



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielles
Spécialité : Sécurité prévention et intervention

Thème

**Evaluation des performances de la protection passive
contre l'incendie dans une installation industrielle**

Présenté par :

LARIBI Mohamed Imed Eddine et Medjahed Sidahmed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr. TALBI Z.	MCB	IMSI, Université d'Oran 2	Encadreur
Dr. Bouhafis M.	MCA	IMSI, Université d'Oran 2	Président
Dr. Machken A.	MAA	IMSI, Université d'Oran 2	Examineur

Année 2020/2021

REMERCIEMENTS

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

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

***Mme Talbi.zahera** notre encadrante de mémoire de fin d'étude, et d'avoir accepté de nous encadrer et pour l'intéressant sujet qu'elle nous avait proposer, de nous orienter et nous appuyer à chaque étape.*

Nos profonds remerciements vont aux membres de Jury

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

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

*M.LARIBI
S.MDJAHEB*

Dédicace

Je dédie ce projet :

*A ma chère mère,
A mon cher père,*

*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 mon frère Chems Eddine

A mes chères sœurs chahinez, fatima, imene,

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

.

*A mes chers amis Pour leurs aides et supports dans les moments
difficiles.*

*A toute ma famille,
A tous mes autres ami(e)s,*

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

DEDICACES

A ma très chère mère Djamila

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

A mon très cher père Mohamed

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

A mon très cher entraîneur erroune mohamed Pour leur aide et support dans les moments difficiles

A mes chers amis Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime.

Merci

Mdjahed Sidahmed

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

CHAPITRE 1 : Le comportement au feu de matériaux de construction

1. Introduction.....	01
1.1.Terminologie feu et incendie.....	03
1.2.Déroulement d'un incendie.....	03
1.2.1. Triangle du feu	03
1.2.2. Développement d'un incendie	04
1.3. Modélisation d'un incendie	05
1.3.1. Feu normalisé ISO834.....	05
1.3.2. Feu hydrocarbure.....	06
1.3.3. Feu extérieur	07
1.3.4. Feu paramétrique	08
1.3.5. Feu réel	08
1.4. Prévention et protection.....	09
1.5. Actions	10
1.5.1. Action mécaniques.....	10
1.5.2. Action thermiques.....	11
1.6. Comportement des matériaux à température élevée	12
1.6.1. Béton	12
1.6.1.1. Résistance Béton ordinaire.....	12
1.6.1.2. Déformation du béton.....	12
1.6.1.3. Dilatation thermique du béton.....	14
1.6.1.4. Chaleur spécifique du béton.....	15
1.6.1.5. Conductivité thermique du béton.....	16
1.6.2. Acier	17
1.6.2.1. Résistance de l'acier	17
1.6.2.2. Déformation de l'acier.....	18
1.6.2.3. Dilatation thermique de l'acier.....	18
1.6.2.4. Chaleur spécifique de l'acier.....	19
1.6.2.5. Conductivité thermique de l'acier.....	19

1.7. Plastique.....	20
1.7.1. Comportement au feu des matières plastiques.....	20
1.7.2.1.Chaleur spécifique.....	21
1.7.2.2. Brûler en permanence.....	21
1.7.2.3. Brûlage instable.....	21
1.8. Bois	21
1.8.1.Structure du bois.....	21
1.8.2. Comportement au feu de bois.....	22
1.8.3. Résistance au feu d'une structure en bois.....	22

CHAPITRE 02 : Les matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie

1. Introduction.....	24
2. Matériaux de protection passive contre l'incendie.....	25
2.1. Matériaux d'isolation thermique.....	25
2.1.1. Matériaux isolants fibreux.....	25
2.1.2. Matériaux isolants cellulaires inorganiques	26
2.2. Propriétés des matériaux de la protection passive.....	26
2.3. Matériaux d'isolation thermique.....	27
2.3.1.Béton.....	27
2.3.2. Gypse.....	28
2.4. Liants alcalis activés.....	28
2.5. Fibres de propylènes.....	31
2.6. Matériaux intumescents.....	31
2.6 .1. Matériaux intumescents à couche mince.....	32
2.6. 2. Matériaux intumescents à couche épaisse.....	32
2.7. Matériaux ablatifs.....	33
2.8. Test de la protection passive.....	34,

CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION ET DE VISUALISATION

1. Introduction	35
-----------------------	----

1.1. Présentation du code FDS.....	35
1.2. Historique des versions.....	35
1.3 Les changements dans FDS 6.....	36
a) Espèces et combustion.....	36
b) Fonctions de contrôle.....	36
c) Appareils et sortie.....	36
1.4. Modèle développeurs.....	36
1.5 Utilisations prévues.....	37
1.6. Caractéristiques principales du code fds.....	37
1.7. Ressource en ligne et support utilisateur.....	38
1.8. Installation sur Windows.....	39
1.9. Exécution de séries FDS sous Windows.....	39
1.10. Structure de FDS.....	39
1.10.1 Structure de base d'un fichier fds.....	40
1.10.2. Paramètre dans le fichier d'entrée.....	40
1.10.3. Quantités De Sortie.....	42
2. SMOKEVIEW.....	45
2 .1 Description de base de SMOKEVIEW	45
2.2. Historique des versions.....	46
2.3. Modèle de développement.....	47
2.4. Aperçu.....	48
2.5. Exécution de SMOKEVIEW.....	48
3. PyroSim.....	49
3.1. Introduction.....	49
3.2. Télécharger et installer.....	50
3.3. Quelques suggestions de modélisation.....	50
3.4. FDS s'enclenche dans le maillage.....	51
3.5. Utilisation d'un exécutable FDS différent.....	51
3.6. Interface PYROSIM.....	52
CHAPITRE 4 : Partie pratique	
1. Introduction.....	55
2. Méthode de travail.....	55
2.1. Scénario d'incendie proposé.....	55

