuil des effets domino1 et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures ;
- 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton ;
- 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
- 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Un feu industriel peut donner lieu à des effets sur les structures dans la mesure où sa durée peut être plus ou moins prolongée (de quelques minutes à plusieurs heures en général). [3]

1.3. Les carburants

1.3.1. Essences :

L'essence auto est une huile légère d'hydrocarbure utilisée comme carburant dans les moteurs à allumage commandé. Sa température de distillation se situe entre 35 et 200 °C, cette huile est traitée de manière à atteindre un indice d'octane élevé, généralement entre 80 et 100 IOR.

Ce traitement peut s'effectuer par reformage, craquage catalytique et mélange avec une fraction aromatique. Il existe donc trois types d'essences sont :

Essence Normale :C'est un carburant avec plomb utilisé pour anciens véhicules et qui possède une quantité inférieur à Celle du super, comme il est trop polluant.

Essence super :On L'utilise pour l'alimentation des moteurs automobiles , il est caractérisé par un indice d'octane très élevé par rapport à l'essence Normale .

Essence sans plomb : C'est un combustible issu du raffinage du pétrole et exempter du plomb sur l'environnement et sur la santé publique .

1.3.2. Gasoil :

Le gasoil et le diesel ne sont que deux noms différents pour un seul et unique produits. C'est un carburant issu du raffinage de pétrole .Il est destiné à l'alimentation des moteurs diesel routiers et non routiers.

1.4. Les caractéristiques des carburants

1.4.1. Les caractéristiques physiques :

La densité à 15 °C :

c'est le poids d'une volume de produits à température donnée (15 °C pour les hydrocarbures) comparé au poids d'un même volume d'eau à 4°C .

La distillation ASTM :

Cette méthode s'applique qu'aux produits blancs distillés à pression atmosphérique dont les températures d'ébullition s'étendent de 0 à 400 °C, elle caractérise la volatilité du produit. Et à partir des températures obtenues en fonction des volumes recueillis dans un appareillage approprié à la norme ASTM D 86, qu'on peut tracer la courbe de distillation qui représente l'évolution de la fraction distillée. Le plus souvent, on définit sur cette courbe quelques repères : PI, PF et les fractions distillées en pourcentage (volume) à une température donnée.

La pression de vapeur Reid :

La pression de vapeur Reid (TVR) indique d'une manière indirecte, la teneur en constituants très légers qui conditionnent la sécurité au cours du transport, les pertes au stockage et la volatilité des essences. Elle correspond à la pression relative développée par les vapeurs issues d'un échantillon de carburant disposé dans une bombe normalisée à la température de 37,8°C.

La viscosité cinématique à 20°C :

La viscosité cinématique caractérise la résistance qu'apportent les molécules à une force tendant à les déplacer les unes par rapport aux autres. Elle est défini comme le rapport de la viscosité absolue à la densité mesurée à la même température. Et son unité est exprimée en centistokes.

Le point d'écoulement :

Le point d'écoulement est la température la plus basse à laquelle, dans des conditions normalisées, le carburant continue à s'écouler. Il est utilisé comme indicateur pour déterminer

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

s'il est possible de pomper le carburant dans le moteur, même s'il ne peut être utilisé sans le réchauffer ou sans prendre d'autres mesures.

1.4.2. Les caractéristiques chimiques :

L'indice de cétane calculé :

L'indice de cétane mesure l'aptitude des carburants Diesel à s'auto-enflammer dans une chambre de combustion de moteur à allumage par compression, il caractérise le délai d'autoinflammation du gazole.

Le point éclair en vase clos :

C'est température à partir de laquelle les vapeurs sont émises en quantité suffisante pour former avec l'air un mélange détonnant mais insuffisante pour que la combustion puisse continuer d'elle-même.

La teneur en eau :

L'apparition de l'eau dans les gasoils provient par des phénomènes de condensation lors des différentes phases de stockage en présence d'air et réservoir en métal léger, et ces derniers favorisent la formation d'émulsions dans le carburant. Elle est souvent exprimée en % volume.

La corrosion à la lame de cuivre :

La corrosion à la lame de cuivre est utilisée comme une épreuve pour déterminer l'apparition des composés soufrés en utilisant le cuivre étant particulièrement sensible à la présence de ces composés corrosifs.

1.4.3. Les caractéristiques physiques de l'essence :

- La densité à 15°C : de 0.700 à 0.765 à 15/4°C
- La tension de vapeur Reid : 0.650 b
- La distillation : à 10% (70°C)
à 50% (140°C)
à 95% (195°C)

1.4.4. Les caractéristiques chimiques de l'essence :

- La corrosion à la lame de cuivre : 1b
- Teneur en plomb : 0.40 g/l
- PCI m : 42.7 (MJ/kg)
- PCI v : 32.2 (MJ/L)

-pointe d'éclair : 0° C .

1.4.5. Les caractéristiques physiques du gasoil :

- La densité à 15°C : de 0.800 à 840 .

- La distillation : à 65% (250°C)

à 90% (350°c)

- la viscosité cinématique à 20 °C : 9

- Point écoulement : - Hiver -12°C

- Eté -7°C

1.4.6. Les caractéristiques chimiques du gasoil :

-indice de cétane :48

- Point éclair : 55°C

- PCI m : 42.6 (MJ/kg)

- PCI v : 35.8 (MJ/L)

1.5. Analyse Statistique

1.5.1. Stockage des hydrocarbures liquides dans des réservoirs à toit fixe :

a- Typologie des accidents :

La typologie des événements répertoriés sur les réservoirs de stockage d'hydrocarbure toit fixe est établie dans la figure suivante .

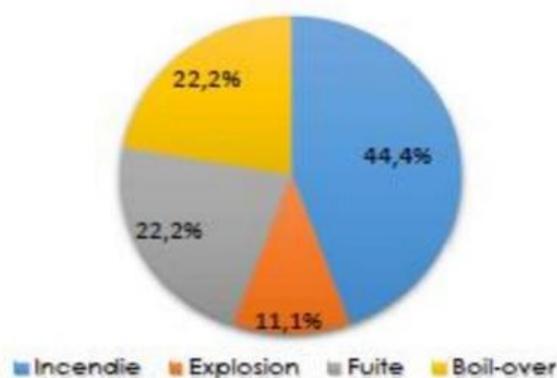


Figure 1.6 : Typologie des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe [4].

- ✓ Incendie : Les incendies représentent 44,4% des accidents recensés dans la base ARIA. C'est la Typologie la plus rencontrée. Si l'incendie n'est pas rapidement maîtrisé, il est généralement suivi d'explosions.

Chapitre 01 : Généralité sur les incendies des DLI

- ✓ Boil-over : le boil-over est présent dans 22,2 % des accidents étudiés et don't la cause est inconnue.
- ✓ Fuite : Cette typologie représente 22,2 % des accidents recensés. Elle comporte des fuites de D'hydrocarbure suivie par des rejets dans le sol.
- ✓ Explosion : Les explosions représentent 11,1 % des accidents recensés dans la base ARIA. Elles Touchent essentiellement les installations de stockage d'hydrocarbures suite à un incendie non maitrisé Ou suite à un défaut de manipulation (défaillances matérielles ou erreurs humaines).

b- Causes des accidents :

L'analyse des causes des accidents qui est l'un des principaux objectifs du retour d'expérience, est aussi L'un des paramètres les plus difficiles à appréhender en l'absence d'expertise détaillée. Le « facteulus de la moitié des accidents impliquant la conception, l'exploitation ou La maintenance des installations.

L'erreur humaine représente la cause essentielle des accidents recensés avec 33,3 % des cas. La défaillance Matérielle représente 22,2 %, les agressions externes représentent 22,2% des causes des accidents survenus . Et 22 % des accidents ont des causes inconnues Deux cas sont dus à des défaillances matérielles (travaux de soudure au voisinage immédiat des bacs de Stockage et en présence d'une atmosphère explosive, une étincelle produite par des travaux de maintenance, Entretien insuffisant...). Deux (2) cas d'agression externe ont été clairement soulevés et qui sont dus aux Facteurs climatiques : orage violent, foudre... Ainsi, seul deux (2) cas ont des causes inconnues. La répartition des accidents selon leurs causes est présentée dans la figure suivante :

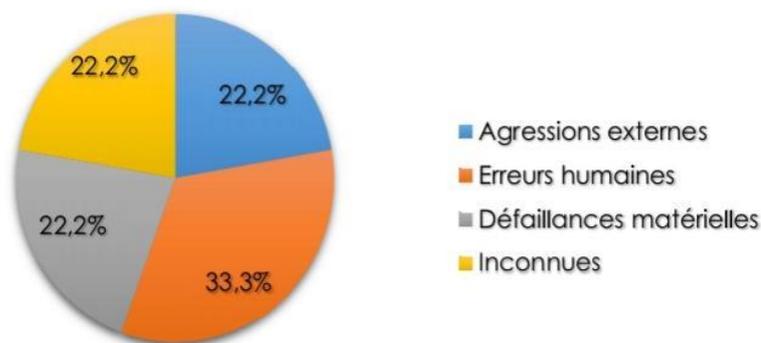


Figure 1.7: Causes des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe [4].

C - Conséquences des accidents :

Les accidents recensés ont révélé que les conséquences les plus fréquentes sont les dommages matériels (58,3 %) correspondant généralement à des dommages au niveau des réservoirs et des pertes du produit Stocké. La pollution est la Deuxième conséquence recensée (25%) et elle correspond à une infiltration des Hydrocarbures dans le sol et à la contamination des eaux souterraines. Pour les conséquences humaines, on dénombre 16,7% accidents parmi les accidents étudiés.

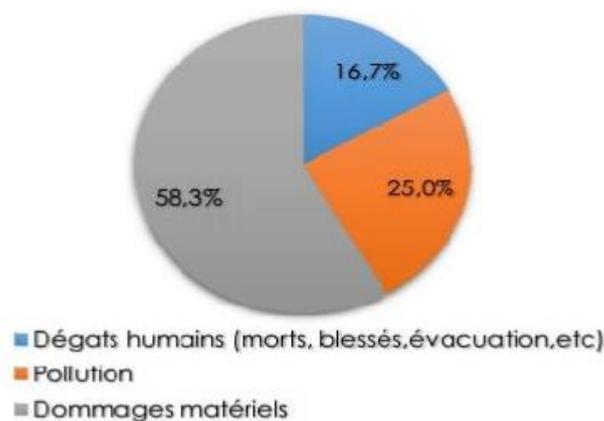


Figure 1.8: Conséquences des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe [4]

1.5.2 Stockage des hydrocarbures liquides dans des réservoirs à toit fixe et à écran flottant :

a) Typologie des accidents :

La typologie des événements répertoriés sur les réservoirs d'hydrocarbures liquides à toit flottant est établie Dans la figure suivante.

L'analyse statistique des accidents survenus concerne un échantillon de 15 événements don't 40% sont des Accidents liés à des incendies et des fuites d'hydrocarbures et 20 % liés à des explosions.

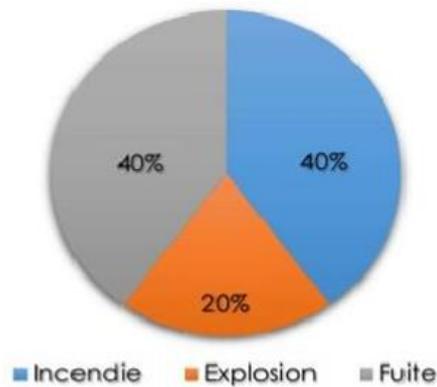


Figure. 1.9: Typologie des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran flottant [4].

b) Causes des accidents

Les causes courantes d'accidents sont dues dans 73,3 % des cas à des erreurs humaines et dans 26,7 % des Cas à des défaillances matérielles (fissuration au niveau du bac, corrosion, etc.). La répartition des accidents selon leurs causes est présentée comme suit :

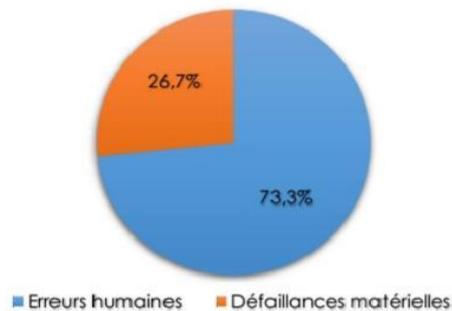


Figure 1.10. Causes des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran flottant [4].

c) Conséquences des accidents :

Les accidents recensés ont révélé que les conséquences les plus fréquentes sont les dommages matériels (57,9 %) correspondant généralement à des dommages au niveau des réservoirs et des pertes de produit Stocké.

La pollution est la deuxième conséquence recensée (26,3%) et elle correspond à une infiltration des Hydrocarbures dans le sol et à la contamination des eaux souterraines. Pour les conséquences humaines, on dénombre 15,8% accidents parmi les accidents étudiés.

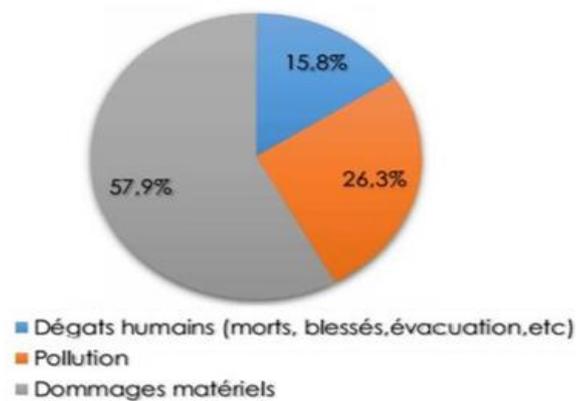


Figure 1.11 . Conséquences des accidents survenus sur des réservoirs à toit fixe et à écran flottant [4].

d- Circonstances des accidents (pour les différents types de réservoirs) :

L'étude des principales circonstances de déclenchement des accidents étudiés montre que 66,7 % des cas Sont survenus au moment où les installations fonctionnent dans des conditions normales et 33,3 % des Sinistres se produisent lors Des opérations de répartition ou de maintenance.



Figure 1.12. Circonstances des accidents étudiés [4].

1.6. Les techniques Prévention

C'est un ensemble de mesures qui ont pour but de réduire l'incidence d'un comportement ou d'un événement dangereux.

On distingue la prévention passive et la prévention active.

1.6.1 : La prévention passive :

La sécurité ne s'improvise pas ; elle est basée sur l'étude des faits à la base de la prévention , il faut la connaissance du mécanisme de l'accident .

Il est donc nécessaire d'analyser :

- les dangers présentés par les produits manipulés et par les moyens d'exploitation mis en œuvre.
- les conditions de travail.
- les accidents et incidents déjà survenus.

1.6.2 : La prévention active :

Les renseignements réunis de l'action passive permettent d'établir les règles de sécurité, de déterminer les moyens matériels et humains à mettre en œuvre et les mesures à prendre, propres à prévenir et réduire l'importance des accidents qui pourraient survenir malgré toutes les préventions.

Mais pour que la mission de la sécurité réussisse, il est nécessaire de créer un véritable esprit de la sécurité qui est la suivant :

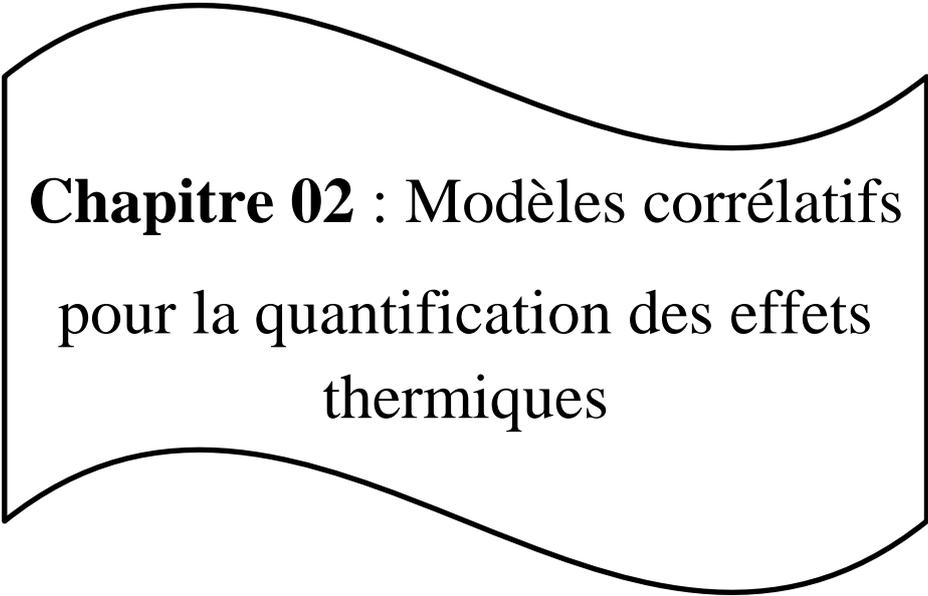
- Foi dans la nécessité de la sécurité.
- Volonté agissant de tout faire pour la protection contre les dangers professionnels.
- Etat d'alerte continuel contre la menace latente quelque fois invisible.
- Refus de la fausse sécurité de l'habitude.
- Application totale et constante des consignes de la sécurité.
- Lutte sans merci contre la négligence, le désordre, la malpropreté, l'imprudence [5].

CONCLUSION

Cette partie générale s'est attachée à décrire les généralités communes aux feux de liquides et de solides.

Le chapitre explicite les effets des phénomènes physiques dangereux sur l'homme et les Structures .On aussi défini les carburants et les caractéristiques physico-chimiques pour les deux variantes existantes (GO, ESS) au niveau du dépôt NAFTAL-CHIFFA.

On a parlé sur les statistiques des accidents et les techniques de prévention pour passe à définir et caractériser les flammes des incendies avec les différentes corrélations qui sont montrée dans Le prochain chapitre.



Chapitre 02 : Modèles corrélatifs
pour la quantification des effets
thermiques

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

Introduction

La détermination des distances d'effets associés aux flux thermiques émis par un feu de nappe de liquides inflammables est une modélisation complexe faisant intervenir de nombreux paramètres interdépendants.

L'instruction technique de 1989 propose des formules simples pour déterminer les distances d'isolement associées à un feu de cuvette, aux seuils de 3 et 5 kW/m². Ces formules ne dépendent que d'un seul paramètre : « la longueur du côté d'un carré de même surface que la cuvette examinée »

Généralités

La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre D_{eq} et reçu par une cible située à r mètres du feu est :

$$\Phi = \Phi_0 \times F(r) \times \Gamma(r) \quad (2.1)$$

avec :

Φ_0 : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme.

$F(r)$: Facteur de vue

Facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible.

$\Gamma(r)$: facteur de atmosphérique

Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis. En effet, une partie du flux est absorbée par l'air (plus particulièrement par l'eau et le CO₂), entre le front de flamme et la cible. Ce facteur est indépendant de la surface en feu et du produit mis en jeu.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

2.1. Modèles pour le pouvoir émissif « radiatif » de la flamme

Le pouvoir émissif de la flamme correspond à la quantité rayonnée, par unité de surface de flamme et de temps. Exprimé en kW/m², il peut être estimé par les modèles suivant :

2.1.1. TNO / Yellow Book (1992) :

$$\Phi_o = \Phi_{\max} \times (1 - \zeta) + \Phi_{\text{soot}} \times \zeta \quad (2.2)$$

avec :

Φ_{\max} : pouvoir émissif d'une flamme sans fumées noires

Φ_{soot} : pouvoir émissif des fumées (20 000 W/m² pour T= 800K)

$\zeta = 0.80$: pourcentage du flux absorbé par les fumées noires

$$\Phi_{\max} = m'' \cdot FR \times \frac{\Delta h_c}{1 + 4 \frac{L}{D_{eq}}} \quad (2.3)$$

où

- FR : fraction radiative (FR varie entre 0,1 et 0,4 selon le produit) (-)
- ΔH_c : Chaleur de combustion du produit (J/kg)
- m'' : Débit massique de combustion par unité de surface en feu (kg/m²/s)

Ce modèle intègre des paramètres qui caractérisent :

- la géométrie du feu : hauteur et surface de flamme,
- la nature du feu : type de produit.
- La fraction radiative, qui varie entre 0,1 et 0,4, traduit la perte d'une partie de la chaleur par convection et conduction. Ce paramètre qui dépend du produit, mais également du diamètre de la nappe en feu est en général difficile à estimer.
- Dans une approche majorante, l'UIC prend une FR égale à 0,35, ce qui correspond à un feu de benzène.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

Les travaux réalisés par Koseki indiquent que pour une nappe d'hydrocarbures d'un rayon supérieur à 10 mètres, la fraction radiative est inférieure à 0,1. La décroissance de la fraction radiative pour des hydrocarbures générant beaucoup de suies (kérosène, heptane..) peut être due, comme le mentionne l'INERIS [6], à l'absorption du rayonnement par les fumées, dont la production augmente avec le diamètre du feu

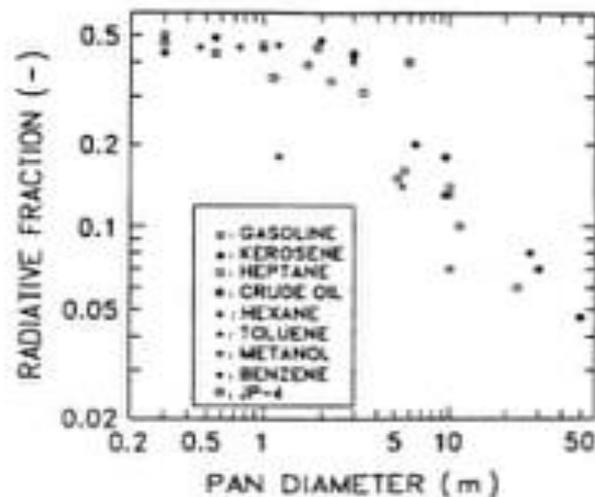


Figure 2.1 . Fraction radiatif en fonction du diamètre de nappe [6]

2.1.2. Modèle Mudan et Croce :

L'approche proposée par Mudan et Croce résulte d'une corrélation établie à partir d'essais réalisés sur des feux de 1m à 80 m de diamètre, avec différents hydrocarbures (le gazole, le kérosène et le JP-5). Le pouvoir émissif de la flamme est donné par l'équation :

$$\Phi_o = 20000 + 120000e^{-0,12Deq} \quad (2.4)$$

L'unique variable de cette formule est le diamètre équivalent, soit la surface en feu.

2.1.3. Modèle IT-89 :

Il est toutefois important de noter que :

La méthode permettant d'exprimer un flux mesuré (à une distance donnée) en radice de la flamme, n'est pas explicitée, la valeur de 29 kW/m², est une moyenne de plusieurs mesures

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

réalisées avec un nombre de fluxmètres limité et dans condition météorologiques (vitesse de vent entre autre) variables dans le temps sur la durée des essais.

2.2. Modèle pour le facteur d'atténuation atmosphérique

2.2.1. Définition :

Ce facteur $\Gamma(r)$ permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis. En effet, une partie du flux est absorbée par l'air, (plus particulièrement par l'eau et le CO₂) entre le front de flamme et la cible. Ce facteur est indépendant de la surface en feu et du produit mis en jeu.

2.2.2. Présentation des corrélations :

Il existe différentes corrélations pour déterminer ce facteur qui tiennent compte de la distance et de l'humidité (relative ou absolue):

2.2.3. Corrélation de Brzustowski et Sommer :

$$\Gamma(r) = 0,79 * (100/r)^{1/16} * (30,5/HR)^{1/16} \quad (2.5)$$

avec:

r: distance de la cible à la source(m).

HR: taux d'humidité relative de l'air(%).

2.2.4. Corrélation de Bagster :

$$\Gamma(r) = 2,02 * (P_{VAP(H_2O)} * r)^{-0,009} \quad (2.6)$$

$$P_{VAP(H_2O)} = HR * T_{VAP(H_2O)} \quad (2.7)$$

$$\Gamma(r) = 2,02 * (HR * T_{VAP(H_2O)} * r)^{-0,009} \quad (2.8)$$

2.2.5. Corrélation de Lannoy :

$$\Gamma(r) = 0,33 + 0,67 \exp(-0,0002 * W * r) \quad (2.9)$$

avec :

W : humidité absolue de l'air ambiant (g/ kg d'air sec)

2.2.6. Correlation de Wayne:

$$\Gamma(r) = 1.006 - 0.017 \log X(H_2O) - 0.2368 (\log X(H_2O))^2 - 0.03188 \log X(CO_2) + 0.001164 (\log X(CO_2))^2 \quad (2.10)$$

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

avec :

- $X(\text{H}_2\text{O}) = r \times \text{HR} \times P_{\text{VAP}(\text{H}_2\text{O})} \times (288.73 / T)$
- $X(\text{CO}_2) = r \times 273 \text{ t}$
- $P_{\text{VAP}(\text{H}_2\text{O})}$ en mmHg

Remarques:

Pour les modèles de Bagster, de Wayne et de Brzustowski et Sommer, la valeur de l'humidité a peu d'influence sur le facteur de transmissivité atmosphérique.

Par contre, pour le modèle de Lannoy, il convient de spécifier l'humidité absolue du site.

Pour l'ensemble des modèles exceptés Brzustowski et Sommer (qui est indépendant de la température), une variation de 20° C à un impact de l'ordre de 10% sur la valeur de la transmissivité atmosphérique.

2.3. Modèle pour le facteur de vue

Le facteur de vue (ou facteur de forme) traduit la fraction de l'énergie émise par un feu et qui est reçue par une cible. Ce facteur, purement géométrique, ne dépend que de la disposition relative du feu par rapport à la cible.

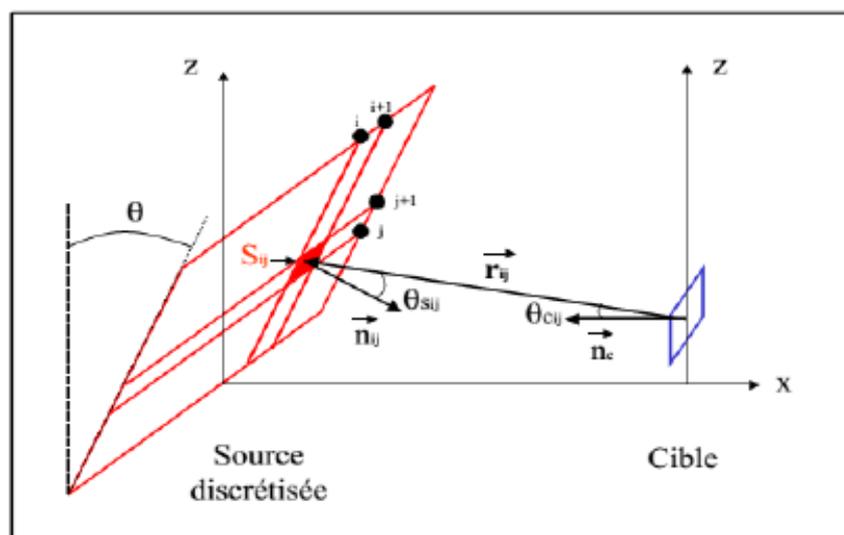


Figure 2.2. Schéma général entre une flamme et une cible.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

Ce facteur se détermine donc à partir :

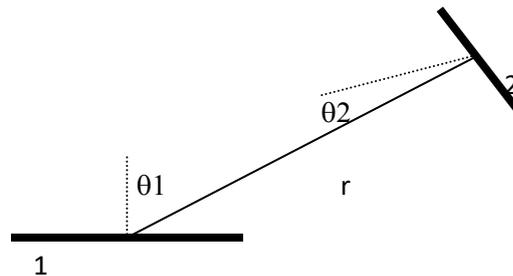
Des dimensions et de la forme de la flamme,

De la position et de l'orientation de la cible vis-à-vis de la flamme.

Il s'obtient à partir de l'angle solide sous lequel la cible voit la flamme et s'exprime sous la forme générale suivante :

$$\int_s \frac{\cos\theta_1 \times \cos\theta_2}{\pi \times r^2} dS$$

avec:



θ_1 : l'angle entre la normal de élément dA_1 ET la surface en feu

θ_2 : l'angle entre la normal de élément dA_2 ET la cible

r : la distance entre la flamme et la cible

Il existe, à notre connaissance, 2 types de facteur de vue pouvant être utilisés pour la modélisation de feux de nappe :

- le facteur de vue cylindrique,
- et le facteur de vue plan.

Le facteur de vue maximal est égal à la moyenne géométrique des facteurs de vue verticaux- F_v - (cible verticale) et horizontaux – F_h - (cible horizontale).

$$F_m = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad (2.11)$$

2.3.1. Facteur de vue cylindrique :

- **Facteur de vue d'un cylindre vertical :**

Pour le facteur de vue correspondant à un cylindre vertical (configuration relative à un vent nul), les experts utilisent la même formule.

Le facteur de vue cylindrique est fonction du diamètre et de la longueur de la flamme, ainsi que de la distance entre la cible et la flamme.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

- **Facteur de vue cylindrique avec inclinaison de flammes :**

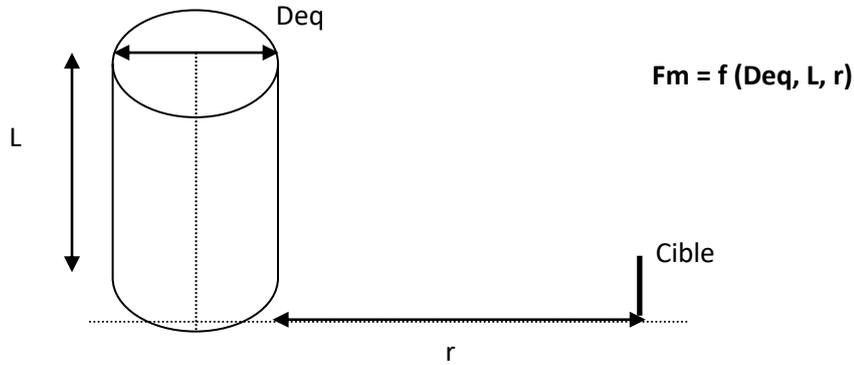


Figure 2.3. cylindre vertical (surface perpendiculaire au sol).

$$F_m = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_v = \frac{1}{\pi X} \text{Arc tan} \left(\frac{M}{\sqrt{X^2 - 1}} \right) + \frac{M}{\pi \times X} \left[\frac{(A - 2X)}{\sqrt{AB}} \text{Arc tan} \sqrt{\frac{A(X-1)}{B(X+1)}} - \text{Arc tan} \sqrt{\frac{X-1}{X+1}} \right] \\ F_h = \frac{1}{\pi} \left[\text{Arc tan} \left(\frac{\sqrt{X+1}}{\sqrt{X-1}} \right) - \left(\frac{X^2 - 1 + L^2}{\sqrt{AB}} \right) \text{Arc tan} \left(\sqrt{\frac{(X-1)A}{(X+1)B}} \right) \right] \end{array} \right.$$

où :

R	=	Deq/2	A = (X+1) ² +M ²
M	=	L/R	B = (X-1) ² +M ²
X	=	(r+R)/R	

Le facteur de vue cylindrique pour une flamme inclinée, est comme pour le facteur de vue d'un cylindre vertical, fonction :

- du diamètre et de la longueur de la flamme,
- de la distance r entre la flamme et la cible,

Mais, il est également fonction de l'angle α d'inclinaison de la flamme.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

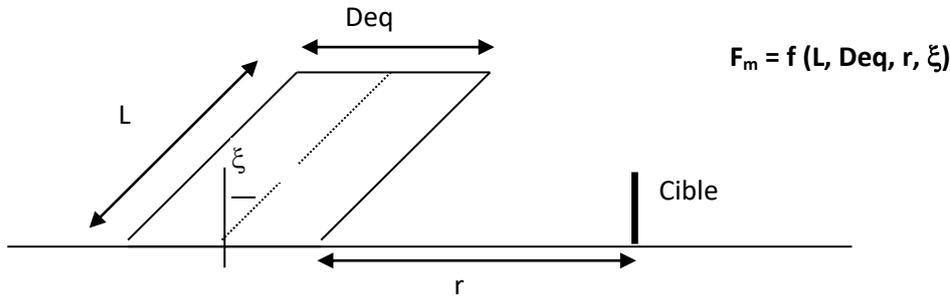


Figure 2.4. Inclinaison de la flamme sous l'effet du vent.

Les formules associées à ce modèle et développées par Mudan sont présentées dans le guide bleu de l'UFIP ainsi que dans le Yellow book du TNO.

$$F_m = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

Avec:

$$\pi F_v = \frac{h \cos \xi}{S - h \sin \xi} \frac{h^2 + (S+1)^2 - 2 S (1 + h \sin \xi)}{\sqrt{AB}} \times \tan^{-1} \sqrt{\frac{A}{B}} \left(\frac{S-1}{S+1} \right)^{0.5} + \frac{\cos \xi}{\sqrt{C}} \times$$

$$\left[\tan^{-1} \frac{h S - (S^2 - 1) \sin \xi}{(S^2 - 1)^{0.5} \sqrt{C}} + \tan^{-1} \frac{(S^2 - 1) \sin \xi}{(S^2 - 1)^{0.5} \sqrt{C}} \right] - \frac{h \cos \xi}{(S - h \sin \xi)} \times \tan^{-1} \left(\frac{S-1}{S+1} \right)^{0.5}$$

$$\pi F_H = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\left(\frac{S-1}{S+1} \right)^{0.5}} \right] - \frac{h^2 + (S+1)^2 - 2(S+1+h S \sin \xi)}{\sqrt{AB}} \times \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A}{B}} \times \left(\frac{S-1}{S+1} \right)^{0.5} \right]$$

$$+ \frac{\sin \xi}{\sqrt{C}} \left[\tan^{-1} \frac{h S - (S^2 - 1) \sin \xi}{(S^2 - 1)^{0.5} \sqrt{C}} + \tan^{-1} \frac{(S^2 - 1)^{0.5} \sin \xi}{\sqrt{C}} \right]$$

et avec :

$$h = L/R$$

$$S = (r + R)/R$$

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

$$R = Deq/2$$

$$A = h^2 + (S+1)^2 - 2 h (S+1) \sin \xi$$

$$B = h^2 + (S-1)^2 - 2 h (S-1) \sin \xi$$

$$C = 1 + (S^2-1) \cos^2 \xi$$

2.3.2. Facteur de vue plan :

- **Facteur de vue plan vertical :**

Dans la littérature, il n'existe qu'une seule corrélation permettant de calculer le facteur de vue plan. Cette corrélation est fonction des dimensions du « mur » de flamme, ainsi que de la distance entre la cible et la flamme. Elle est présentée dans les rapports [6].

Cette corrélation correspond à la configuration d'un vent nul.

- $X=L/r$ $Y=b/r$

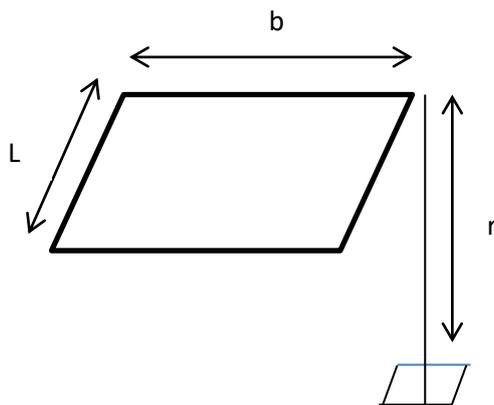


Figure 2.5. Surface orienté perpendiculaire au plan (cible vertical)

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \operatorname{Arctg} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \operatorname{Arctg} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

- $X=L/b$ $Y=r/b$

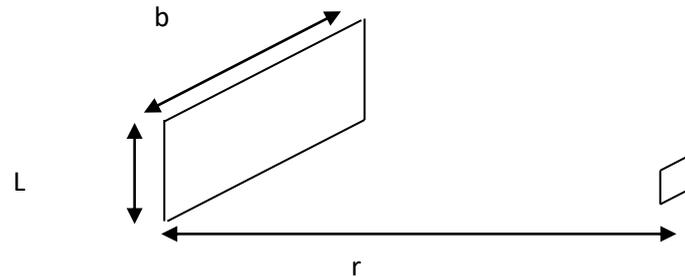


Figure 2.6. Surface orienté perpendiculaire au plan (cible horizontale)

$$A = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left(\text{Arctg} \frac{1}{Y} - A \cdot Y \cdot \text{Arctg} A \right)$$

$$\mathbf{F_m = f(L, b, r)}$$

- **Facteur de vue d'un plan incliné :**

Dans le cadre de la présente étude, l'INERIS a développé un outil permettant de prendre en compte l'effet du vent sur la flamme, à l'instar de ce qui est fait pour le facteur de vue cylindrique. L'outil permet ainsi de calculer le facteur de vue associé à un plan incliné.

$$F_m = f(L, b, r, x)$$

2.4. Modèle de l'IT89 pour les distances critique:

Afin d'évaluer les effets thermiques d'un phénomène de boule de feu sur l'homme, l'instruction technique de 1989 met en lumière deux formules de distances d'effets, l'une d3 à respecter pour les habitations et l'autre d5 pour les ERP:

$$D3 = 3.8K^{0.85} (1 - 3 \cdot 10^{-3} K)^{0.85}$$

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

$$D5 = 2.8K^{0.85} (1 - 2.2 \cdot 10^{-3} K^{0.85})$$

$$D8 = 2.25K^{0.85} (1 - 1.8 \cdot 10^{-3} K^{0.85})$$

Ou D8 et D5 et D3: distance d'isolement (m).

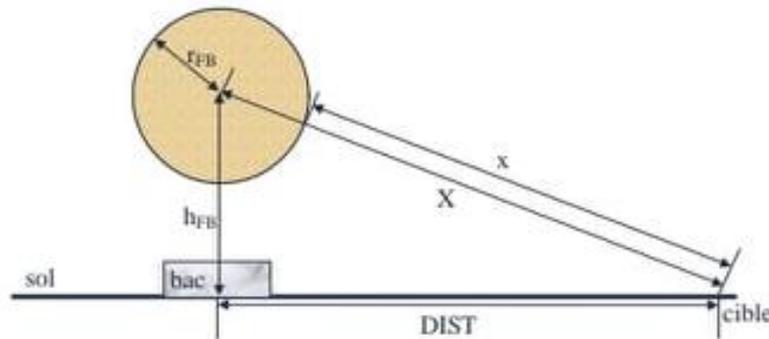


Figure 2.7. Notation relatives à la boule de feu .

Pour un bac impliqué dans un scénario de boilover, les distances d_3 et d_5 correspondent respectivement aux distances minimales d'éloignement des habitations et des ERP. Par extension, ces distances d_3 et d_5 se définissent également comme les distances d'effets associées respectivement à la létalité et aux brûlures significatives. De plus, il s'avère que les périmètres de sécurité d_3 et d_5 ainsi calculés correspondent aux distances entre le centre de la boule de feu et la cible située au sol alors qu'en général, les distances d'effets se définissent au sol entre le centre du bac et la cible. En se référant au schéma en figure 2.7, on s'aperçoit que les distances d_3 et d_5 correspondent à des périmètres maximums d'isolement.