2.2. Simulation par le logiciel FDS.....	56
2.3. Application de la protection passive sur l'équipement.....	57
3. Résultat de la simulation	58
3.1. Sans protection passive.....	58
3.2. Avec protection passive.....	60
A-Avec Epoxy	60
B-Avec Fibre de verre	62
C-Avec verre cellulaire.....	63
3.3. Interprétation des résultats.....	64
4.Conclusion.....	65
CONCLUSION GENERALE.....	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Résumé

Dans notre société moderne, l'incendie reste un risque permanent dont il faut tenir compte lors de la construction ou de la rénovation de bâtiments. La protection passive contre l'incendie est une technique de défense qui ne nécessite aucune méthode d'activation pour empêcher la propagation du feu et la désintégration de structurelle. L'objectif de ce travail est d'utiliser le logiciel de simulation d'incendie FDS (Fire Dynamic Simulator) pour comparer les performances de plusieurs systèmes de protection passive dans l'industrie du raffinage du pétrole ou du gaz. La méthode commence par l'élaboration de scénarios d'incendie dans les raffineries de pétrole et de gaz. Ensuite, la simulation du logiciel FDS est appliquée à la scène d'incendie. Par la suite, plusieurs systèmes de protection passive PFP ont été appliqués et modélisés pour le scénario d'incendie proposé. Les résultats de la simulation FDS sont utilisés pour comparer les performances de divers systèmes PFP. Les meilleures performances sont attribuées à l'époxy et à la fibre de verre, car elles peuvent absorber le flux de chaleur causé par le feu, réduisant ainsi d'environ 50%. Cependant, par rapport à la température, le verre cellulaire présente de meilleures performances, réduisant la température des parois des équipements non protégés de 39%.

Mots clé : Incendie, FDS, Protection passive, Protection active, Simulation

Abstract

In our modern society, fire remains a permanent risk that must be taken into account when constructing or renovating buildings. Passive fire protection is a defence technique that requires no method of activation to prevent fire propagation and structural decay. The purpose of this work is to use the Fire Dynamic Simulator (FDS) fire simulation software to compare the performance of several passive protection systems in the oil or gas refining industry. The method begins with the development of fire scenarios at oil and gas refineries. Then, the simulation of the FDS software is applied to the fire scene. Subsequently, several passive protection systems were applied and modelled for the proposed fire scenario. The results of the FDS simulation are used to compare the performance of various PFP systems. The best performances are attributed to epoxy and fibreglass, as they can absorb the heat flow caused by fire, thus reducing by about 50%. However, compared to temperature, cellular glass has better performance, reducing the temperature of the walls of unprotected equipment by 39%.

Keys Words: Fire, FDS, Passive Protection, Active Protection , Simulation

ملخص

في مجتمعنا الحديث ، يظل الحريق خطرًا دائمًا يجب مراعاته عند تشييد المباني أو ترميمها. الحماية السلبية من الحرائق هي تقنية دفاعية لا تتطلب أي طريقة تنشيط لمنع انتشار الحريق والانحلال الهيكلي. الهدف من هذا العمل هو لمقارنة أداء العديد من أنظمة الحماية السلبية (FDS (Fire Dynamic Simulator) استخدام برنامج محاكاة الحريق في صناعة تكرير النفط أو الغاز. تبدأ الطريقة بتطوير سيناريوهات الحريق في مصافي النفط والغاز. بعد ذلك ، يتم تطبيق ونمذجة لسيناريو PFP على موقع الحريق. بعد ذلك ، تم تطبيق العديد من أنظمة الحماية السلبية FDS محاكاة برنامج المختلفة. يُعزى أفضل أداء إلى الإيبوكسي والألياف PFP لمقارنة أداء أنظمة FDS الحريق المقترح. تُستخدم نتائج محاكاة الزجاجية ، حيث يمكنهما امتصاص تدفق الحرارة الناتج عن الحريق ، مما يقلل بنحو 50%. ومع ذلك ، بالمقارنة مع درجة الحرارة ، يتمتع الزجاج الخلوي بأداء أفضل ، حيث يقلل درجة حرارة جدران المعدات غير المحمية بنسبة 39% .

الكلمات المفتاحية:حريق، FDS، الحماية السلبية، الحماية الايجابية، محاكاة .

Liste des figures

Figure 01 : Triangle du feu

Figure 02 : Phases de développement d'un incendie

Figure 03 : Courbe nominale du feu conventionne IISO834

Figure 04 : Courbe hydrocarbure du feu

Figure 05 : Exemple de feux paramétriques

Figure 06 : Exemple de feu naturel

Figure 07 : Evolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du type de granulats

Figure 08 : mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées

Figure 09 : Dilatation du béton en fonction de la température

Figure 10 : Chaleur spécifique du béton, $c_p(\theta)$ en fonction de la température pour 3 teneurs en eau

Figure 11 : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température

Figure 12 : Facteur $k_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures

Figure 13: La relation contrainte-déformation

Figure 14 : Dilatation thermique de l'acier

Figure 15 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température

Figure 16 : Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température

Figure 17 : Vue en coupe d'un troc d'arbre et des différentes parties qui le composent

Figure 18 : Verre cellulaire

Figure 19 : Température dans une paroi en béton exposée au feu

Figure 20 : Le procédé de la géo polymérisation

Figure 21 : Câbles avec des matériaux intumescents

Figure 22 : Essai au feu des matériaux.

Figure 23 : Les données principale de code FDS.

Figure 24 : Les fonctions de base de FDS

Figure 25 : le fichier d'entré de code FDS.

Figure 26 : l'exécution de fichier d'entré.

Figure 27 : visualisation des données et des résultats avec le PyroSim

Figure 28 : La disposition de la simulation du scénario étudié.

Figure 29 : (a) Résultat de la simulation du flux de chaleur sans protection passive (b) Résultat de la simulation de la température des parois après 80s.

Figure 30 : Résultat de la simulation des parois après application de l'époxy : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

Figure 31 : Résultat de la simulation des parois après application de la fibre de verre : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

Figure 32 : Résultat de la simulation des parois après application du verre cellulaire : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

Figure 33 : Température des parois en fonction du revêtement.

Figure 34 : Flux de chaleur en fonction du revêtement.

Liste des tableaux

Tableau 01 : Valeurs température- temps pour la courbe ISO834

Tableau 02 : Valeurs recommandées des facteurs ψ pour les bâtiments

Tableau 03 : Valeurs des paramètres $f_{c,\theta}, \epsilon_{c1,\theta}$ pour béton

Tableau 04 : L'effet de l'isolant thermique sur la température de parois exposées au feu

Tableau 05 : PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX D'ISOLATION DES BÂTIMENTS
(classiques et de pointe)

Tableau 06 : Les principales sources des aluminosilicates

Tableau 07 : Les caractéristiques principales de FDS.

Tableau 08 : Configuration du scénario sur Pyrosim.

Tableau 09 : Propriétés thermiques des matériaux de la protection passive.

Tableau 10 : L'efficacité du revêtement.

Liste des abréviations

Symbol	Definition
PFA	Protection Feu Active
PFP	Protection Feu Passive
BLEVE	BoilingLiquidExpandingVaporExplosion
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFD	Computationalfluidynamics
DNS	DirectNumericalSimulation
FDS	FireDynamicssimulator
HRR	Taux dedégagementdechaleur
HVAC	heating,ventilationandair-conditioning
LES	largeEddySimulation
NIST	National InstituteofStandardsandTechnology
SFPE	Sociétéprofessionnelle'd'ingénieriedeprotectioncontrelesincendies
VIT	TechnicalResearchCentredeFinlande
LES	Large eddysimulator
SMV	Smokeview

INTRODUCTION GENERALE

Dans notre société moderne, l'incendie reste un risque permanent qui doit être pris en compte lors de la construction ou la réhabilitation de bâtiments. Aussi, depuis de nombreuses années, des règlements de conception des structures soit en béton, aciers sont proposés aux concepteurs afin de limiter autant que possible ce risque.

La manière la plus efficace de lutter contre les effets d'un incendie est d'éviter son déclenchement ainsi que sa propagation. Il existe deux types de protection contre l'incendie, la protection active et la protection passive.

La Protection Feu Active (PFA) représente l'ensemble des systèmes de détection et extinction d'un incendie (détecteurs, sprinklers, extincteurs...). Elle a donc pour but d'avertir les usagers d'un espace du déclenchement d'un feu, et d'agir sur celui-ci via une intervention automatique ou humaine.

La Protection Feu Passive (PFP) joue quant à elle un rôle préventif. Elle représente l'ensemble des mesures constructives permettant à un ouvrage de résister à un incendie pendant un temps donné (fixé par la réglementation relative au type de bâtiment).

Ces mesures constructives sont destinées à stopper la progression des fumées, éviter la propagation des flammes et contenir les effets thermiques à la zone sinistrée. Ces mesures sont appelées passives car elles fonctionnent sans aucune intervention humaine ni apport extérieur d'énergie. Elles visent à permettre l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours, en confinant le plus longtemps possible le feu dans le seul espace où il s'est déclaré.