Chapitre 02 : Modèles corrélatifs pour la quantification des effets thermiques

CONCLUSION

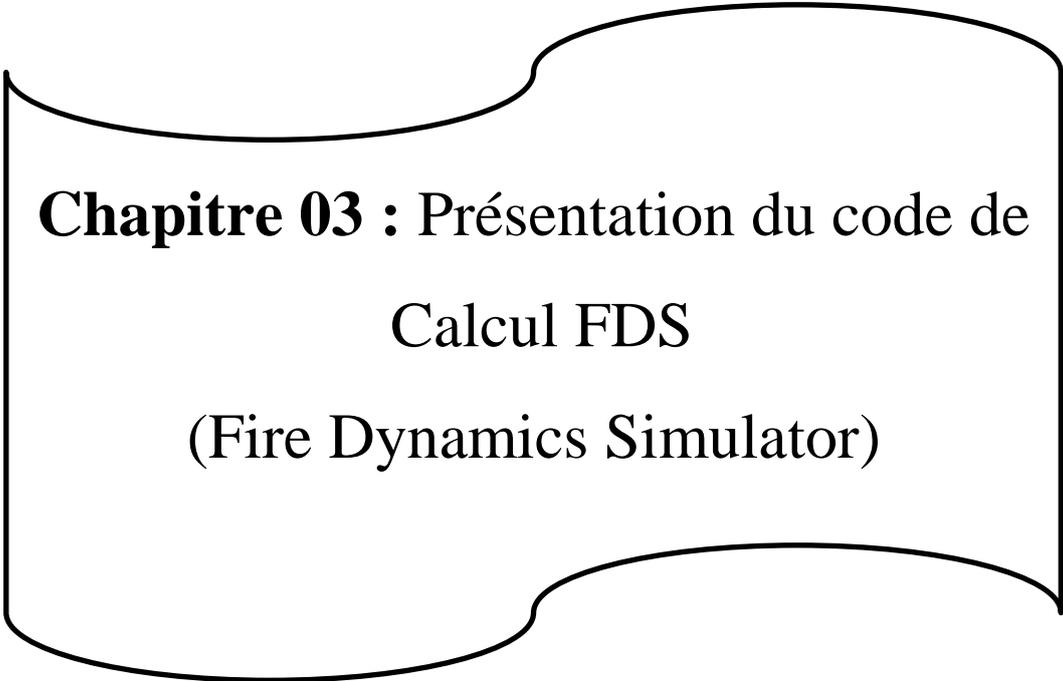
Ce chapitre sur les feux de nappe s'est attaché après l'analyse d'accidents, à passer en revue les différentes corrélations permettant de caractériser la flamme d'un incendie de produits liquides .

On a présenté des méthodes de calcul de mise en œuvre simple pour l'estimation des effets thermiques radiatifs associés à un feu de nappe. Bien entendu, il existe des modèles plus complexes que ceux présentés dans ce chapitre et qui permettent de décrire plus finement le comportement d'une flamme (y compris les modèles numériques).

Dans cette optique, la détermination des distances d'effets associés aux flux thermiques émis par un feu de nappe de liquides inflammables est une modélisation complexe faisant intervenir de nombreux paramètres interdépendants qu'on a mentionnés (Pouvoir émissif, hauteur de flammes, facteur de vue et le facteur d'atténuation atmosphérique).

Les formules au-dessus permettent de définir la géométrie de flamme soumise ou non au vent et de déterminer le pouvoir émissif de flamme, étape importante pour l'estimation des distances d'effets.

Le prochain chapitre on va définir le code FDS qui prend la puissance thermique comme donné d'entrée.



**Chapitre 03 : Présentation du code de
Calcul FDS
(Fire Dynamics Simulator)**

Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le code FDS (Fire Dynamics simulator), nous décrirons comment cela fonctionne techniquement et nous définirons les différents modèles présents et expliquerons également comment estimer les incendies en résolvant des équations numériques complexes, et parlant de la méthode LES et les modélisations des conditions aux limites.

3.1. Le Fire Dynamics Simulator (FDS)

3.1.1. Définition du code FDS:

FDS est un code à champ qui résout une forme simplifiée de l'équation 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). [7]

Le code FDS qui est à sa version 5.5.3, développé par l'institut américain NIST est un modèle CFD de simulation numérique tridimensionnelle, destiné à prédire les écoulements représentatifs des situations d'incendie.

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 FDS5 a été mis en place un système de gestion de révision formelle pour suivre la modification 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 5.2.12 FDS est ce 5 FDS, la cinquième version majeure. Le 2 indique la douzième version de maintenance de 5.2, la plupart de la correction de bugs et demandes de l'utilisateur mineur. [7]

3.1.3. Utilisation 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 réduit des produits de chaleur et combustion d'un incendie.
- Radiatif et le transfert de chaleur par convection entre le gaz et les surfaces solides.
- La diffusion de flamme et développement du feu.
- Gicleurs, le détecteur de chaleur, et l'activation du détecteur de fumée.

Pulvérisations d'extincteur 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. A 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. [9]

3.1.4. 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 modèles. FDS est de 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 ».

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

- ❖ 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. [7]

3.1.5. Structure du FDS :

L'exécution du FDS est structurée de la manière :

La géométrie de base et la position des quelque éléments doivent être spécifiées. 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. [7]

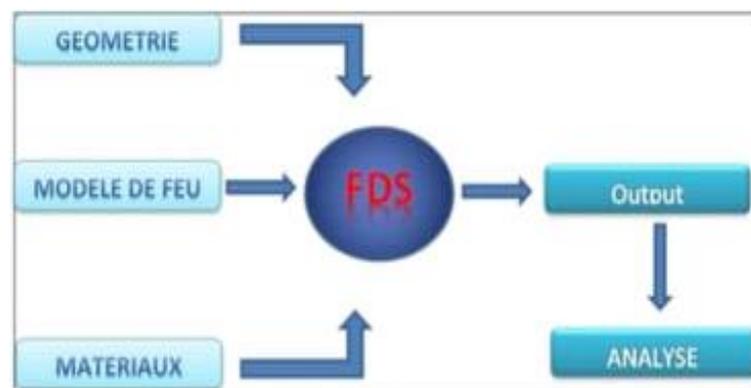


Figure 3.1 .Les données principale de code FDS

3.2. Les équations de base

FDS résout une forme des équations de Navier-Stokes appropriée aux écoulements à faible vitesse. L'ensemble des équations de base de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie résolues par FDS sont présentées au-dessous :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho \vec{u} \vec{u} + \vec{\nabla} p = \rho \vec{f} + \vec{\nabla} \tau_{ij} \quad (3.2)$$

Conservation de l'énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \vec{\nabla} \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \phi \quad (3.3)$$

Où : τ_{ij} : tenseur de forces de viscosité ;

ϕ : tenseur de dissipation visqueuse ;

\vec{q} : Le flux de chaleur par conduction ;

\dot{q}^m : Le flux par réaction chimique.

Equation d'état pour les gaz parfaits :

$$p = \frac{\rho RT}{M_w} \quad (3.4)$$

où : M_w : masse molaire moyenne.

Transport des espèces :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \vec{\nabla} \cdot \rho Y_i \vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \rho D_i \vec{\nabla} Y_i + \dot{m}_i^m \quad (3.5)$$

Dans l'équation de la quantité de mouvement, le terme (uu) est le tenseur obtenu par multiplication de deux vecteurs u et u^T . Le terme $(\nabla \cdot \rho uu)$ est le vecteur obtenu par multiplication de (uu) et $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$.

τ_{ij} : sont les composantes du tenseur de forces de viscosité, il est défini par :

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \right) ; \quad (3.6)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} ; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) ; \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Où : S_{ij} : Le tenseur des contraintes;

F: Forces extérieures;

\vec{u} : La vectrice vitesse ;

ρ : la masse volumique;

μ : la viscosité dynamique du fluide.

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

Dans l'équation de conservation de l'énergie on remarque l'utilisation de :

$$\frac{D(\cdot)}{Dt} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + u \cdot \nabla(\cdot)$$

Le terme $\nabla \cdot q$ représente la somme des deux flux de chaleur par conduction et par rayonnement. ;

h : L'enthalpie par unité de masse ;

\dot{q}^m : est le taux de dégagement de la chaleur par unité de volume pour une réaction chimique.

Le terme ϕ est connu comme dissipation visqueuse, c'est le taux de l'énergie cinétique transférée à une énergie thermique en raison de la viscosité dynamique du fluide, et est défini par :

$$\begin{aligned} \phi &= \tau_{ij} \cdot u = \mu \left(S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) \\ &= \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3.7) \end{aligned}$$

Dans l'équation de conservation des espèces, on peut définir les termes qu'elle contient comme suit :

D_i : Coefficient de diffusion de l'espèce chimique N° 'I' ;

Y_i : La fraction massique de l'espèce chimique N° 'I' ;

m_i^m : Le débit massique par unité de volume.

3.3. Modèles existants dans FDS

3.3.1. Modèle 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 :

$$\rho = \rho_0 - \rho^\infty g z + \hat{p} \quad (3.8)$$

ρ_0 est une pression moyenne, $-\rho^\infty g z$ est une pression hydrostatique (ou z est la distance verticale), \hat{p} est une perturbation. Cette approximation n'est valable que pour l'écoulement à faible nombre de mach, puisque la température est inversement proportionnelle à la densité.

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

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. [7]

3.3.2. Modèle de combustion :

Dans la plupart des applications, FDS exploite un modèle de combustion en fraction de mélange. Ce dernier est une quantité conservée qui est défini comme la fraction du gaz à un point donné dans le champ de flux.

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. Pour des feux à grande échelles et bien aérés, c'est une bonne approximation.

Les fractions massiques de tous les réactifs majeurs et des produits peuvent être tirées du mélange au moyen des relations d'état et des mesures.

La fraction de mélange Z peut être définie en termes de fraction de masse de carburant et des produits de la combustion :

$$Z = Y_F + \frac{M_{wF}}{x M_{wCO_2}} Y_{CO_2} + \frac{M_{wF}}{x M_{wCO}} Y_{CO} + \frac{M_{wF}}{x M_{wS}} Y_S \quad (3.9)$$

où :

Y_F : Est la fraction massique du carburant.

$$\text{On peut considérer que : } Z = Z_1 + Z_2 \quad (3.10)$$

tel que :

$$Z_1 = Y_F$$
$$Z_2 = \frac{M_{wF}}{x M_{wCO_2}} Y_{CO_2} + \frac{M_{wF}}{x M_{wCO}} Y_{CO} + \frac{M_{wF}}{x M_{wS}} Y_S \quad (3.11)$$

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

$$\dot{q} = \min \left[\frac{\max(\rho Y_F, s \rho Y_{O_2})}{\delta t} \Delta H, \dot{q}^m \right]; \quad s = \frac{M_{wF}}{v_{O_2} M_{wO_2}} \quad (3.12)$$

Avec :

M_w : Le poids moléculaire de l'espèce gazeuse α ;

s : Rapport stœchiométrique massique de la réaction ;

v_α : Coefficient stœchiométrique de l'élément α dans la réaction de combustion.

La fraction de mélange satisfait l'équation de conservation :

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} Z) \quad (3.13)$$

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 :

$$Z(r,t) = Z_f ; \quad Z_f = \frac{Y_{O_2}^m}{s Y_F^l + Y_{O_2}^m} \quad (3.14)$$

où :

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

Y_F^l : Fraction massique de combustible dans le jet.

3.3.3. Modèle de rayonnement :

La flamme tout comme les fumées et les parois rayonnent dans différents spectres d'émission selon le matériau considéré. Le rayonnement est un élément primordial dans l'incendie car environ un tiers de la chaleur du feu est transférée par rayonnement. Il est le principal vecteur d'énergie, responsable de la propagation du feu. Prise en compte du rayonnement dans la simulation est donc indispensable.

Les transferts radiatifs dans un milieu sont caractérisés par l'évolution de l'intensité lumineuse I_λ traversant ce milieu le long d'un rayon lumineux. Cette intensité lumineuse est définie comme étant l'énergie rayonnée par unité de temps et par longueur d'onde λ passant à travers la surface normale à la direction \vec{s} du rayon un angle solide $d\Omega$ centré de \vec{n} .

C'est donc une puissance par unité de surface et par stéradian ($W.m^{-2}.sr^{-1}$). Ce rayon peut être diffusé, absorbé et ou émis par le milieu. Le bilan pour les transferts radiatifs dans un milieu absorbant, émettant et diffusant est décrit comme suit :

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial I_\lambda}{\partial t} + \vec{s} \nabla I_\lambda = S_{\text{émission}} + S_{\text{absorption}} + S_{\text{diffusion}} \quad (3.15)$$

Avec C la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide où $C=3.10^8 m/s$. $S_{\text{émission}}$ Est l'intensité lumineuse émise par le milieu

où $S_{\text{émission}} = \epsilon_\lambda I_{\lambda b}$

avec

ϵ_λ étant le coefficient d'émission e

$I_{\lambda b}$ est l'intensité lumineuse du corps noir, estimée par la loi de Planck tel que :

$$I_{\lambda b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{k_b \lambda T}} - 1)} \quad (3.16)$$

Avec h la constante de Planck et k_b la constante de Boltzman

$S_{\text{absorption}}$ Caractérise l'absorption du milieu :

$$S_{\text{absorption}} = -K_\lambda I_\lambda$$

avec K_λ le coefficient d'absorption, $S_{\text{absorption}}$ Caractérise la diffusion du milieu.

La résolution de l'équation (3.14) est assez complexe à réaliser dans la pratique, des hypothèses de simplification sont adoptées :

- Le temps de propagation d'un rayon lumineux est infiniment court devant tous les temps caractéristiques généralement rencontrés dans les applications d'incendie. Le terme temporel peut donc être négligé.
- Le milieu est non diffusant et le coefficient d'absorption est égal au coefficient d'émission et une forme simplifiée est défini par :

$$\vec{s} \nabla I = k(I_b - I) \quad (3.17)$$

I_b Est l'intensité du corps noir avec $I_b = \frac{\sigma}{\pi} T^4$ et σ est la constante de Stephan-Boltzmann.

Le flux radiatif \dot{q}'' défini dans l'équation de l'énergie est calculé à partir de l'intensité I , on aura alors :

$$-\nabla \cdot \dot{q}''_r = k(U - 4\pi I_b) \quad \text{Avec} \quad U = \int_0^{4\pi} I d\Omega \quad (3.18)$$

3.4. Résolution numérique :

FDS repose sur une description eulérienne d'écoulements gazeux à masse volumique (et température) variable. Le fluide étant supposé visqueux newtonien, le code résout l'équation 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. 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 des différences finies centrées au centre des mailles. la figure 2.3 est une représentation de cette approche. Un schéma prédicteur-correcteur explicite du second ordre est appliqué pour l'incrémentation 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. À partir de la valeur calculée lors de la procédure de prédiction, la condition de stabilité est vérifiée avant de corriger les valeurs estimées. [7]

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 :

$$\Delta t \max\left(\frac{\Delta x}{\mu}, \frac{\Delta y}{\gamma}, \frac{\Delta z}{\omega}\right) < 1,$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ et μ, γ, ω Sont respectivement les dimensions des mailles des 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 $n+1$.

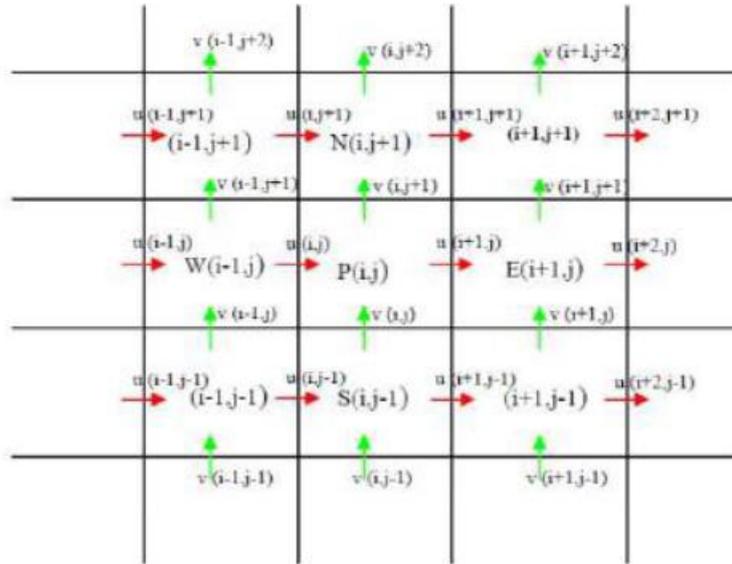


Figure 3.2 .Maillage à grille décalée

A la fig. les points (w, p, e, s, n) sont retirement (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. [7]

3.5. Utilisation de la méthode LES

3.5.1. Compréhension de la turbulence :

Le traitement statique de la turbulence a longtemps été la seule possibilité d'approche du phénomène avec la décomposition de Reynolds de la vitesse et l'introduction de la moyenne des vitesses fluctuantes. Mais le gros problème de ces méthodes est celui du bouclage faisant intervenir à chaque fois des moments d'ordre $n+1$ dans les équations d'ordre n des fluctuations de vitesse. Le modèle $k-\epsilon$ très largement utilisé est reconnu actuellement comme l'une des meilleures méthodes de résolution mais la puissance des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager une autre voie.

L'approche par un modèle LES de la turbulence représente une rupture avec les approches antérieures et les méthodes DNS n'en sont qu'à leur tout début. Si l'on s'affranchit de certaines difficultés précédemment rencontrées, d'autres non moins

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

déliçats à résoudre viennent s'y substituer. En effet, outre les puissances de calcul encore insuffisantes pour envisager des cas complexes, la parfaite compréhension de la turbulence est fondamentale à cette approche si l'on souhaite aller au cœur du problème. De plus, la prise en compte de toutes les structures qui transportent et dissipent l'énergie est indispensable, ce qui n'est encore possible que pour des écoulements simples et connus.

Malgré tout, la méthode dite des larges échelles (LES) s'avère prometteuse en modélisant uniquement la dissipation des petites échelles alors que le transport par les grosses structures est calculé directement par un maillage suffisamment fin. Avec cette méthode, il est donc envisageable de simuler des écoulements plus complexes bien que la validité des résultats soit difficile à mesurer.

Différentes études ont montré l'importance de l'interaction entre grosse et petites structures dans un écoulement turbulent qui respectivement transportent et dissipent l'énergie. L'analyse de Kolmogorov mettant en évidence la cascade énergétique dans l'espace spectral constitue le point fondamental à la compréhension de la turbulence (figure 3.3).

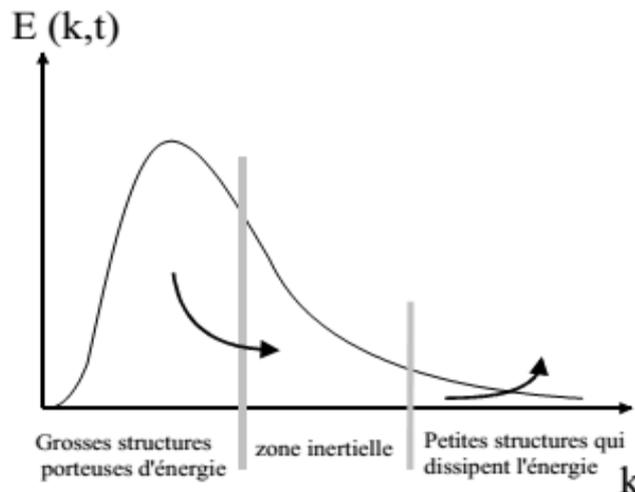


Figure 3.3 .Spectre d'énergie d'un écoulement turbulent [10].

La nécessité de prendre en compte les grosse et les petites échelles pour simuler la turbulence est indéniable. Il est en effet nécessaire de capter des petites échelles (au moins celle de l'ordre de Kolmogorov) mais également les grosses structures pour prendre en compte leur effet dissipatif. Ceci se traduit par un maillage fin dont le pas

est fonction de la taille de l'échelle minimale à capter (filtrage spatial ou spectral) et devient alors une contrainte énorme vis-à-vis du temps de calcul

3.5.2. Utilisation de la méthode LES dans FDS :

Dans l'espace spectral, le principe de la méthode LES consiste à filtrer les petites échelles. Cela revient dans l'espace physique à ignorer les échelles de taille inférieure à une certaine dimension qui, dans le cas d'un code CFD, est défini par le pas de maillage. L'objectif est donc de modéliser l'effet (dissipatif) des échelles qui ne sont pas prise en compte c'est-à-dire de modéliser une certaine viscosité turbulente ν_t . La forme de cette modélisation caractérise les différents modèles de sous-maillages. Le modèle de viscosité dans l'espace physique de Smagorinsky (1963) est certainement le plus populaire. Il introduit une dépendance de ν avec le taux de déformation local lié aux grandes échelles et c'est sur une telle analyse que le code FDS repose.