Ce travail est une contribution à l'étude de l'évaluation des performances de la protection passive contre l'incendie dans une installation industrielle. L'efficacité de la protection passive contre l'incendie est déterminée en fonction de sa capacité à protéger une structure contre l'élévation de température et la capacité à empêcher l'absorption de la charge thermique. Cette étude est présentée en quatre chapitres :

- Dans le **premier chapitre** nous avons abordé les différentes généralités sur le feu à savoir :

- Le déroulement de l'incendie base sur le triangle de feu dont les trois principaux acteurs sont : combustible, carburant, source d'inflammation.
- Développement de l'incendie qui est essentiellement caractérisé par une phase constante, une phase croissante et la généralisation du feu.
- Modélisation d'un incendie, elle a été spécifiée par l'Eurocode à savoir un feu ISO834.
- Comportement des matériaux soit le béton ou l'acier fonction de la température, plusieurs paramètres ont été considérés dans notre analyse selon les modèles spécifiés par l'Eurocode.
- Dans le **deuxième chapitre**, nous avons réalisé une synthèse bibliographique des différents travaux dans le domaine des sollicitations couplés thermo- mécanique pour différents types de matériaux et élément de structures. Quelques approches théoriques ont été appréhendé ainsi que les essais disponibles dans la littérature.
- Le **troisième chapitre** est consacré à la description des outils ; un pour la simulation numérique qui est **FDS** et deux autres pour la visualisation des résultats de cette simulation qui sont **Smokeview** et **PyroSim**
- Le **quatrième chapitre** est une évaluation par comparaison des performances de plusieurs systèmes de protection passive dans l'industrie de raffinerie de pétrole ou de gaz, en utilisant le logiciel de simulation d'incendie FDS (FireDynamic Simulator).

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

CHAPITRE 01

Le comportement au feu de matériaux de construction

1. Introduction

Chaque année des millions de personnes décèdent à cause du feu ; ainsi que des dégâts matériels considérables sont enregistrés. Les objectifs de la sécurité incendie [1] sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens, et plus précisément ils concernent :

- La sauvegarde des vies des occupants de l'immeuble.
- La protection des vies des services d'intervention.
- La protection de l'intégrité du bâtiment.
- La sauvegarde des bâtiments adjacents.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à :

- Réduire le développement de l'incendie.
- Eviter la propagation du feu.
- Assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité.
- Faciliter l'intervention du corps des sapeurs pompiers.

1.1. Terminologie feu et incendie

Un feu est une combustion. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie il devient une combustion incontrôlée. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un incendie [2].

1.2. Déroulement d'un incendie

1.2.1 Triangle du feu

Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies

Simultanément:

- **Présence d'un combustible** : matière inflammable solide: (bois, charbon, papier..).
Liquide:(essence, alcools...) ; gazeux: (butane, propane...).
- **Présence d'un carburant** : corps qui se combinant avec le combustible qui permet la combustion (oxygène, air, peroxyde...)
- **source d'inflammation** : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme étincelle décharge électrique...)

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle
Appelé triangle du feu [3].



Figure1:Triangle du feu [3]

1.2.2. Développement d'un incendie

Un incendie comporte une phase de développement où la température s'élève, puis une phase de décroissance où cette température diminue [6].

Les caractéristiques d'un incendie réel sont montrées sur la figure [2] et comportent :

➤ **Une phase couvante**

Feu couvant à très basse température avec une durée souvent difficile à estimer.

Cette phase n'est pas montrée sur la figure [1.2].

➤ **Une phase de croissance appelée « pré-flashover » (feu localisé)**

La durée de cette phase dépend principalement des caractéristiques du compartiment.

Le feu reste localisé jusqu'à une généralisation probable du feu.

➤ **Un « flashover » (feu généralisé)**

C'est un feu généralisé. Cette phase est généralement très courte.

➤ **Une phase de « post flashover »**

Cette phase correspond à un feu généralisé dont la durée dépend de la charge calorifique et de la ventilation.

➤ **Une phase décroissante**

Le feu commence à diminuer jusqu'à ce que tous les matériaux combustibles aient complètement brûlé.

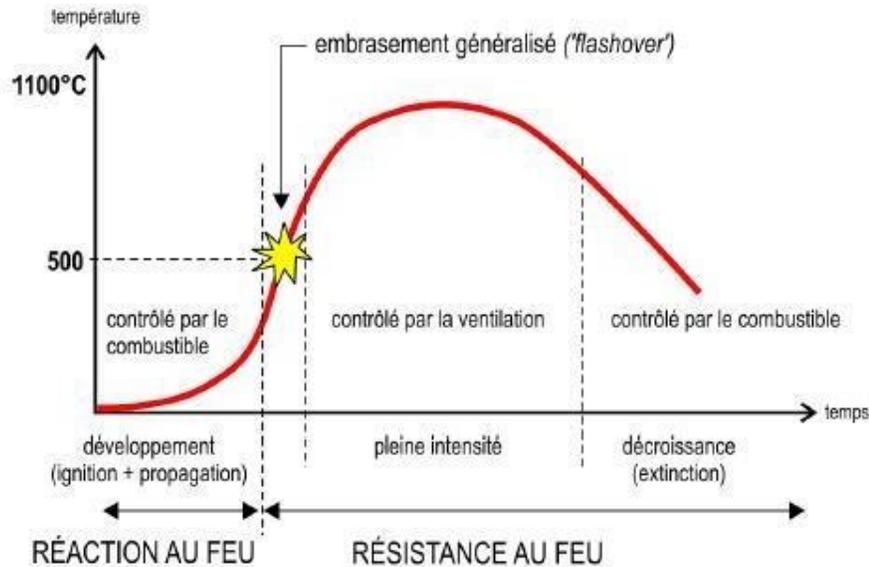


Figure 2: Phases de développement d'un incendie [9]

1.3. Modélisation d'un incendie

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, soit une relation donnant l'évolution de la température des gaz en fonction du temps [6].

Des courbes ont été établies à partir de l'expérience sur des feux réels et les plus fréquemment utilisées sont :

1.3.1. Feu normalisé ISO834

Le feu conventionnel est caractérisé par une température ambiante qui augmente de façon continue avec le temps mais avec un taux de croissance. Une courbe logarithmique est utilisée en laboratoire pour modéliser le feu la valeur de durée de résistance au feu n'indique pas la durée réelle pendant laquelle une composante résiste dans un incendie de bâtiment. Elle constitue une comparaison indiquant la sévérité d'un incendie au quel la composante peut résister [4].

temps (min)	température(C°)
0	20
5	576
10	678
15	739
30	842
60	945
90	1006
120	1049
180	1110
240	1153
300	1186
360	1214

Tableau 1: Valeurs température- temps pour la courbe ISO834 [12]

La courbe standard ISO : $\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t+1)$

Avec

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minute

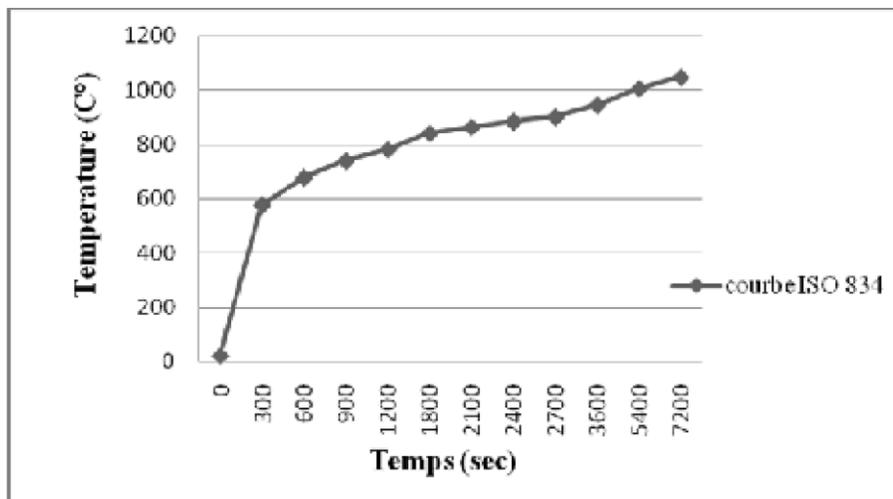


Figure 3: Courbe nominale du feu conventionnelle IISO834

1.3.2. Feu hydrocarbure

Il existe de nombreuses façons de simuler un incendie et de montrer l'effet de la chaleur à l'intérieur du bâtiment. Par ordre de complexité croissante, les modèles les plus couramment utilisés sont :

Développé par la compagnie pétrolière Mobil dans les années 1970, sa température s'élève très rapidement : la température est de 900°C pendant les 5 premières minutes et reste stable à 1100°C. La recherche a été lancée pour développer un programme de test utilisé pour évaluer les matériaux ignifuges pour les plates-formes de forage offshore et les complexes pétroliers [9].

La courbe température/temps des hydrocarbures est donnée par:

$$\theta_g = 20 + 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t})$$

Où:

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes

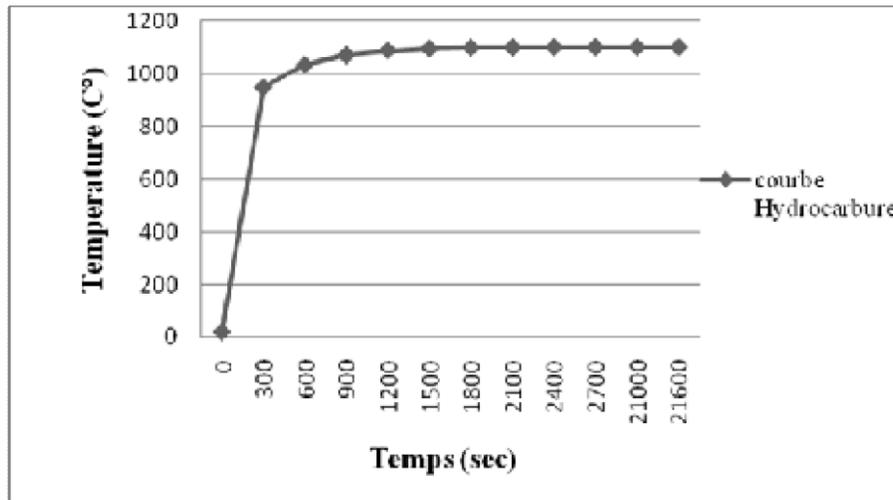


Figure 4: Courbe hydrocarbure du feu [12]

1.3.3. Feu extérieur

Lorsque nous examinons la résistance au feu d'une structure extérieurement, les températures des matériaux du bâtiment seront plus proche des températures d'incendie correspondant, on peut donc utiliser une courbe « d'incendie extérieure ».