La viscosité dynamique intervenant dans l'équation de la quantité de mouvement est calculée au centre de cellules de maillage par la formule suivante :

$$\mu_{ijk} = \rho_{ijk}(C\Delta)^2|S| \quad (3.19)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} |S| = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \end{array} \right.$$

La conductivité thermique ainsi que la diffusivité matérielle sont calculées sur la base de cette viscosité de la manière suivante :

$$K_{ijk} = \frac{c_{p,0} \mu_{ijk}}{Pr} \quad \text{Et} \quad (\rho D)_{ijk} = \frac{\mu_{ijk}}{Sc} \quad (3.20)$$

Les nombres de Prandtl, de Schmidt ainsi que la constante empirique C ont des valeurs basées sur des simulations de panache de fumées :

$$Pr = Sc = 0.2 \quad \text{et} \quad C=0.14$$

Ces valeurs n'ont pas de justification théorique rigoureuse [11]

Pour un calcul LES, la combustion n'est pas modélisée. La puissance thermique dégagée par le feu est discrétisée par des particules thermiques ou lagrangienne qui contiennent une certaine partie de la puissance thermique totale définie comme donnée

d'entrée. Elles libèrent ensuite cette énergie rapidement (typiquement 0.25 s) après leur émission représentant ainsi l'inflammation du gaz combustible (réaction avec l'oxygène). Elles continuent ensuite leur déplacement en suivant l'écoulement et représentent alors les fumées. Sachant que les transferts thermiques résultants de ce phénomène sont calculés, on peut donc véritablement visualiser un feu et ses conséquences aussi bien en termes de température, que de flux radiatifs calculés à partir des équations de base de la mécanique des fluides et de la thermodynamique pour des géométries complexes.

Si l'importance du maillage a été soulignée, il n'existe pas au niveau du code de moyen de contrôler la validité des calculs à ce sujet. En fait, il est précisé dans la documentation que pour avoir une bonne description du phénomène, le pas de maillage au niveau de la source doit être de l'ordre de 10% des dimensions de celle-ci. Cela implique que loin du feu, le maillage peut être plus « grossier ». Cependant une description fine des températures ou des dispersions des fumées suppose un pas relativement fin par rapport à la géométrie. Il est communément admis que le nombre de points de maillage pour prendre en compte l'échelle de Kolmogorov doit varier comme $Re^{9/4}$ [13,14].

Il est noté que dans FDS, la géométrie est totalement reliée à la définition du maillage par l'emploi numérique de mailles dites bloquées. Ceci constitue une contrainte à la définition de grand pas de maillage dans le cas de géométries complexes.[8]

3.6. Modélisation des conditions aux limites

3.6.1. Transfert de chaleur convectif :

Le code FDS estime le flux de chaleur convectif au niveau de la surface d'un solide en utilisant des corrélations correspondant au cas d'une plaque plane.

Dans le cas de la convection libre, le coefficient de transfert convectif est obtenu en estimant le nombre de Nusselt moyen sous la forme $Nu \propto Ra^{1/3}$ où Ra est le nombre de Rayleigh basé sur l'écoulement près de la paroi. Cette approche aboutit dans FDS à la formulation proposée par Holman :

$$h_{conv} = C|\Delta T|^{1/3} \quad (3.21)$$

Chapitre 03 : Présentation du code de calcul FDS

Où la constante C vaut 1.31 dans le cadre de la plaque plane verticale et 1.52 dans le cas d'une plaque horizontale. Le terme ΔT correspond à l'écart de température entre le mur et le gaz environnant la paroi.

Dans le cas de la convection forcée, la relation utilisée s'écrit sous la forme

$$Nu = 0.037Re^{4/5}Pr^{1/3} \quad (3.22)$$

Où Re et Pr sont respectivement les nombres de Reynolds et Prandtl. Le nombre de Reynolds est basé sur l'écoulement près de la paroi.

Le transfert convectif est estimé par le code en combinant les phénomènes de convection naturelle et de convection forcée de la manière suivante :

$$\dot{q}_c'' = h_{conv}\Delta T \quad \text{Avec} \quad h_{conv} = \left[C|\Delta T|^{1/3}; 0.037 \frac{K}{L} Re^{4/5} Pr^{1/3} \right]$$

Dans cette formulation L est la longueur caractéristique du mur et k représente la conductivité thermique du gaz. Cette modélisation, relativement simpliste, évite de recourir à une résolution précise de la couche limite. Cependant, cette approximation de nature macroscopique n'est plus valide si la taille de la maille de gaz au contact du solide est inférieure à l'épaisseur de la couche limite thermique. Ainsi, au-delà d'une certaine taille de maille, le fait de raffiner le maillage près des parois ne conduit pas à une meilleure précision dans l'estimation du flux convectif.

3.6.2. Transfert thermique dans les parois :

✓ Paroi thermiquement épaisse :

Lorsque la paroi est supposé thermiquement épaisse, le code FDS résout une équation de chaleur monodimensionnelle régissant la température T_s du solide de la forme :

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \right) \quad \text{Avec} \quad -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} (0, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.23)$$

Dans ces expressions, ρ_s , C_s et λ_s sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique de la paroi. La direction normale à la surface de cette dernière est notée n . Les conditions aux limites de cette équation permettent de modéliser un transfert thermique à travers un mur entre deux zones fluide du domaine de calcul.[8]

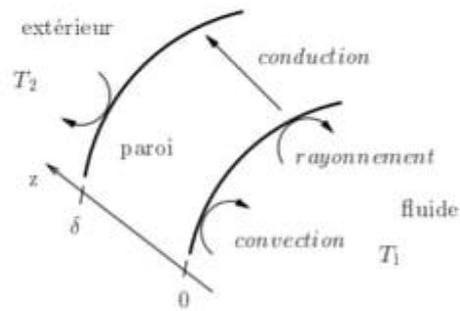


Figure 3.4. Echanges de chaleur avec la paroi

✓ **Paroi thermiquement mince :**

Cette fois, la température est supposée uniforme dans la profondeur du solide et l'équation de la chaleur s'écrit plus simplement :

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s c_s \delta} \quad (3.24)$$

Où δ désigne l'épaisseur thermique du solide.

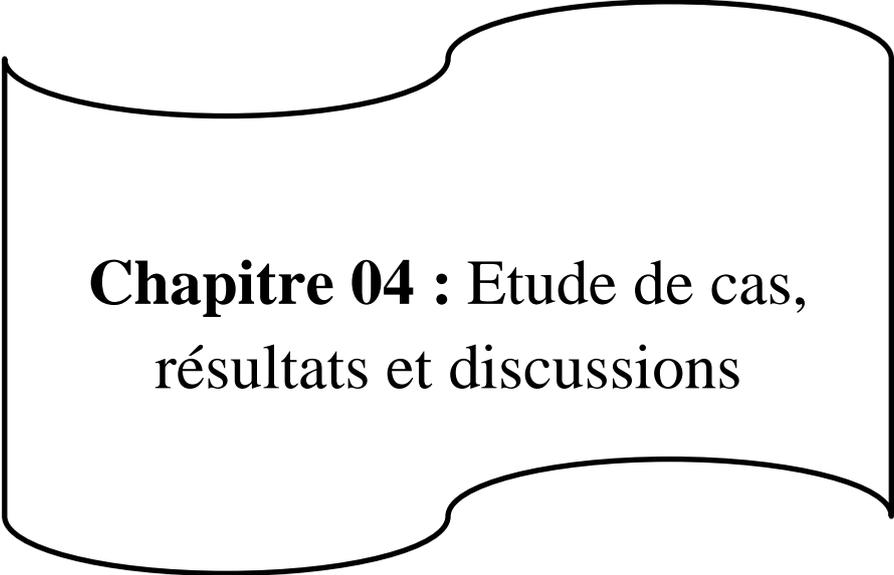
CONCLUSION

Le chapitre comprend une description du code FDS , c'est un code qui permet de résoudre les problèmes pratiques d'incendie dans l'ingénierie de protection contre les incendies, outil pour étudier la dynamique des incendies, il peut être utilisé pour d'autres simulations d'écoulement de fluide à basse vitesse.

Il permet de balayer une grande plage de variation de la densité et de la température, le rayonnement est un élément primordial dans l'incendie car environ un tiers de la chaleur du feu est transférée par rayonnement. FDS résout l'équation de continuité, la résolution numérique de l'équation de conservation par la méthode des différences finies centrées.

La méthode LES filtre les grandes échelles (Large Eddy Simulation) modéliser une certaine viscosité turbulente.

Dans le chapitre suivant on essayer d'appliquer sur le FDS un incendie dans un centre de carburant cas centre carburant NAFTAL-CHIFFA.



Chapitre 04 : Etude de cas,
résultats et discussions

Introduction

L'entreprise NAFTAL est une importante compagnie d'hydrocarbure en Algérie, Elle a un poids Très important sur l'économie du pays, son rôle consiste à assurer le transport la commercialisation Et la distribution des hydrocarbures (tels carburant, GPL, lubrifiant, bitumes, pneumatique, et des Produits spéciaux etc....) vers le national et l'international, via 3 moyens de transport terrestre Maritime, et aérienne NAFTAL composée de trois branches carburant.

On va aussi appliquer les modèles présentés au chapitre 03.

4.1. Présentation du Centre

-**Unité** : centre de stockage et de distribution de carburants.

- **localisation** : route d'Oran, la CHIFFA.

- **Coordonnées géographiques** :

Le centre de stockage et de distribution de carburants de Chiffra est situé à 2 km au NORD OUEST de la ville de Chiffra ; il est limité au nord par la voie de chemin de fer Alger –Oran et Un peuplement de gourbis, au sud par la route nationale RN42, à l'est par le département technique, à l'ouest par l'unité pneumatique et lubrifiants.

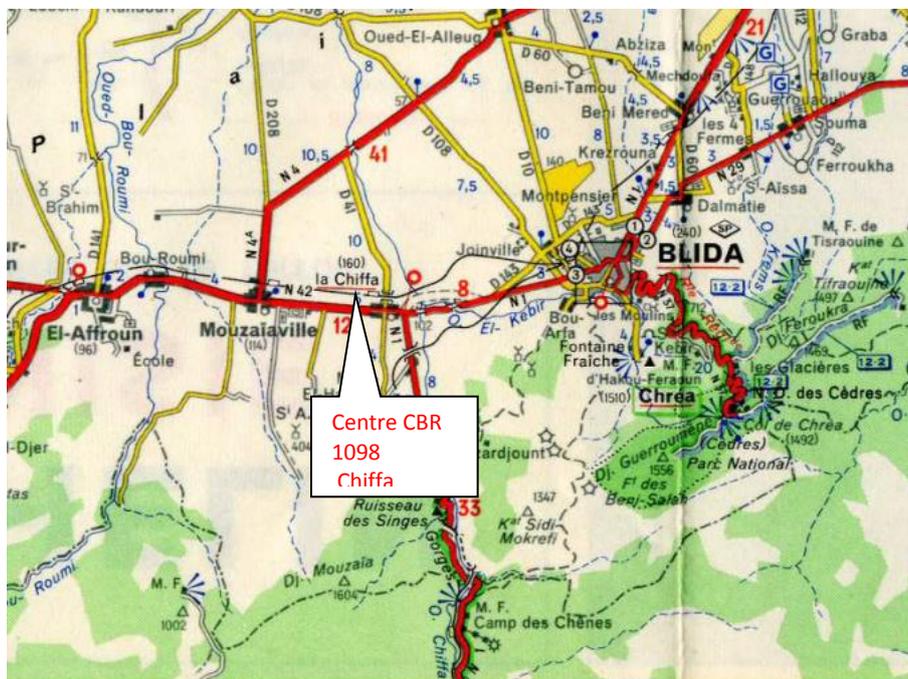


Figure 4.1 : Plan de situation [4]

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

-**Produits manipulés** : essences (super – normale) ; gasoil ; pétrole.

-**Capacité de stockage** : 33 720 m³.

-**Mode de ravitaillement** : le centre est relié à la raffinerie d'Alger par un pipe de 10 pouces.

4.1.2. Historique :

- Le Centre a été construit en 1942 par l'armée française.
- Le dépôt était ravitaillé par voie ferrée et par route.
- Le dépôt a fonctionné jusqu'à l'indépendance (1962) puis a cessé d'activer.
- En 1970, il a été intégré dans le patrimoine SONATRACH, et après restructuration en 1982 dans celui de NAFTAL.
- De 1982 à 1984, le dépôt a subi une rénovation complète, restauration des bacs existants, augmentation de capacité et modernisation des installations et équipements.

-En Avril 1984, il a été remis en exploitation.



Figure 4.2 : Vue satellitaire du site [4]

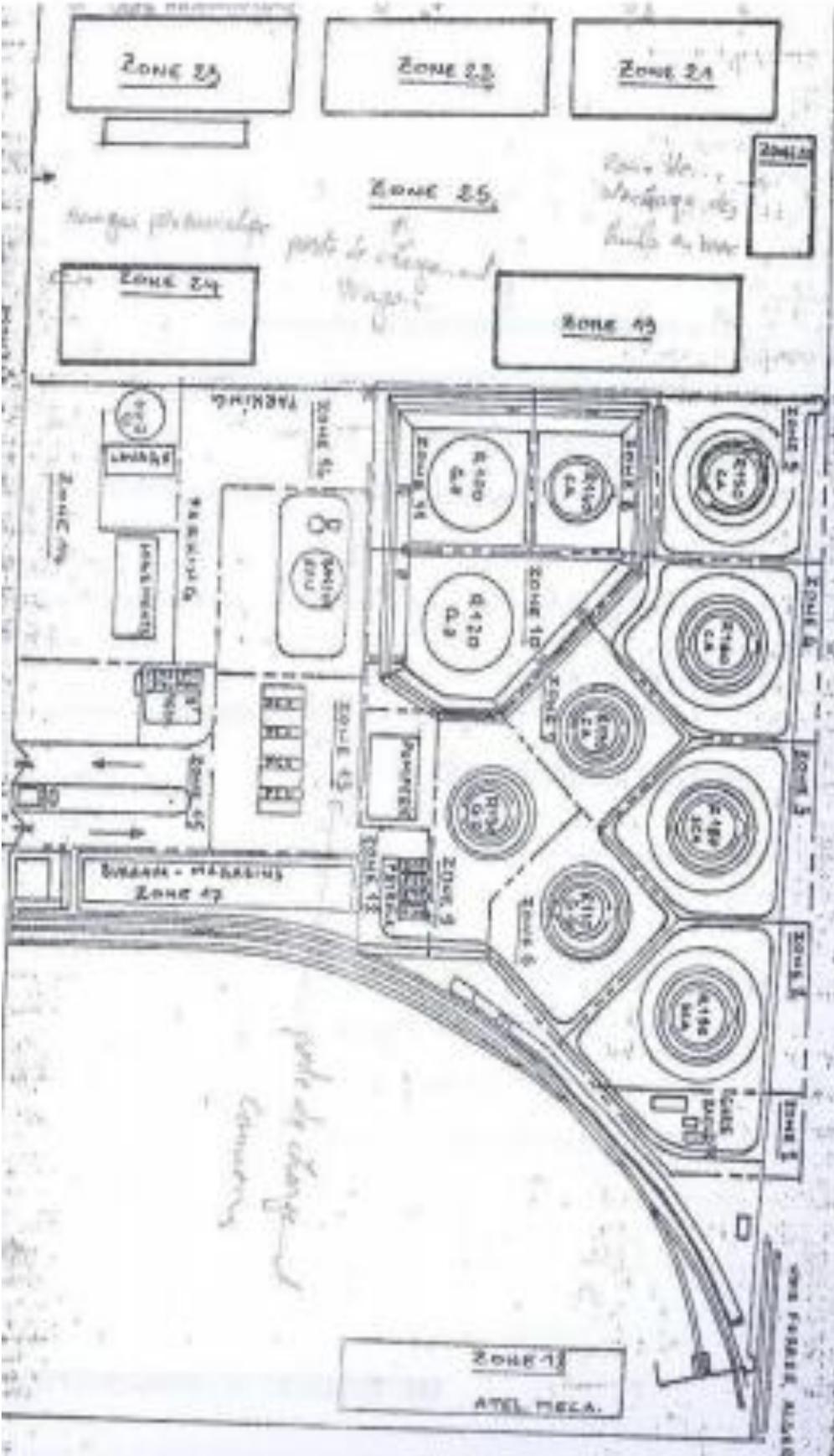


Figure 4.3.plan de masse. [4]

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

4.1.3. Installation composant l'unité :

L'activité du CDS CHIFFA 098 est le stockage et la distribution des différents produits Carburants au niveau de la wilaya de Blida et des Wilayas limitrophes.

Il abrite les installations suivantes :

- 10 bacs de stockage (capacité allant de 1200 à 10 000 m³), plus 4 cuves (capacité de 300 chacun).
- 4.4. Installation composant l'unité :
- 02 pomperies carburants.



Figure 4.4. Photo de bac de stockage d'Essence Supere dans centre NAFTAL-CHIFFA.

- 01 gare de racleur arrivé.
- 01 salle pomperie incendie.
- 02 transformateurs électriques de 1 000 et 630 KVA.
- 01 forage plus château d'eau.
- 01 réseau d'eau.

- 01 réseau émulsifiant.
- 01 réseau d'eau de capacité 1 200 m³.
- 01 bâtiment technique avec salle de contrôle
- 01 laboratoire.
- 01 fosse de décantation servant à récupérer les produits rejetés.
- Divers blocs administratifs plus magasins et ateliers.
- Salle de contrôle.



Figure 4.5. Photo de poste de chargement carburant NAFTAL-CHIFFA.

4.1.4. Zonage du Centre de CHIFFA :

Le Centre CHIFFA est doté des équipements et infrastructures suivantes :

- Une arrivée pipe Terminal avec une gare racleur
- Un parc de stockage de produits pétroliers
- 04 Postes de déchargement routier.
- 02 Postes de chargement ferroviaire.

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

- Une pomperie de déchargement
- Une pomperie de chargement
- Locaux administratifs : bureaux, vestiaires et sanitaires
- Logements, cantine, cafétéria
- Ateliers, garage mécanique, magasins, etc.
- Transformateurs électriques.
- Salle de contrôle.

***Ces équipements sont regroupés en zones :**

- La zone 1 contient 4 bacs (R150, R160, R180, R190) de différentes capacités
Pour le stockage des produits tels que : Carburant Auto, Super Carburant Auto.
- La zone 2 contient 3 bacs (R170, R110, R130) de différentes capacités pour le
Stockage des produits tels que : Carburant Auto, Gasoil.
- La zone 3 contient 3 bacs (R100, R120, R140) de différentes capacités pour le
Stockage des produits tels que : Carburant Auto, Gasoil.
- La zone 20 : zone de stockage des huiles en vrac.
- La zone 21 : Hangar Lubrifiants.
- La zone 22, 23, 24 : Hangars pneumatiques.

Le parc de stockage est composé de :

SCA= Super Carburant Automobiles

Des canalisations de différents diamètres relient les bacs aux pompes et aux bouches de chargement.

4.1.5. La Réception du produit :

La réception des différents produits se fait par :

- pipe 10 pouces de la raffinerie d'Alger Sidi Arcine pour les multi produits existants.

- camions citernes.
- voie ferroviaire (Alger- Oran).

Les produits sont accompagnés d'un certificat de qualité délivré par le fournisseur.

Chaque Expédition programmée, fait l'objet d'un ordre d'expédition, à cet effet la raffinerie et le centre Prennent toutes les dispositions pour le bon déroulement de toute l'opération. Un PV de réception est signé par les deux parties.