La courbe de feu extérieure est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à 20+ 660 C°, une température nettement inférieure à la courbe standard.

Elle s'applique directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au dessous ou à coté du la face sollicitée [4].

$$\theta_g = 20 + 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t})$$

Où :

θ_g = température des gaz dans le compartiment en °C

t = temps en minutes

1.3.4. Feu paramétrique

Les feux paramétriques constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un bâtiment particulier. Comme les feux nominaux, ils consistent en la détermination d'une courbe température-temps, mais ces courbes tiennent compte de certains paramètres destinés à idéaliser certains aspects de la réalité.

Les feux paramétriques sont basés sur l'hypothèse que la température est uniforme dans le compartiment. Ce qui limite leur champ d'application aux conditions de « flashover » dans des compartiments de dimensions modérées. Ils constituent néanmoins un pas significatif vers la considération de la nature réelle d'un feu particulier par rapport aux feux nominaux [5]

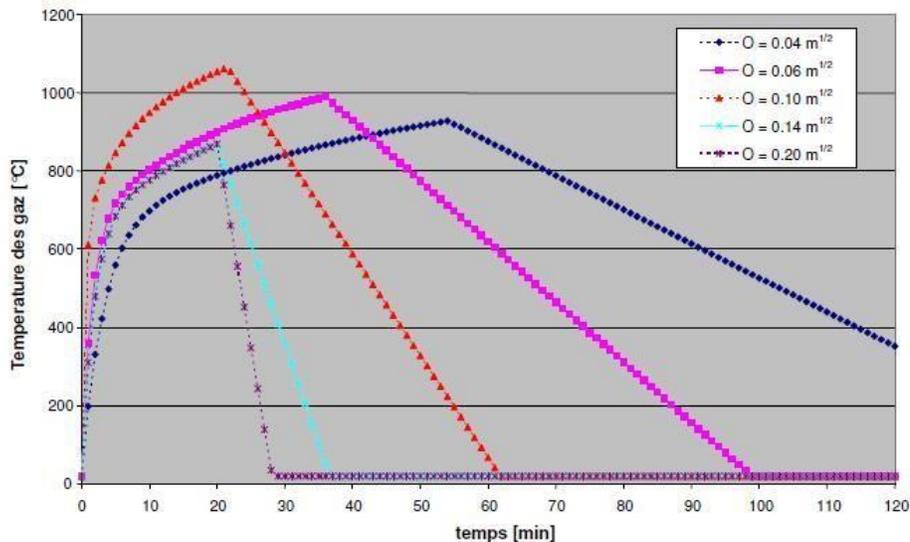


Figure 5: Exemple de feux paramétriques [5]

1.3.5. Feu réel

Les courbes température-temps naturelles devront être déterminées pour un compartiment spécifique.

Si le projet a été mené avec une approche performancielle, la capacité portante ou la capacité de compartimentage en alternative à la méthode qui fait référence aux classes est vérifiée vis à vis de l'action thermique en utilisant la courbe température-temps naturelle, cette courbe naturelle peut être déterminée comme suit :

- Modèles d'incendies expérimentaux.
- Modèles d'incendies numériques simplifiés.
- Modèles d'incendies numériques avancés.

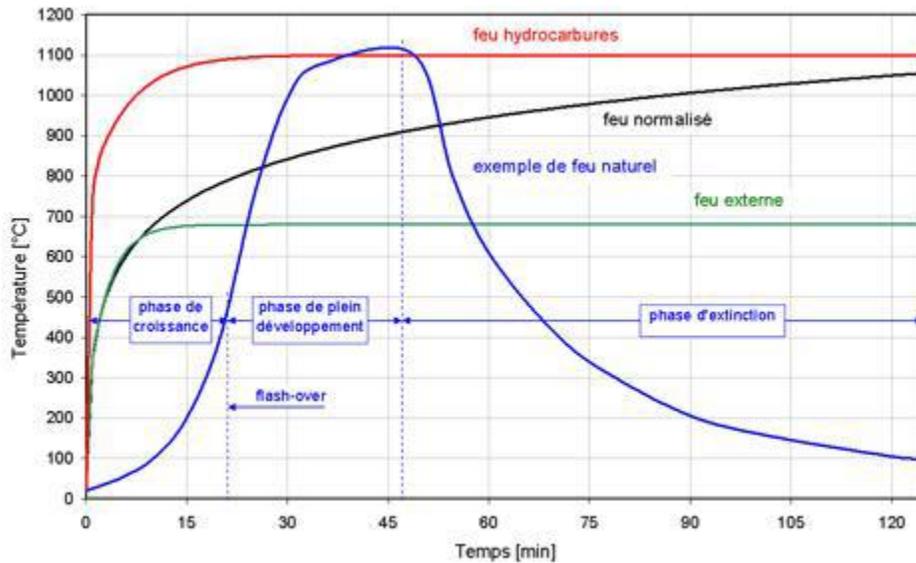


Figure 6 : Exemple de feu naturel

1.4. Prévention et protection

Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de n'utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments, aussi le respect et la mise en place d'un ensemble de mesures de prévention adéquates et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie.