4.1.6. Stockage des produits :

Les produits réceptionnés sont stockés dans des bacs aériens de différentes capacités. Afin de Déterminer les quantités de produits à réceptionner, un jaugeage des bacs est effectué par L'opérateur du Centre.

4.1.7. Transfert des produits :

Lors de l'approche des camions – citernes des postes de chargement, les chauffeurs, les agents Des rampes ainsi que les agents de sécurité industrielle doivent suivre des consignes bien précises concernant :

- L'arrivée des camions aux postes de chargement et leurs vérifications

(La citerne doit être vide, mise à la terre,...)

- Vérification des postes de chargement.
- Vérification des quantités à charger.

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

Tableau 4.1 : Compositions de parc de stockage [4].

Réservoir	Produit	Capacité théorique (m ³)	Capacité réelle (m ³)	Date de construction		Dimensions (m)	Type de toit	
Réservoir N° R 190	S.C.A	2000	1900	1942		D : 16 H : 11	D : 16 H : 11	Fixe
Réservoir N° R 180	C.A	2000	C.A	2000	1900	1982	D : 16 H : 11	Fixe
Réservoir N° 160	C.A	2000	C.A	2000	1900	1942	D : 16 H : 11	Fixe
Réservoir N°150	C.A	2000	C.A	2000	1900	1942	D : 16 H : 11	Fixe
Réservoir N° 110	C.A	1200		1200	1100	1983	D : 16 H : 11	HS ou non utilisé
Réservoir N° 170	C.A	1200	C.A	1200	1100	1942	D : 13 H : 11	Fixe
Réservoir N° 140	C.A	2000	C.A	2000	1900	1983	D : 16 H : 11	Fixe
Réservoir N° 130	GO	1200	G.O	1200	1100	1983	D : 13 H : 11	
Réservoir N° 120	GO	10 290	G.O	10 290	9850	1983	D : 30 H : 14	Fixe
Réservoir N° 100	GO	10 290	G.O	10 290	9850	1983	D : 30 H : 14	Fixe

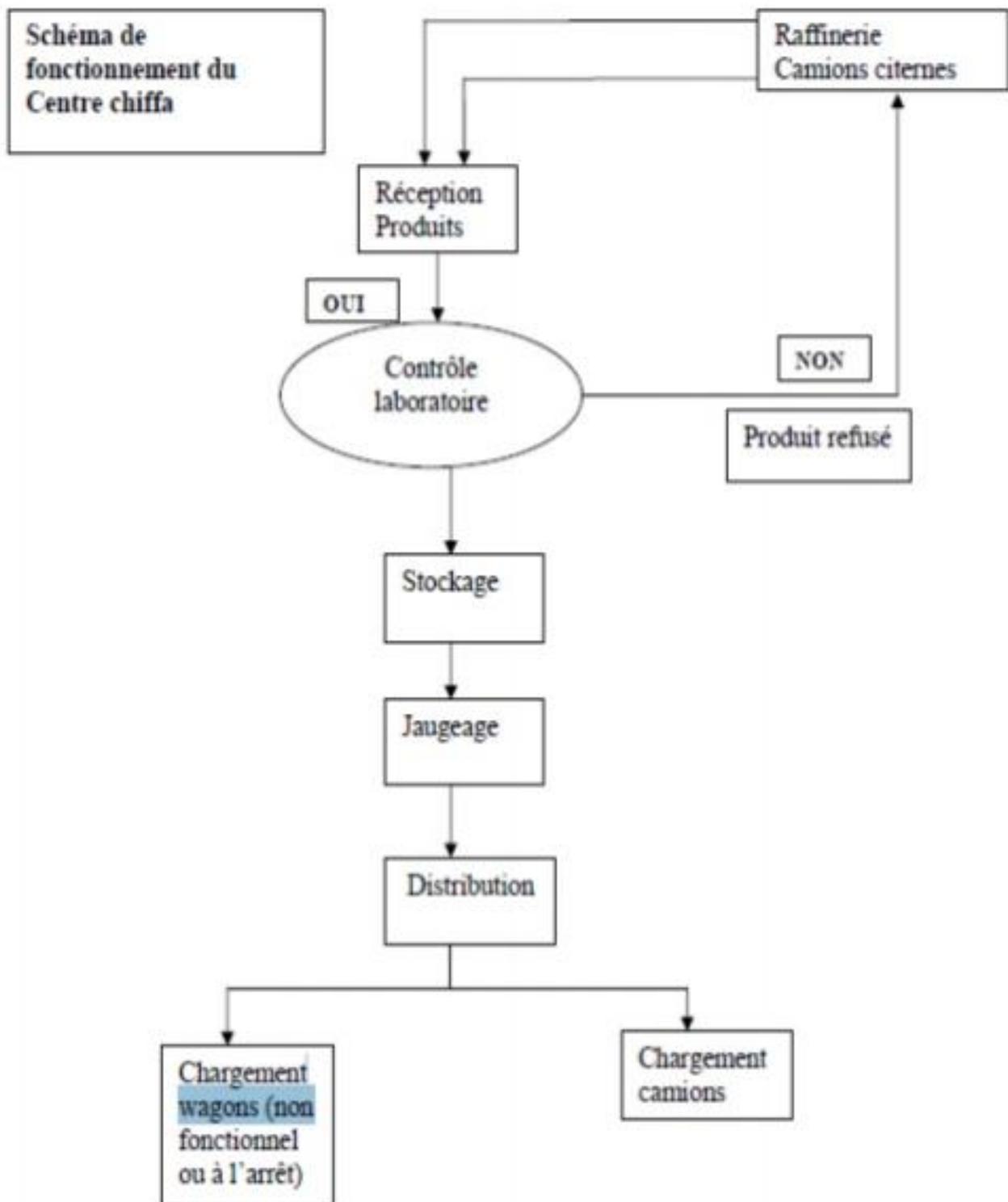


Figure 4.6. Schéma de fonctionnement du centre [11]

4.1.8. Les Moyens de lutte contre l'incendie :

a- Personnel de sécurité :

- 01 inspecteur principal de sécurité.
- 16 agents de sécurité travaillants en 24/24.

b- Les installations fixes :

Le but des installations fixes est permettre la mise on œuvre des agents extincteurs dans la lutte contre l'incendie et ce dans des délais extrêmement courts.

On distingue en général plusieurs types d'installation fixes :

- Réseau d'incendie eau
- Installation de systèmes de refroidissement.
- Installations fixes de mousse.
- Installations fixes de CO₂.
- Installations fixes de poudre.
- Installation fixe mixte CO₂-poudre.



Figure 4.7. Photo d'exercice de simulation de NAFTAL-CHIFFA. [12]

4.2. Présentation de l'étude numérique

4.2.1. Géométrie du local :

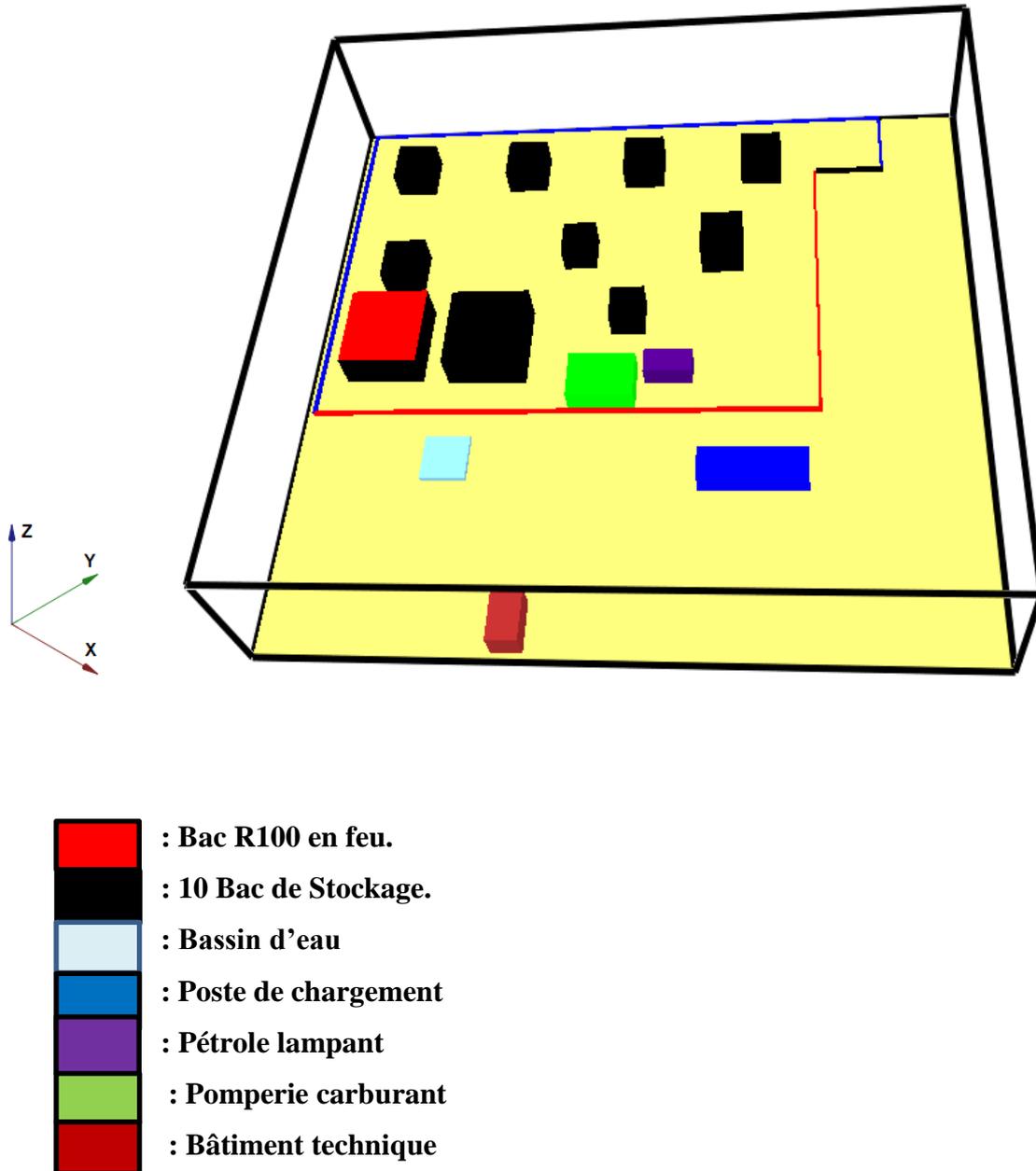


Figure 4.8. Schématisation 3D du domaine d'étude par (Smokeview).

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

4.2.2. Structures de domaine de calcul :

➤ **Dimension de domaine de calcul :**

- Suivons l'axe X=250m
- Suivons l'axe Y=222m
- Suivons l'axe Z=55m

➤ **Surface de domaine :**

$$S=55500\text{m}^2$$

➤ **Dimension et de distance entre bac :**

➤ **distance entre bac :**

$$R150 - R160 = 32\text{m}$$

$$R160 - R180 = 32\text{m}$$

$$R180 - R190 = 32\text{m}$$

$$R140 - R170 = 56\text{m}$$

$$R170 - R110 = 42\text{m}$$

$$R100 - R120 = 10\text{m}$$

$$R120 - R130 = 31\text{m}$$

➤ **Dimension des structures :**

Le tableau suivant représente les distances de différentes structures dans la réalité selon les trios dimension.

Tableau 4.2.Dimension des structures

Structures	Dimension selon X [m]	Dimension selon Y [m]	Dimension selon Z [m]
Poste de chargement	39	11	9.6
Bâtiment technique	11	17.5	9.6
Bassin d'eau	16.5	16.5	2.1
Pétrole lampant	18	9	7.5
Pomperie carburant	25	17	8.5

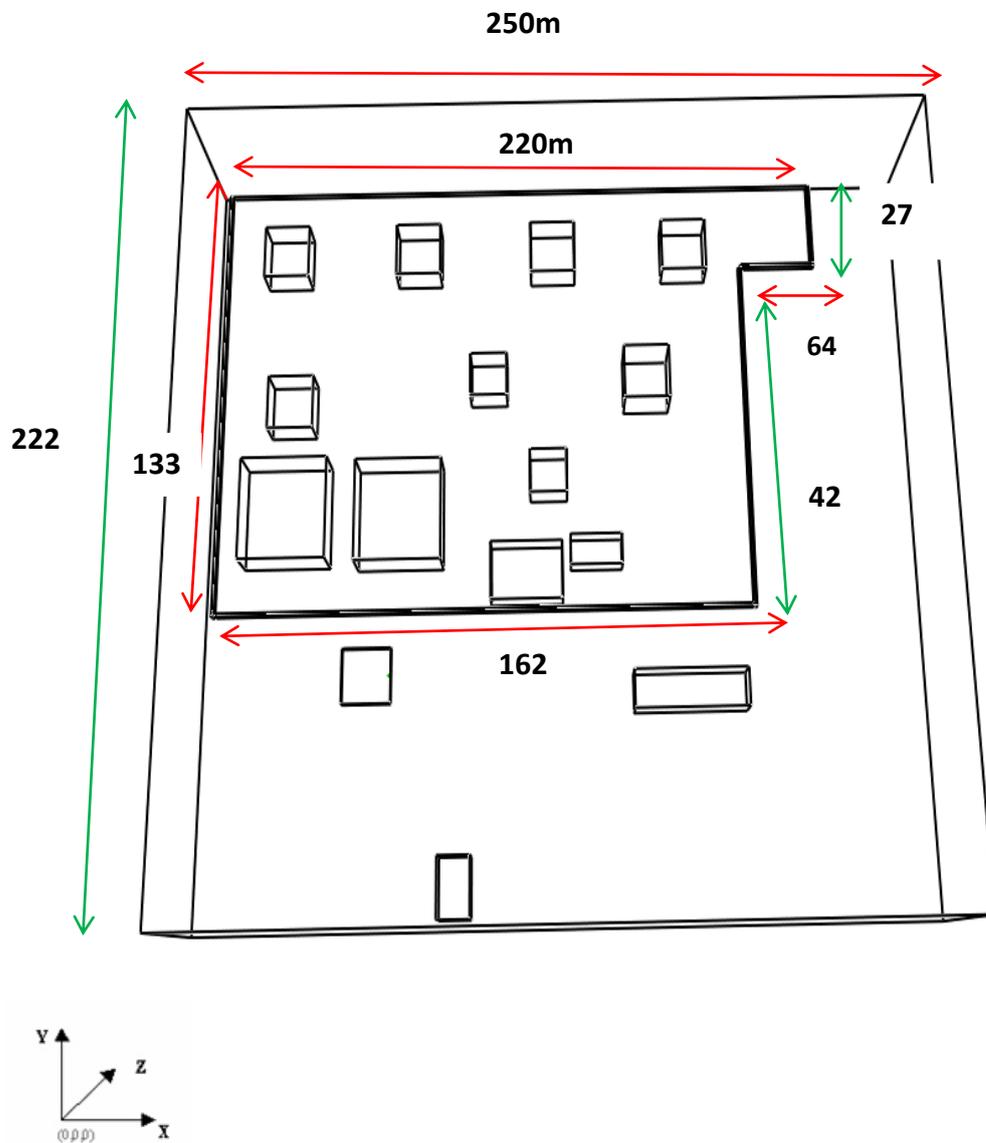


Figure 4.9. Diagramme schématique montrant les distances réelles (après mesures)

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

➤ Dimension des bacs de stockage:

Kpool : coté du bac de stockage équivalent (parallépipédique)

Apool : Aire de la surface libre au bac (cylindrique) de stockage.

Tableau 4.3. Dénomination et dimensions des bacs de stockage

Nom de bac de carburant	Type de carburant	Dpool	Hpool	Apool	Kpool
R100	GO	30	14	706.5	26.58
R110	GO	16.5	14	213.80	14.62
R120	GO	30	14	706.5	26.58
R130	GO	13	11	132.71	11.52
R140	Ess Sup	16	11	201.03	14.17
R150	Ess Sup	16	11	201.03	14.17
R160	Ess Sup	16	11	201.03	14.17
R170	Ess Sup	13	11	132.71	11.52
R180	Ess N	16	11	201.03	14.17
R190	Ess N	16	11	201.03	14.17

Remarque :

Le tableau présenter les calculs de la surface libre de bac (cylindrique) de stockage et le coté équivalent pour chaque bac avec la relation décrite dans la section 4.6.

4.3. Les puissances thermiques imposées

4.3.1. Feu en bac de Gasoil :

- TNO $\Phi_0=24.25\text{KW/m}^2$
- Mudan & Croce $\Phi_0=23.28\text{KW/m}^2$

4.3.2. Feu en en bac ESS Super :

- TNO $\Phi_0=23.23\text{KW/m}^2$
- Mudan & Croce $\Phi_0=37.59\text{KW/m}^2$

4.4. Les maillages :

4.4.1. Maillage des feux:

Comme vous le savez, le fait de mailler tout le domaine de calcul, va aussi toucher au feu puisque le feu est interne au building.

Pour le feu la situation est différente. On dispose de règles de maillage qui ont été établies par des organismes du génie nucléaire (norme NUREG1827).

$$D^* = \left[\frac{\dot{Q}_{Fire}}{\rho_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot T_{air} \cdot \sqrt{g}} \right]^{2/5}, \quad 16 \geq \frac{D^*}{\Delta x_{LES}} \geq 4 \quad (4.1)$$

avec :

D^* : est la taille infinitésimale d'une structure de feu.

Δx_{LES} : est la taille caractéristique de la cellule.

$\rho_{air} \cdot C_{p_{air}}$: La masse volumique, ET la chaleur massique de l'air à la température T_{air} .

$T_{air}=25^\circ\text{C}$.

$\text{Rho air} = P/(r. T_{air})$.

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

$C_{\text{pair}} = 1005 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$.

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Tair en [K]

A cet effet, nous distinguons trois tailles de maillage:

- maillage grossier :
 $D^*/D_{xg} = 4$
- maillage moyen :
 $D^*/D_{xg} = 10$
- maillage fin :
 $D^*/D_{xg} = 16$

Tableau 4.4. Calculs grille de maillage cas incendie dans un bac de Gasoil.

Φ (kw/m ²)	D^*	deltaX_grossier	deltaX_moyen	deltaX_fin
TNO $\Phi_0=24.2$ 5	0.0136	$D_{xg}=3.4 \cdot 10^{-3}$ $N_{divx}=73529$ $N_{divy}=66765$ $N_{divz}=16177$ $N_{cel}=divx \cdot N_{divy} \cdot N_{divz}$ $=8 \cdot 10^{13}$	$D_{xm}=1.36 \cdot 10^{-3}$ $N_{divx}=183824$ $N_{divy}=166912$ $N_{divz}=40441$ $N_{cel}=1 \cdot 10^{15}$	$D_{xf}=8.5 \cdot 10^{-4}$ $N_{divx}=294118$ $N_{divy}=27059$ $N_{divz}=64706$ $N_{cel}=5 \cdot 10^{14}$
Mudan & Croce $\Phi_0=23.2$ 8	0.0134	$D_{xg}=3.35 \cdot 10^{-3}$ $N_{divx}=74627$ $N_{divy}=67761$ $N_{divz}=16418$ $N_{cel}=8 \cdot 10^{13}$	$D_{xm}=1.34 \cdot 10^{-3}$ $N_{divx}=186567$ $N_{divy}=169403$ $N_{divz}=41045$ $N_{cel}=1 \cdot 10^{15}$	$D_{xf}=8.37 \cdot 10^{-4}$ $N_{divx}=298508$ $N_{divy}=271045$ $N_{divz}=65672$ $N_{cel}=5 \cdot 10^{15}$

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

4.4.2. Les calculs des grilles de maillage:

➤ **Cas 1 : incendie dans un bac de Gasoil (25°C, RH=40%)**

$$X_{\max} = 250$$

$$Y_{\max} = 222\text{m}$$

$$Z_{\max} = 55 \text{ m}$$

où :

« Ndivx » cellules dans la direction X.

« Ndivy » cellules dans la direction Y.

« Ndivz » cellules dans la direction Z.

✚ **Cas 2 : incendie dans un bac ESS Super (25°C, RH=40%) :**

Tableau 4.5. Calculs grille de maillage cas incendie dans un bac de Ess Super.

Φ_0 (kw/m ²)	D*	deltaX_grossier	deltaX_moyen	deltaX_fin
TNO $\Phi_0=23.23$	0.0134	$D_{xg}=3.35 \cdot 10^{-3}$ Ndivx=74627 Ndivy=67761 Ndivz=16418 Ncel=8*10 ¹³	$D_{xm}=1.34 \cdot 10^{-3}$ Ndivx=186567 Ndivy=169403 Ndivz=41045 Ncel=1*10 ¹⁵	$D_{xf}=8.37 \cdot 10^{-4}$ Ndivx=298508 Ndivy=271045 Ndivz=65672 Ncel=5*10 ¹⁵
Mudan & Croce $\Phi_0=37.59$	0.0162	$D_{xg}=4.05 \cdot 10^{-3}$ Ndivx=61728 Ndivy=56049 Ndivz=13580 Ncel=5*10 ¹³	$D_{xm}=1.62 \cdot 10^{-3}$ Ndivx=154321 Ndivy=140124 Ndivz=33951 Ncel=7*10 ¹⁴	$D_{xf}=1.0125 \cdot 10^{-3}$ Ndivx=246914 Ndivy=224198 Ndivz=54321 Ncel=3*10 ¹⁵

Remarque:

Le nombre de cellule est très grand dans le cas d'un maillage grossier, donc on ne peut pas l'utiliser en raison des contraintes techniques.

4.4.3. Les maillages utilisés :

a. maillage fin :

$Dx=0.5$ donc $Nx=250/0.5$, $Ny=222/0.5$, $Nz=55/0.5$

$N_{cell}=Nx*Ny*Nz=24420000$

b. maillage moyen :

$Dx=1m$ donc $Nx=250/1$, $Ny=222/1$, $Nz=55/1$

$N_{cell}=Nx*Ny*Nz=3052500$

c. maillage grossier :

$Dx=2m$ donc $Nx=250/2$, $Ny=222/2$, $Nz=55/2$

$N_{cell}=Nx*Ny*Nz=38156$

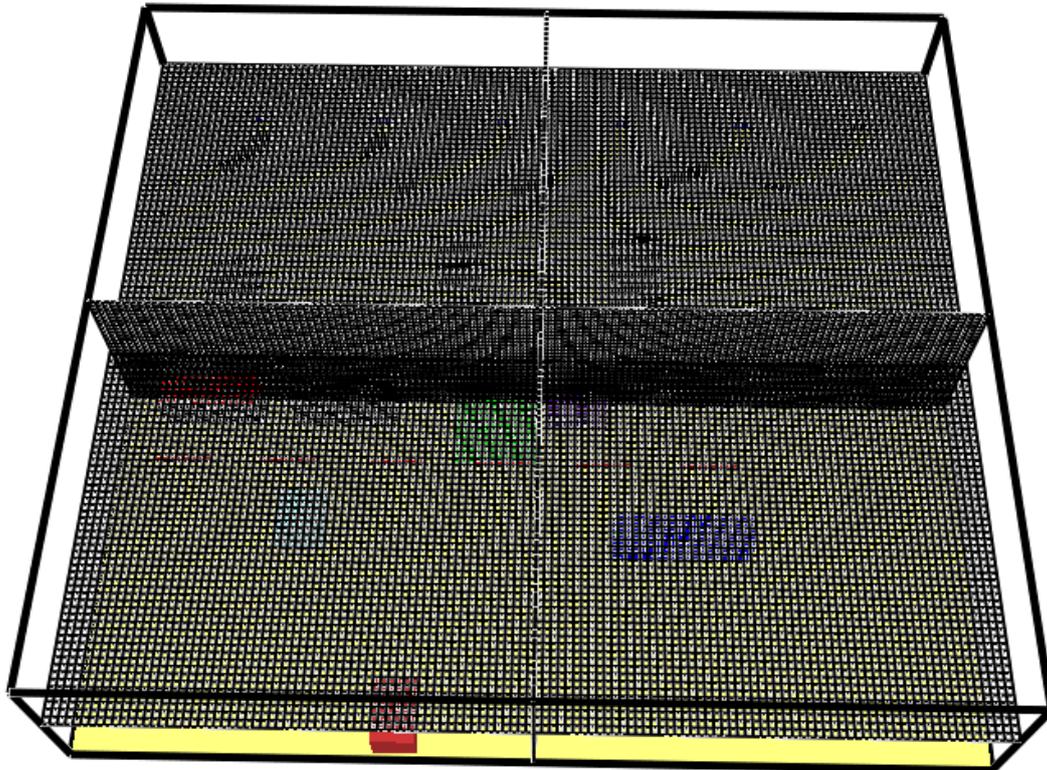


Figure 4.10. Maillage du domaine de calcul avec FDS présenté par (Smokeview).

4.5. Les condition opératoire :

4.5.1. Les conditions atmosphériques :

✚ **la température initiale :**

on suppose une température ambiante de **25°C**

✚ **l'humidité relative initiale :**

L'humidité on générale est relative de la température donc il été de **40 %**

✚ **Le vent :**

La vitesse de vent a été **0 m/s**

4.5.2. Les conditions aux parois :

✚ **la température initiale :**

Toutes les structures elle est à température de **25°C**

4.6. Modélisation géométrique sur FDS

Le code FDS ne maitrisé que le maillage structuré et la technique IT-89 adapter avec la formes cubique, c'est pour ça ont a obligé de modifier la forme de bac cylindrique à la forme cubique et puisque la puissance thermique elle est en kilos watt par mètre carré on peut changer la forme sauf qu'on garde la même surface et donc on fait ça

A pool=Spool

où

A pool : surface de base de cylindre (m²)

Spool : surface de base de cube (m²)

$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} = kpool^2 \quad (4.2)$$

D'après la relation (4.2), ont calculé les résultats qui est sur le tab.4.1.

4.7. Hypothèse de calculs

- la température du local et des Structures (T_p=25°C).
- Le maillage utilisé (maillage grossier) DX=2, Ncell=38156.
- Le temps d'observation (temps physique) : t=15 minutes [12]

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

- La durée de simulation $t=20$ h.
- Absence de vent.
- L'humidité relative $RH=40\%$
- La turbulence est modélisée par la méthode (LES) vue au chapitre précédent.

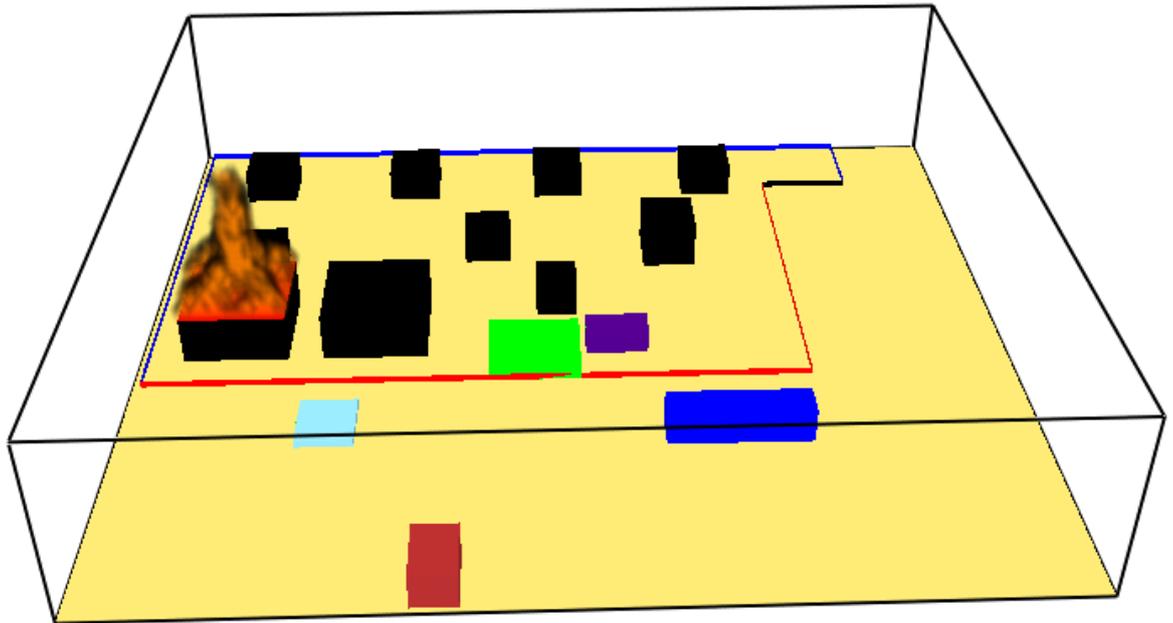


Figure 4.11. feu de Bac R1000 avec FDS présenté par (Smokeview).

4.8. : Résultats et interprétations

Différents cas ont été réalisés afin d'atteindre les objectifs au départ. Les calculs ont été organisés de la manière suivante :

✚ Cas 1 : estimation du flux radiative sur le bassin d'eau :

Le calcul par simulation pour obtenir le flux au niveau de bassin d'eau est visible sur les graphes suivants :

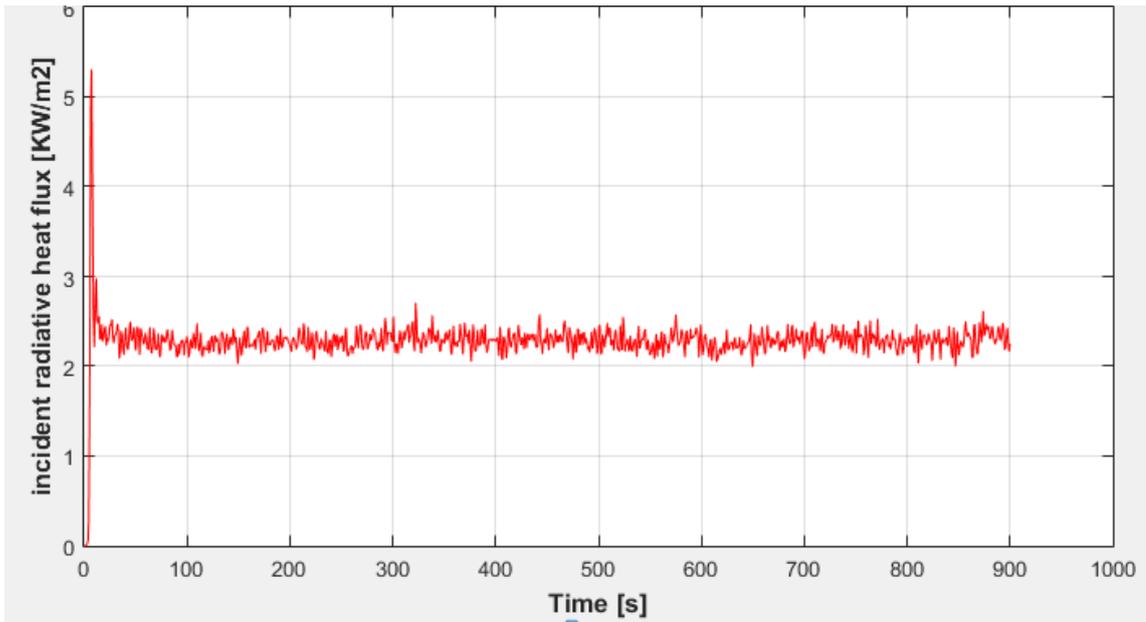


Figure 4.12.a. Evolution du flux radiatif incident (bassin d'eau).

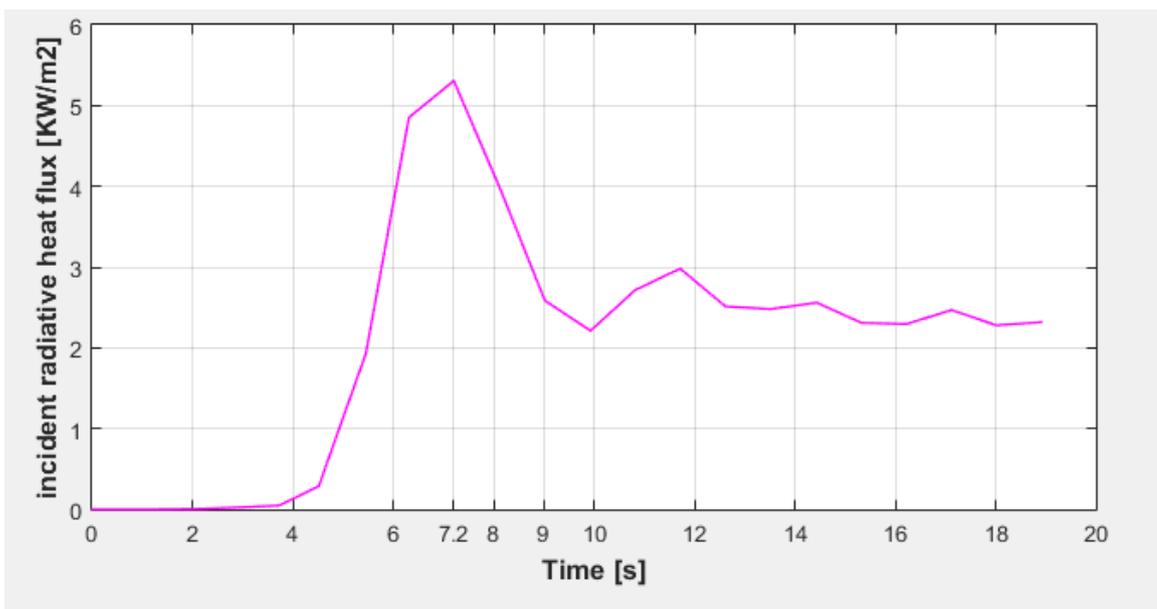


Figure 4.12.b. Evolution du flux radiatif incident (bassin d'eau)

Le graphe (figure 4.12) représente l'évolution du flux radiatif incident, au niveau de bassin d'eau, en fonction du temps (900s). la courbe constructeur part d'un point zéro ce que montre que la puissance du feu est stationnaire (la puissance du foyer est prise constante sur toute la durée de temps de simulation).

Pour le flux radiatif il augmente 0kw/m² jusqu'à 5 kW/m² la valeur maximale pendant $t=7.2$ s, cette valeur est importante pour le pompier et ça recommence à

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

diminuer jusqu'à ce que 2.5 kW/m² et enregistrée à t =10s Ici, il commence à diminuer progressivement.

✚ Confrontation des résultats :

On a calculé le flux radiatif à 15 min pour le bassin d'eau :

- Pour le modèle CFD :

$$\phi = 2,2521698 \text{ KW/m}^2$$

- Pour le modèle analytique :

$$\phi = 5.157449 \text{ KW/m}^2$$

et donc l'erreur :

$$\epsilon = \frac{|\phi_{CFD} - \phi_{M.A}|}{|\phi_{M.A}|} \times 100$$

$$\epsilon = -56\%$$

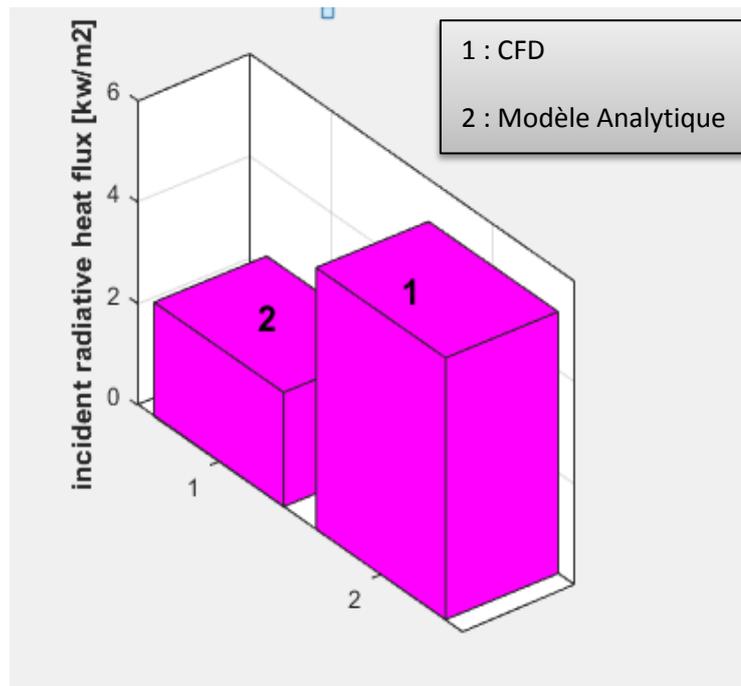


Figure 4.13. Histogramme clarifier le flux radiative entre le CFD et le modèle analytique (bassin d'eau).

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

D'après l'histogramme nous concluons qu'il existe une nette différence entre les résultats sur FDS et fortran une erreur relative de $\epsilon = 56\%$

✚ Cas 1 : calcul du flux radiatif sur le bac R120 :

La simulation sur FDS obtenir le flux au niveau de bac R120 est visible sur les graphes suivants :

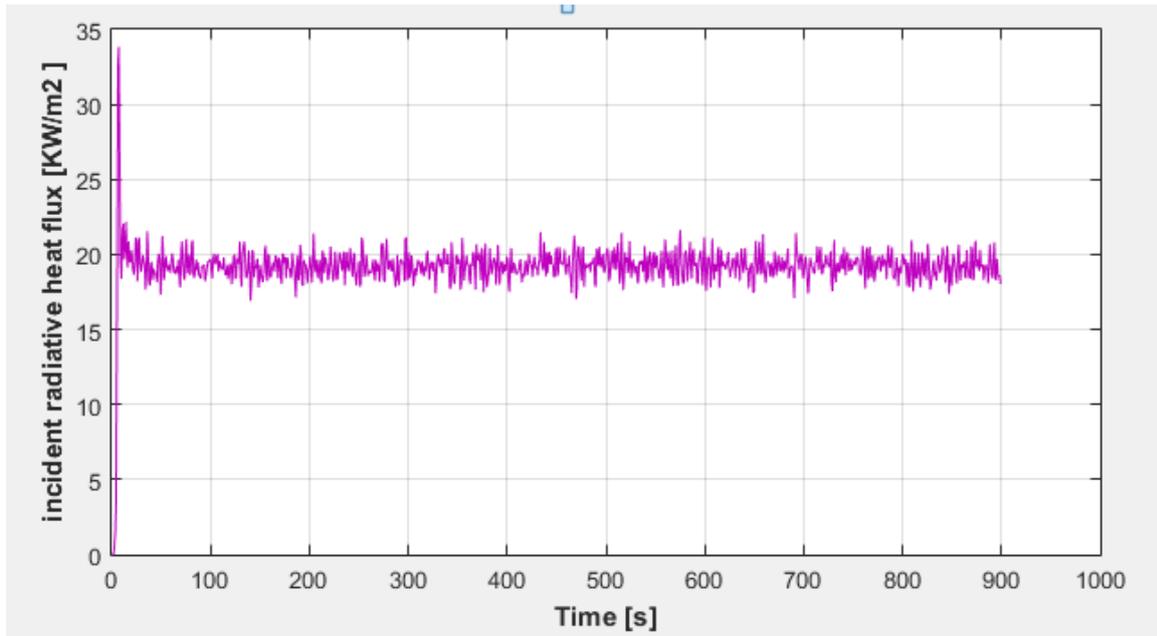


Figure 4.14.a. Évolution du flux radiatif incident (bac R120).