La prévention contre l'incendie est divisée en deux types de protection :

➤ Prévention active :

Les protections initiales sont dites « actives » lorsqu'elles mettent en œuvre des dispositifs dynamiques (détection, alarmes, désenfumage, sprinklers) ou font intervenir l'action humaine pour éteindre le début d'incendie (robinet d'incendie armé ou RIA). Elles ont pour objectif premier de permettre l'évacuation des personnes dans les meilleurs délais et de faciliter l'intervention rapide des secours.

Le feu doit être détecté au plus tôt pour être combattu efficacement. L'ensemble des protections actives doit être efficace dans les deux premières phases de développement du sinistre [6].

Nous présentons quelques dispositifs de protection active :

- Les détecteurs réagissant à la fumée à la chaleur, ou aux flammes déclenchent une alarme sonore et la mise en œuvre de certains équipements ;

- Les consignes de sécurité et le balisage favorisent l'évacuation des occupants ;
- Le système de désenfumage évacue les fumées toxiques, facilitant l'évacuation des occupants sans dommages et l'intervention des secours ;
- Les moyens de lutte, extincteurs ou RIA, permettent l'attaque immédiate du feu ;
- Les sprinklers, réseau d'extinction automatique, attaquent sans délai le feu naissant.

➤ **Prévention passive :**

La protection passive regroupe les moyens mis en œuvre pour limiter les effets destructeurs du feu.

- Résistance au feu des matériaux ou dispositifs coupe-feu et pare flammes, emploi de matériaux avec différentes réactions ou résistances au feu.
- Conception résistante au feu comme spécifiés dans les réglementations.

1.5. Actions

1.5.1. Action mécaniques

En situation d'incendie, les charges mécaniques appliquées aux structures peuvent être obtenues en utilisant les formules suivantes [7] :

$$\Sigma_{i \geq 1} G_{k,j} + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \psi_{k,j} Q_{k,i}$$

Où :

$G_{k,j}$ Valeur caractéristique des actions permanentes

$Q_{k,1}$ Action variable principale caractéristique

$Q_{k,i}$ Valeur caractéristique des actions variables d'accompagnement

$\psi_{1,1}$ Facteur pour valeur fréquente d'une action variable

$\psi_{2,1}$ Facteur pour valeurs quasi-permanentes des actions variables

Les valeurs recommandées de $\psi_{1,1}$ et $\psi_{2,1}$ sont données dans le tableau (2).

Action	Ψ_0	ψ_1	Ψ_2
Charges imposée dans les bâtiments catégories			
Catégorie A: domestique ; zones résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B: zones de bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C: zones de congrégation	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : zones de commerces	0,7	0,7	0,6

Catégorie E : zones de stockage	1,0	0,7	0,8
Catégorie F: zones de trafic routier poids du Véhicule ≤ 3KN	0,7	0,9	0,6
Catégorie G: zones de trafic routier 30KN < poids du véhicule ≤ 160KN	0,7	0,5	0,3
Catégorie H: toits	0	0	0
Charge de neige sur les bâtiments			
Finlande ; Islande, Norvège, Suède	0,7	0,5	0,2
Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés à une altitude H > 1000 m.a.s.l.	0,7	0,5	0,2
Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés à une altitude H ≤ 1000 m.a.s.l.	0,5	0,2	0
Charges de vent sur les bâtiments	0,6	0,2	0
Température (sans incendie) dans les bâtiments	0,6	0,5	0

Tableau 2 : Valeurs recommandées des facteurs ψ pour les bâtiments [7]

Une autre notion largement utilisée dans les méthodes de calcul des Eurocodes est le niveau de chargement pour la situation d'incendie $\eta_{fi,t}$ qui est définie comme

$$\eta_{fi,t} = \frac{Ed_{fi}}{Ed} \text{ Avec :}$$

Ed : Effet de calcul des actions à température normale

Ed_{fi} : Effet de calcul des actions en situation d'incendie. Elle peut être déterminée d'une manière différente par :

$$\eta_{fi,t} = G_k + \psi_{fi,1} Q_{k,1} / \gamma_G G_k + \gamma_Q ; 1 Q_{k,1}$$

où $\gamma_{Q,1}$ est le facteur partiel pour l'action variable principale 1.

En fait, le niveau de charge $\eta_{fi,t}$ dépend fortement du facteur $\psi_{1,1}$ qui varie en fonction des catégories de bâtiments [8].

1.5.2. Action thermiques

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie et mettre en évidence les actions thermiques à l'intérieur d'un bâtiment. Dans un ordre croissant de complexité, les modèles utilisés le plus couramment sont :

- les courbes nominales.
- les courbes paramétriques.
- les modèles de zones.
- Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics) [9].

1.6. Comportement des matériaux à température élevée

1.6.1. Béton

1.6.1.1. Resistance Béton ordinaire

Les bétons contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires sont considérés comme des bétons à granulats calcaires [10].