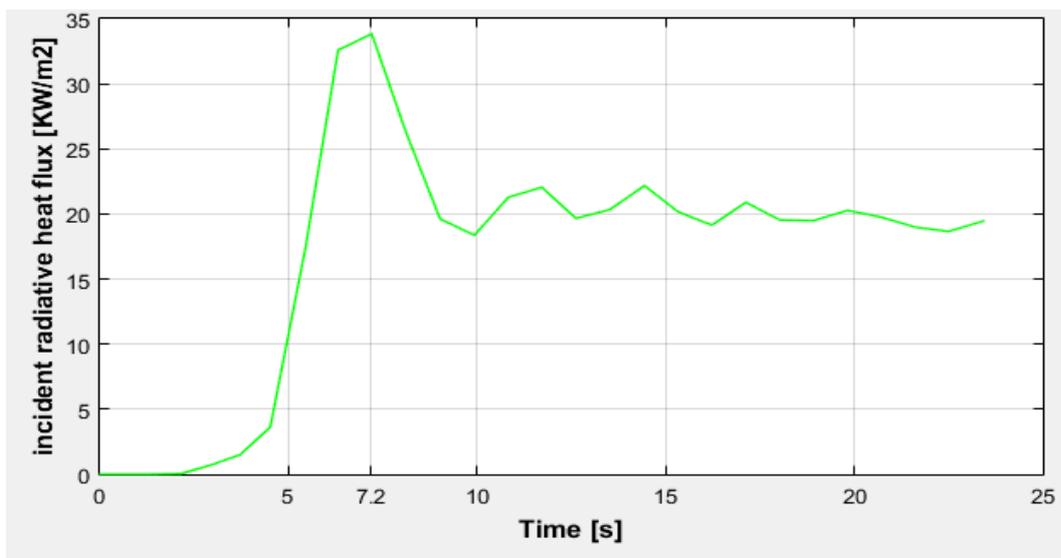


Figure 4.14.b. Évolution du flux radiatif incident (bac R120).

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

Sur le graphe précédent (figure 4.14), on montre l'évolution du flux radiatif incident au niveau de bac R120 en fonction du temps (temps physique est égal à 15 minutes).

Une augmentation plus rapide du flux radiatif à travers le bac R120 durant les 10 s premières secondes où il atteint le maximum 33.8 kW/m² mais à partir de cette valeur le flux va diminuer, jusqu'à 20 kW/m² à t=15s et après le flux radiatif va diminuer progressivement.

🚦 Confrontation des résultats :

Le flux radiatif a 15 min pour le bac R120 :

Pour le modèle CFD :

$$\phi = 18,114531 \text{ KW/m}^2$$

Pour le modèle analytique :

$$\phi = 10.269850 \text{ KW/m}^2$$

Et donc l'erreur :

$$\epsilon = 76\%$$

Dans les histogrammes suivants des flux radiative enter fds et fortran (bac R120), on peut observer que il y comme une erreur entre les deux programme.

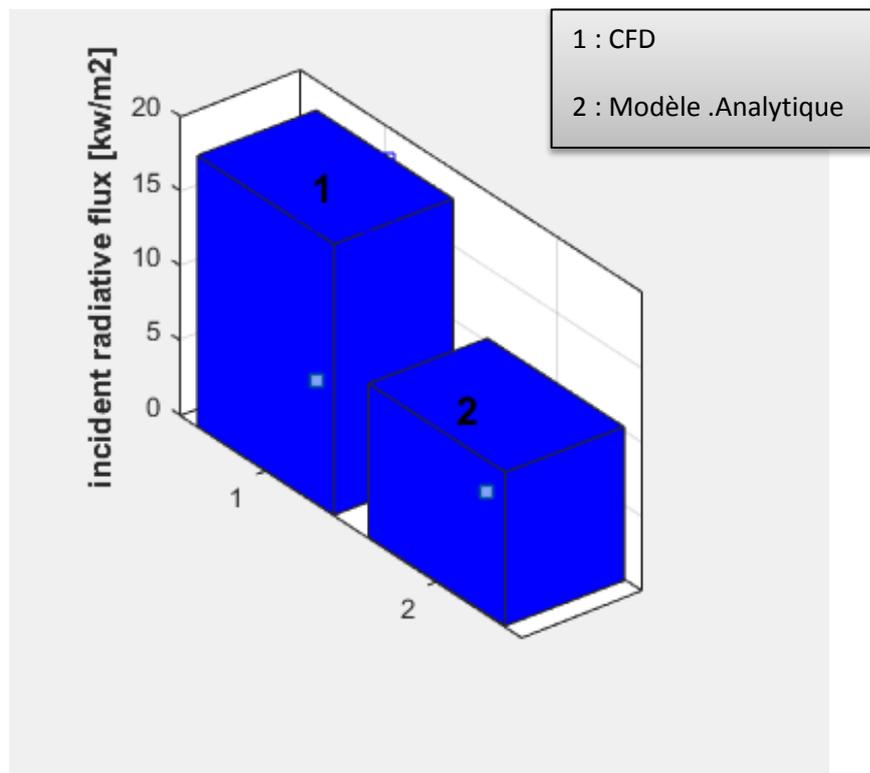


Figure 4.15. Histogramme clarifier le flux radiative enter le CFD et le modèle analytique (bac R120).

4.9. Distribution du flux thermique avec la distance d'effet :

Dans cette partie on a fait l'estimation du flux thermique, dégagé lors de l'incendie du bac R120 fuel (GO) de diamètre R=30m et de hauteur H=14m avec des distances réel pour chaque structure de center Naftal-Chiffa avec les formules IT-89 et RH=40%, on obtient le graphe suivant :

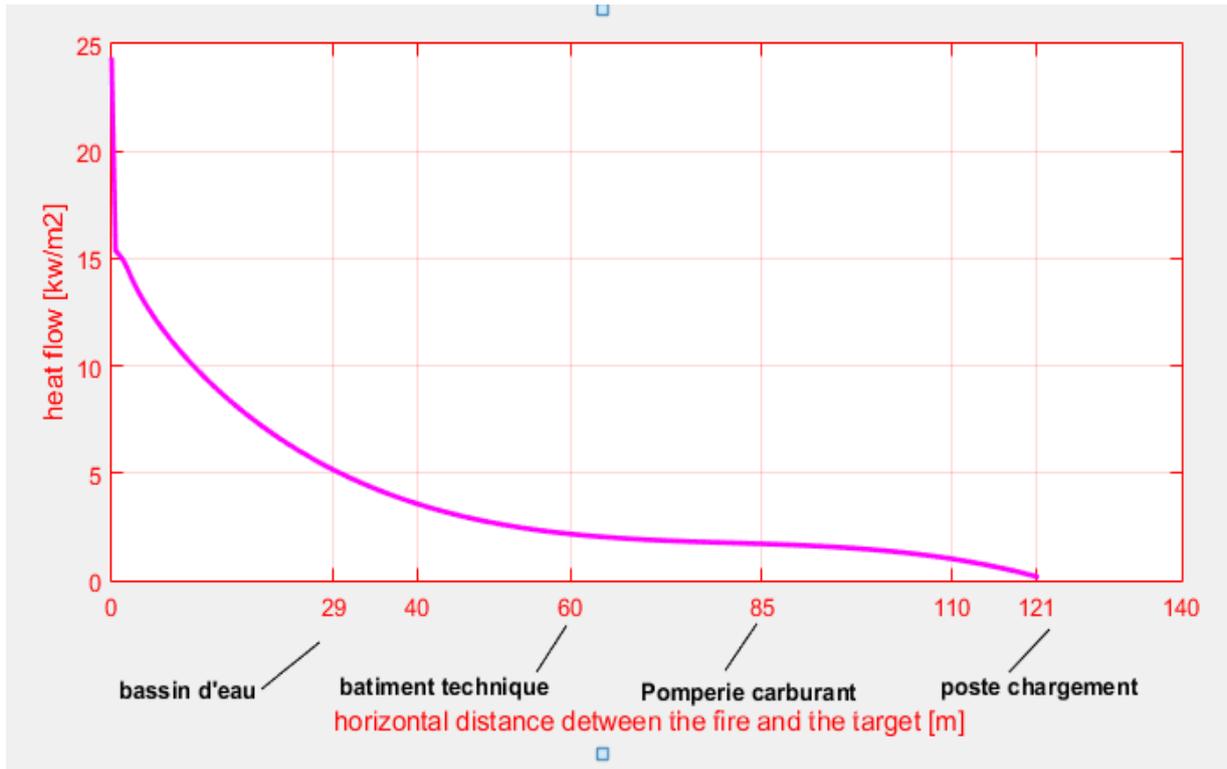


Figure 4.16. Flux thermique en fonction de distance de cible

La figure (4.16) représente le flux thermique de différent structuré d'un center carburant et d'après le graphe on :

Tableau4.6.Distances et le flux thermique obtenus sur FDS.

Structures	Distance [m]	Flux thermique [KW/m ²]
Bassin d'eau	29	5.2
Bâtiment technique	60	2.2
Pomperie carburant	85	1.7
Poste chargement	121	0.180

Remarque :

Le tableau (4.6) présenté le flux thermique obtenus sur FDS pour les défèrent structures (distances), d'après les résultant nous pouvons dite que la distance

- $D = 29 \text{ m} = \mathbf{D5}$ la distance de sécurité pour pompier.
- $D = 45 \text{ m} = \mathbf{D3}$ la distance de sécurité pour l'homme.

4.10. Les distances sécurité par les formules d'IT-89

On distingue trois distances $D3=3\text{KW}/\text{m}^2$, $D5=5\text{KW}/\text{m}^2$, $D8=8\text{KW}/\text{m}^2$ en utilisant les formules de IT-89 pour chaque structures :

Avec $K = 26.58 \text{ m}$

$$\mathbf{D3 = 3.8K^{0.85} (1 - 3 \cdot 10^{-3} K^{0.85}) = 58.742 \text{ m}}$$

$$\mathbf{D5 = 2.8K^{0.85} (1 - 2 \cdot 2.10^{-3} K^{0.85}) = 43.875 \text{ m}}$$

$$\mathbf{D8 = 2.25K^{0.85} (1 - 1 \cdot 8.10^{-3} K^{0.85}) = 35.494 \text{ m}}$$

Chapitre 04 : Etude de cas résultats et discussions

CONCLUSION

Le chapitre commence par la présentation de centre de carburant NAFTAL- CHIFFA.

On a modélisé le centre sur logiciel FDS avec les réelles distances, que nous avons mesuré

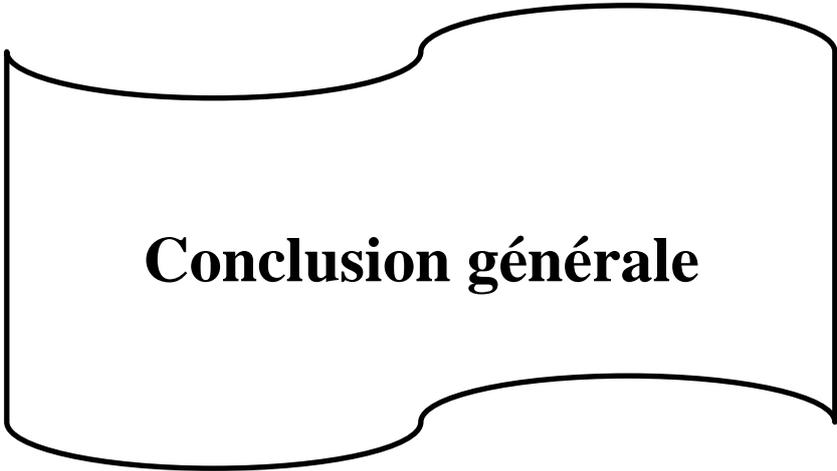
De la réalité, ont changé la forme de bac de cylindrique à la cubique, On a augmenté les grilles de maillage (problème technique).

Ensuite, nous l'avons appliqué comme exemple d'incendie au niveau de bac R100 fioul (GO) où l'on met des capteurs au niveau de bac R120 et bassin d'eau. Le calcul par FDS a permis d'obtenir les résultats suivants :

Le calcul de distances de sécurité par les formules de IT-89 et grand par rapport les distances obtenus sur le code FDS.

Le flux radiatif au niveau de bac R120 il est important de prendre en compte que cela peut provoquer une explosion inattendue.

Et on aussi comparer cette résultat avec résultat thermique ce qui a montré une différence significative.



Conclusion générale

Conclusion

Conclusion Générale

Ce mémoire de master s'est intéressé à l'analyse des phénomènes de propagation du feu de réservoir de stockage de carburant. Pour mener à bien cette analyse, on a été décidé d'utiliser un code de calcul dédié à la simulation incendie, où nous avons pris comme cas test dépôt carburant NAFTAL-CHIFFA. Ce mémoire comprend à la fois une partie numérique et thermique.

dans le cas numérique, en utilisant un outil de simulation numérique à source libre, c'est le code FDS-v5.5.3 qui utilise le concept de simulation à grande échelle de turbulence LES (Large Eddy Simulation).

La simulation de l'incendie à l'aide du code « FDS » nous a permis par achever la modélisation et la simulation du flux radiatif dans les conditions ambiantes.

Cette étude démontre que le code FDS constitue un outil adéquat pour simuler les effets de la boule de feu provoquée par feu de bacs.

Donc d'après cette étude on a affirmé que les logiciels CFD (Computational Fluid Dynamics) étudié les écoulements de fluide à partir de la diffusion et la turbulence en fonction de temps par contre la méthode analytique, il donne des résultats basées sur des relations thermique.

Bibliographie :

[1] : **.B.SAMBOUNI** : Thèse doctorat : « Etude numérique et expérimentale sur les risques d'inflammation de gaz imbrulés au cours d'un incendie en milieu sous – ventilé ». Ecole nationale Supérieure de Mécanique et D'arotechnique

[2] : **H. Douadi** , mémoire Master en option énergétique. « Prédiction des flux thermiques incidents sur le corps d'un sapeur –pompiers ». Université Hassiba Benbouali- Chlef ,2018.

[3] : **Longou& Boughezala**, mémoire Master en option énergétique. « Contribution à la modélisation des effets thermiques lors d'un incendie en feu de nappe cas de la station naftal-chiffa »université Saad Dahlab de Blida 1.

[4] : **Y .Khouaja** : mémoire master en Management intégré : Qualité, Sécurité et Environnement, « Evaluation des risques d'un stockage d'hydrocarbures : Dépôt d'hydrocarbures liquide SINDP » Mémoire de master, Université Virtuelle de Tunis 2017.

[5] : Plan interne d'intervention NAFTAL-CHIFF, Aout 2011.

[6] : S.JOLLE ; Formation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs- Modélisation de feu industriels ; Rapport d'étude, Réf : DRA-14-141478-03176A .

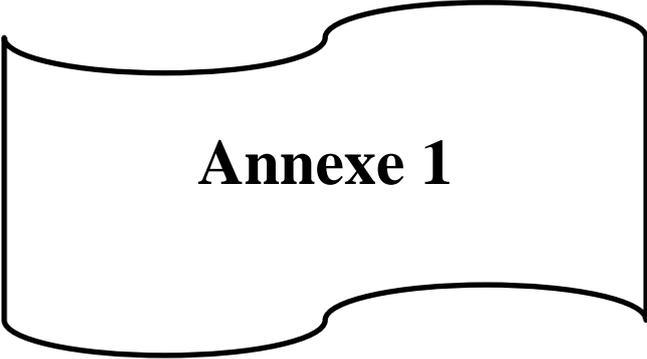
[7]: K. Boujemla, A .Kerbaa, mémoire de master « simulation des flammes de diffusion turbulentes en utilisant le code FDS » en propulsion, université de Blida 1, 2019.

[8] : Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt,2000

[9]: M. Kevin, J. Craig Weinschenk, K.Overholt. January 18, 2017, Fire Dynamics Simulator, User's Guide, Sixth Edition. NIST Special Publication 1019.

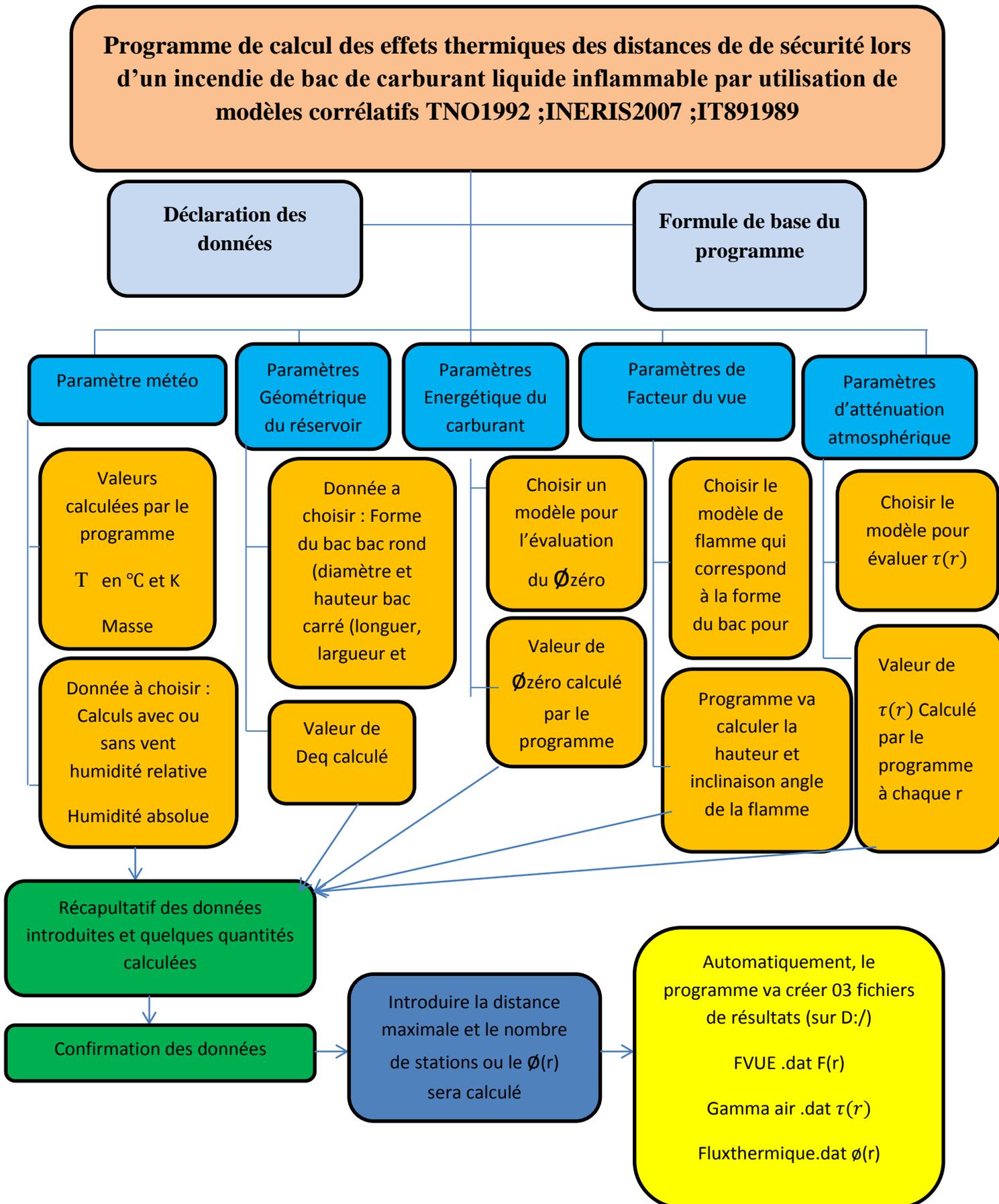
[10] : Site web de l'entreprise Naftal, www.naftal.dz (consulté le 27 juin 2021).

[11] : S. Desanghere, Détermination d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Rouen, 26 septembre 2006.



Annexe 1

1. Organigramme schématique des étapes de programmation :



2. Programme source :

```
c UNIVERSITE SAAD DAHLAB de Blida 1
c NAFTAL CHIFFA Unité ??
c ELORABI Moussa ---- Naftal, Chiffa
c Sefrani Nesrine & Aguib Roumaissa| ---- USD Blida 1
c BENAROUS Abdallah ----- USD Blida 1
c
c *****
c Programme de calcul des effets thermiques
c et des distances de sécurité
c lors d'un incendie de bac de carburant liquide inflammable
c par utilisation de modèles corrélatifs
c TNO 1992 ; INERIS 2007; IT89 1989
c *****
c Version du programme 3.0 (Avril 2020): Distance Flamme-Cible variable + Fichiers de sortie (FVue,TransAtm,Fi)
c *****
c Données à renseigner
c *****
c 1. Météo:
c *****
c Iwind=0 Calculs SANS effets du VENT
c Iwind=1 Calculs AVEC effets du VENT
c
c Uw :Vitesse du vent: 0 m/s; 1 m/s; .....5 m/s
c calculs UD: direction du vent non incluse !!
c
c RH: Humidité relative en % : 40%; 70%; 100%
c TairC en °C, Pair en Pascal, Muair en kg/m/s
c Muair : prévoir relation de Shuterland
c AH: Humidité absolue (Modèle de Lannoy: 6g/Kg; 8g/Kg; 18g/Kg
c TvapEau Temperature de la vapeur d'eau dans l'air = TairC
c
c *****
c 2. Type de carburant HC
c *****
c Ifuel=0 Essence normale / Ifuel=1 Essence super / Ifuel=2 Gasoil
c FR: Fraction radiative (0.1 à 0.4)
c DHC: chaleur de combustion en J/kg
c DHC=Pci Pouvoir calorifique inférieur
c DHC=43325000 Essence Normale C7H16 (100 g/mol)
c DHC=42900000 Essence Super
c DHC=42850000 Kérosène C10H22 (142 g/mol)
c DHC=41700000 Gasoil(GO) C7.25H13 ( 100 g/mol)
c
c
c MdotHC: débit de combustion surfacique (55 E-03 kg/s/m2 pour ESS)
c RhovapHC: masse volumique du carburant vapeur à la température d'ébullition kg/m3 = 2.56 Kg/m3 pour ESS
c Prévoir un calcul parfait pour RhovapHC, en se donnant Tebullition
c Tebul ESS Normale = 405.5 K [363 à 453]
c Tebul ESS Super = 410 K [363 à 453]
c Tebul GO = 506 K [473 à 633]
c RhovapHC: masse volumique ESS Super à la température d'ébullition= 2.56 Kg/m3 pour ESS
c RhovapHC: masse volumique ESS Super la température d'ébullition = 3.0 Kg/m3
c RhovapHC: masse volumique GO à la température d'ébullition= 2.40 Kg/m3
c
c *****
c 3. Type de bac (pool) /cuvette de carburant
c *****
c Ipool= 0 pour un bac cylindrique; Dpool
c Ipool= 1 pour un bac rectangulaire; Longpool,Largpool
c Hpool: hauteur du pool
c *****
c Real MdotHC, Muair, Longpool, Largpool, Lflame, Kssi, Kssideg
c Real M, GamaAtm, FI, Kpool
c double precision FvueM
c character Answer
c
c *****
c DONNEES STANDARD METEO
c DATA TairC,Pair,Rair/25,101325,287/
c DATA Pi,G/3,1415,9,81/
c *****
c DONNEES STANDARD CARBURANT (ESS pour l'instant !)
c DATA FR,DHC,MdotHC,RhovapHC /0.1,41700000,0.055,2.56/
c *****
c 1. Calculs Météo pour l'air (Rho, Mu, RH, AH)
c *****B*****
c
c TairK=TairC+273.15
c RhoAir=Pair/(Rair*TairK)
c Aair=1.9E-5
c Bair=(TairK/273.15)**(1.5)
c Cair=(383.55)/(TairK+110.4)
c
c Formule de Shuterland
c MuAir=Aair*Bair*Cair
c write(*,*) 'TairC,TairK'
c write(*,*) TairC,TairK
c pause
```

```

write(*,*) 'RhoAir,MuAir'
write(*,*) RhoAir,MuAir
pause
10 write(*,*) '*****Calcul avec ou sans vent*****'
write(*,*) '0: Sans effets du vent'
write(*,*) '1: Avec effets du vent'
Read(*,*) Iwind
If(Iwind.eq.1) then
  write(*,*) 'Entrer la vitesse du vent en m/s'
  read(*,*) Uwind
endif
pause
write(*,*) '*****Renseigner humidité relative Air *****'
write(*,*) '0: valeur a renseigner'
write(*,*) '1: valeur standard 40%'
write(*,*) '2: valeur standard 70%'
write(*,*) '3: valeur standard 100%'
Read(*,*) IRhumidity
If(IRhumidity.eq.0) then
  write(*,*) 'Entrer RH en %'
  read(*,*) RH
endif
If(IRhumidity.eq.1) then
  RH=0.4
endif
If(IRhumidity.eq.2) then
  RH=0.7
endif
If(IRhumidity.eq.3) then
  RH=1.0
endif
c Humidité absolue uniquement pour le modèle de Lannoy
write(*,*) '*****Renseigner humidité absolue Air *****'
write(*,*) '0: valeur a renseigner'
write(*,*) '1: valeur standard 6g/Kg'
write(*,*) '2: valeur standard 8g/Kg'
write(*,*) '3: valeur standard 18g/Kg'
Read(*,*) IAhumidity
If(IAhumidity.eq.0) then
  write(*,*) 'Entrer AH en %'
  read(*,*) AH
endif
If(IAhumidity.eq.1) then
  AH=0.006

```

```

endif
If(IAhumidity.eq.2) then
  AH=0.008
endif
If(IAhumidity.eq.3) then
  AH=0.018
endif
c write(*,*) 'RH,AH'
c write(*,*) RH,AH
c
c *****
c 2. Calculs pour le bac /cuvette de carburant (Deq)
c *****
write(*,*) '***Renseigner forme du Pool/cuvette de carburant***'
write(*,*) '0: Pool Rond diametre Dpool'
write(*,*) '1: Pool rectangulaire Longpool,Largpool'
Read(*,*) Ipool
If(Ipool.eq.0) then
  write(*,*) 'Entrer le diametre du pool en metres'
  read(*,*) Dpool
  write(*,*) 'Entrer la hauteur du pool en metres'
  read(*,*) Hpool
  Deq=Dpool
  Spool=Pi*(Dpool**2)/4.0
  Kpool=sqrt(Spool)
else
  write(*,*) 'Entrer longueur , largeur du pool en metres'
  read(*,*) Longpool,Largpool
  Deq=2*Longpool*Largpool/(Longpool+Largpool)
  write(*,*) 'Entrer la hauteur du pool en metres'
  read(*,*) Hpool
  Spool=Longpool*Largpool
  Kpool=sqrt(Spool)
endif
c write(*,*) 'Deq=',Deq
c write(*,*) 'Hpool=',Hpool
pause
c *****
c 3. Calculs pour la flamme (lflamme, angle inclinaison Kssi)

```

```

c 3. Calculs pour la flamme (Lflamme, angle inclinaison Kssi)
c *****
If(Uwind.le.1.0) Then
af=42*Deg
bf=MdotHC/(RhoAir*sqrt(Deg*G))
bf=bf**(0.61)
Lflame=af*bf
c write(*,*) ' MdotHC af,bf'
c write(*,*) MdotHC,af,bf
c pause
else
af=55*Deg
bf=MdotHC/(RhoAir*sqrt(Deg*G))
bf=bf**(0.67)
df=(MdotHC*G*Deg)/RhoAir
df=df**(1./3.)
ustar=uwind/df
Lflame=af*bf*(ustar**(-0.21))
endif

c write(*,*) 'Longueur de flamme=',Lflame
c Calcul angle inclinaison de la flamme
If(Iwind.eq.1) then
write(*,*) 'Calcul inclinaison flamme'
Fro=(uwind**2)/(Deg*g)
Re=(Deg*uwind*RhoAir)/(MuAir)
beta=(RhovapHC/RhoAir)
Alpha=(3.3)*(Fro**(0.8))*(Re**(0.07))*(beta**(-0.6))
delta=4.0+(1.0/Alpha)**(2.0)
sinkssi=sqrt(delta)-(1.0/Alpha)
sinkssi=sinkssi/2.0
c write(*,*) 'sinus KSSI=',sinkssi
Kssi=Asin(sinkssi)
Kssideg=(Kssi*180)/Pi
c write(*,*) 'Flamme ecarte sur la verticale de',Kssideg,'degre'
endif
pause
c *****
c 4. Calculs pour le carburant (Fizero)
c *****
c Densité de Puissance thermique en sortie de bac FIZERO pour divers modèles

```

```

c Densité de Puissance thermique en sortie de bac FIZERO pour divers modèles
write(*,*) '*****Evaluation pouvoir emissif FIZERO *****'
write(*,*) '0: valeur a renseigner en Watts/m2'
write(*,*) '1: Modele TNO 1992'
write(*,*) '2: Modele Mudan & Croce 1995'
write(*,*) '3: Modele IT 1989'
Read(*,*) Inodel
If(Inodel.eq.0) then
write(*,*) 'Entrer Pouvoir emissif en Watts par metre2'
read(*,*) FIZERO
endif
If(Inodel.eq.3) then
FIZERO=29.72
c write(*,*) 'FIZERO=', FIZERO, 'Kilowatts/m2'
endif
If(Inodel.eq.2) then
FIZERO=20000+120000*(exp(-0.12*Deg))
c write(*,*) 'FIZERO=', FIZERO/1000, 'Kilowatts/m2'
endif
If(Inodel.eq.1) then
c FISOOT supposé = 20 kW/m2 lorsque Tsoot = 800 K
FISOOT=20000
c Eta fraction du flux absorbée par les fumées noires [0.8 à 0.9]
Eta =0.8
c FIMAX pouvoir emissif du HC
FIMAX=DHC/(1.0+4*(Lflame/Deg))
FIMAX=FIMAX*MdotHC*FR
c write(*,*) 'Fimax=', FIMAX, 'Watts/m2'
FIZERO=FIMAX*(1.0-Eta)+Eta*FISOOT
c write(*,*) 'FIZERO=', FIZERO/1000, 'Kilowatts/m2'
endif
c *****
c 5. Calculs Facteur de vue(FvueV,FvueH,FvueM)
c *****
c Le facteur de vue est fonction du modèle de flamme
c 0: flamme cylindrique
c 1: flamme plane (mur de flammes)
write(*,*) '*****Evaluation facteur de vue FvueM *****'
write(*,*) '0: Modele flamme cylindrique'
write(*,*) '1: Modele flamme plane ou mur de flammes'
write(*,*) '2: Modele flamme IT89'

```

```

write(**,*) '2: Modele flamme IT89'
write(**,*) '3: Modele correlatif flamme cylindrique'
write(**,*) '4: Modele correlatif flamme plane ou mur de flammes'
read(**,*) Iflame
OPEN(12,File='F:\NFVUE.dat')
C *****
C 6. Calculs Facteur de transmittivité atmosphérique(GamaAtm)
C *****
write(**,*) '****Evaluation facteur transmittivité atmosphe***'
write(**,*) '0: Modele de Bruztowski & Sommer'
write(**,*) '1: Modele de Bagster'
write(**,*) '2: Modele de Lannoy 1984'
read(**,*) IHumidity
OPEN(13,File='F:\GammaAir.dat')
OPEN(14,File='F:\FLUXTHERMIQUE.dat')
C *****
C RECAPITULATIF DES MODELES ET PARAMETRES
C *****
write(**,*) '*****'
write(**,*) 'RECAPITULATIF DES MODELES ET PARAMETRES'
write(**,*) '*****'
pause
write(**,*) '**** Conditions meteo utilisees ****'
write(**,*) 'Temperature Air 'C', TairC
write(**,*) 'Masse volumique Air Kg/m3', RhoAir
write(**,*) 'Humidite relative en %', RH*100
write(**,*) 'Humidite absolue en g/kg air sec', AH*1000
write(**,*) 'Vent avec vitesse en Km/h', uwind*(3.6)
pause
write(**,*) '****Conditions sur le bac/cuvette de carburant****'
IF (Ipool.eq.0) then
write(**,*) 'Bac de flamme rond'
write(**,*) 'diametre =', Dpool,'metres'
write(**,*) 'Hauteur =', Hpool,'metres'
write(**,*) 'Diametre equivalent=', Deq,'metres'
ELSE
write(**,*) 'Bac de flamme rectangulaire'
write(**,*) 'Longueur =', Longpool,'metres'

```

```

write(**,*) 'Longueur =', Longpool,'metres'
write(**,*) 'Largeur =', Largpool,'metres'
write(**,*) 'Hauteur =', Hpool,'metres'
write(**,*) 'Diametre equivalent=', Deq,'metres'
ENDIF
pause
write(**,*) '****Conditions sur la geometrie de la flamme****'
write(**,*) 'Hauteur de flamme =', Lflame,'metres'
write(**,*) 'Inclinaison /verticale=', Kssideg,'degre '
pause
write(**,*) '****Caractéristiques du carburant****'
write(**,*) 'Fraction radiative (TNO)=' ,FR
write(**,*) 'Chaleur de combustion(TNO) =', DHC,'Joule/Kg'
write(**,*) 'Débit de combustion =', MdotHC*1000,'g/seconde/m2'
write(**,*) 'Masse volumique vapeur carburant =', RhovapHC,'Kg/m3'
write(**,*) '% absorbe par les fummes noires =',Eta
IF (Imodel.eq.1) then
write(**,*) 'Pouvoir emissif calcule par: Modele TNO 1992'
ENDIF
IF (Imodel.eq.2) then
write(**,*) 'Pouvoir emissif calcule par: Modele Mudan & Croce 1995'
ENDIF
IF (Imodel.eq.3) then
write(**,*) 'Pouvoir emissif calcule par: Modele IT 1989'
ENDIF
write(**,*) 'Pouvoir emissif=', FIZERO/1000,'Kilowatts/m2'
pause
IF (If Flame.eq.0) then
write(**,*) 'Facteur vue: Modele flamme cylindrique'
ENDIF
IF (If Flame.eq.1) then
write(**,*) 'Facteur vue: Modele flamme plane'
ENDIF
IF (If Flame.eq.2) then
write(**,*) 'Facteur vue: Modele flamme IT89'
ENDIF
IF (If Flame.eq.4) then
write(**,*) 'Facteur vue: Modele correlatif flamme plane'

```

```

ENDIF
IF(Iflame.eq.3) then
write(*,*)'Facteur vue: Modele correlatif flamme cylindrique'
ENDIF

pause

IF (IHumidity.eq.0) then
write(*,*)'Attenu Atmospher calcule par:Modele Bruztowski Sommer'
ENDIF

IF (IHumidity.eq.1) then
write(*,*)'Attenu Atmospher calcule par:Modele Bagster'
ENDIF

IF (IHumidity.eq.2) then
write(*,*)'Attenu Atmospher calcule par:Modele Lannoy'
ENDIF
pause
write(*,*)'Donnees adequates ?'
write(*,*)'Y: Continuer les calculs ?'
write(*,*)'N: Revenir pour modification des donnees'
read(*,*) Answer
IF(Answer.eq.'N') Goto 10

c
c   Distance front-cible max = Rmax
c   Cible à rtarg=0.0 m
c   write(*,*)'Entrer distance max flamme-cible en metre'
c   read(*,*)RMax
c   write(*,*)'Entrer nombre stations a considerer hors source'
c   read(*,*)NMax
c   Deltar=RMax/(NMax-1)
c   write(*,*)'le flux sera evalue chaque'.Deltar,'metre'
c   pause
c   rtarg=Deltar
c   inscription de la valeur de FIZERO à la source
c   write(14,*) rr.FIZERO/1000
c   Debut du bouclage sur les distances
DO WHILE (rtarg.LE.RMax)
FvueV=0.0
FvueH=0.0

```

```

FvueH=0.0
FvueV=0.0
GamaAtm=0.0
IF(iflame.eq.0) then
  If(uwind.le.1) Then
    R=Deq/2.
    M=Lflame/R
    X=(rtarg+R)/R
    A=((X+1)**2)+M**2
    B=((X-1)**2)+M**2
    a1=M/(sqrt(X**2-1))
    a2=A-2*X
    a3=sqrt(A*B)
    a4=(A*(X-1))/(B*(X+1))
    a4=sqrt(a4)
    a5=sqrt((X-1)/(X+1))
    a6=(sqrt(X+1))/(sqrt(X-1))
    a7=(X**2)-1.0+(Lflame**2)
    FvueV=((a2/a3)*atan(a4))-atan(a5)
    FvueV=FvueV*M
    FvueV=FvueV+atan(a1)
    FvueV=FvueV/(Pi*X)
    FvueH=(atan(a6))-(a7/a3)*atan(a4)
    FvueH=FvueH/(Pi)
    FvueH=FvueH/(Pi*X)
    FvueH donne des valeurs trop élevées !! formule à re-vérifier
    FvueM=sqrt(FvueV**2+FvueH**2)
  else
    Cas avec vent > 1m/s
    No relation is available
  endif
  write(12,*) rtarg,FvueM
ENDIF
IF(iflame.eq.1) then
  cas de mur de flammes sans vent
  b=Deq
  X=Lflame/rtarg
  Y=b/rtarg
  A=1.0/((X**2)+(Y**2))
  a1=X/(sqrt(1.0+X**2))
  a2=Y/(sqrt(1.0+X**2))

```

```

aw2=0.000229604
aw3=-7.78361E-7
FvueM=aw0+aw1*(rtarg)+aw2*(rtarg**2)+aw3*(rtarg**3)
c correlation 2: Loi en puissance
c FvueM=(9.23319)*(rtarg**(-1.02367))
endif
write(12,*) rtarg,FvueM
ENDIF
IF(iffame.eq.4) then
c cas de flammes planes sans ou avec vent
c If(Iwind.eq.0) Then
correlation 1: Polynomiale 3eme degré
aw0=0.394967
aw1=-0.00650453
aw2=2.81469E-5
aw3=5.6915E-8
FvueM=aw0+aw1*(rtarg)+aw2*(rtarg**2)+aw3*(rtarg**3)
c correlation 2: Polynomiale 2eme degré
c aw0=0.39985
c aw1=-0.00693765
c aw2=3.75379E-5
FvueM=aw0+aw1*(rtarg)+aw2*(rtarg**2)

else
aw0=0.574667
aw1=-0.00421795
aw2=-5.61771E-5
aw3=5.01165E-7
FvueM=aw0+aw1*(rtarg)+aw2*(rtarg**2)+aw3*(rtarg**3)
c correlation 2: Loi Linéaire
c aw0=0.574667
c aw1=-0.00421795
c FvueM=aw0+aw1*(rtarg)
endif
write(12,*) rtarg,FvueM
ENDIF

if (IHumidity.eq.0) Then
ah=(100./rtarg)
bh=(30.5/RH) on va utiliser directement le %

```

```

c bh=(30.5/RH) on va utiliser directement le %
bh=(30.5/(RH*100))
GamaAtm=(0.79)*(ah**(1./16.))*(bh**(1./16.))
c write(*,*) 'Gamma Bz & Sommer=',GamaAtm
endif
if (IHumidity.eq.1) Then
c Tvapeur H2O = TairK
c on va utiliser directement le %
ah=(RH*TairK*rtarg)
ah=(100*RH*TairK*rtarg)
GamaAtm=(2.02)*(ah**(-0.09))
c write(*,*) 'Gamma Bagster=',GamaAtm
endif
if (IHumidity.eq.2) Then
ah=-0.0002*AH*rtarg
GamaAtm=0.33+(0.67)*exp(ah)
c write(*,*) 'Gamma Lannoy=',GamaAtm
endif
c Clipping to 1 !
if(GamaAtm.GT.1) GamaAtm=1.0
write(13,*) rtarg,GamaAtm

c *****
c 7. Calculs du flux thermique (FI en Watts/m2) recenti à Xmax mètres du bac
c *****
FI=FIZERO*GamaAtm*FvueM
write(*,*) rtarg,'a metres', 'Flux en Kilowatts/m2=',FI/1000
write(14,*) rtarg,FI/1000
rtarg=rtarg+Deltar
ENDDO
stop
end

```