La figure [7] montre que le facteur de réduction de la résistance caractéristique du béton siliceux est moins que celui du béton à base du calcaire, que signifie que la résistance du béton siliceux est moins de celle du béton à base du calcaire.

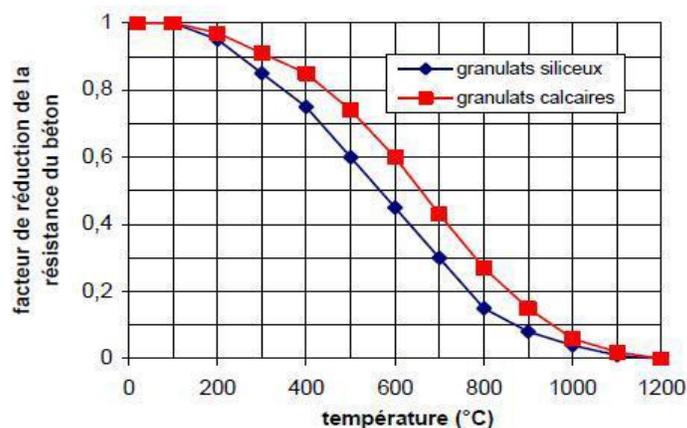


Figure 7 : Evolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du Type de granulats [10]

1.6.1.2. Déformation du béton

Les propriétés de résistance et de déformation du béton sous contrainte uniaxiale à températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation illustrée à la figure [8].

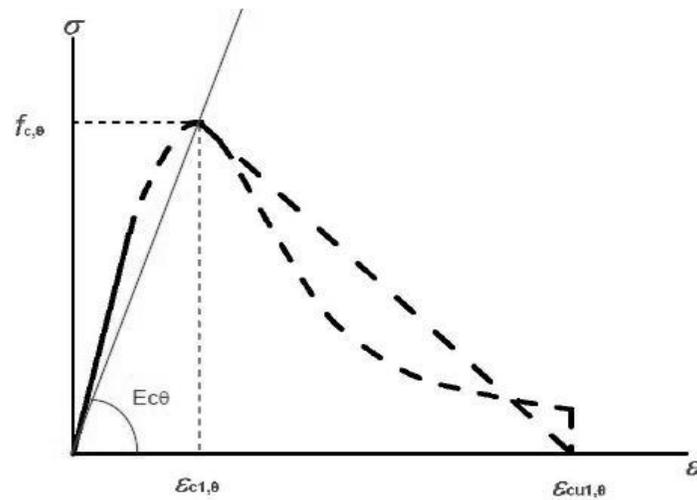


Figure 8 : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées [10]

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres :

- la résistance à la compression, $f_{c,\theta}$,
- la déformation $\epsilon_{c1,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont données dans le tableau [3] en fonction des températures du béton.

Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Les paramètres spécifiés dans le tableau peuvent être utilisés pour du béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux ou des granulats calcaires (sont considérés comme granulats calcaires ceux contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires

Température du béton	Granulats siliceux			Granulats calcaires		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
θ	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	-	-	0,00	-	-

Tableau 3: Valeurs des paramètres $f_{c,\theta}, \epsilon_{c1,\theta}$ pour béton[10]

1.6.1.3. Dilatation thermique du béton

La déformation thermique $\epsilon_{c(\theta)}$ du béton en fonction de la température est illustrée à la figure [9].

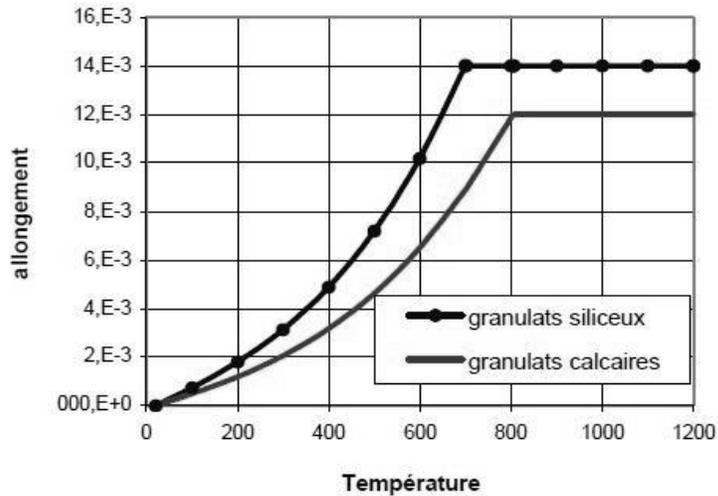


Figure 9 : Dilatation du béton en fonction de la température [10]

Selon [10] la dilatation du béton à granulats calcaires augmente lentement avec l'évolution de la température jusqu'à atteindre 800 °C où la dilatation devient constante malgré l'augmentation de température.

De la même façon pour le béton siliceux mais avec plus d'allongement qui atteint les 14.E-3 puis devient constant.

1.6.1.4. Chaleur spécifique du béton

La variation de la chaleur spécifique $cp(\theta)$ du béton en fonction de la température et de la teneur en eau est illustrée à la figure [10].

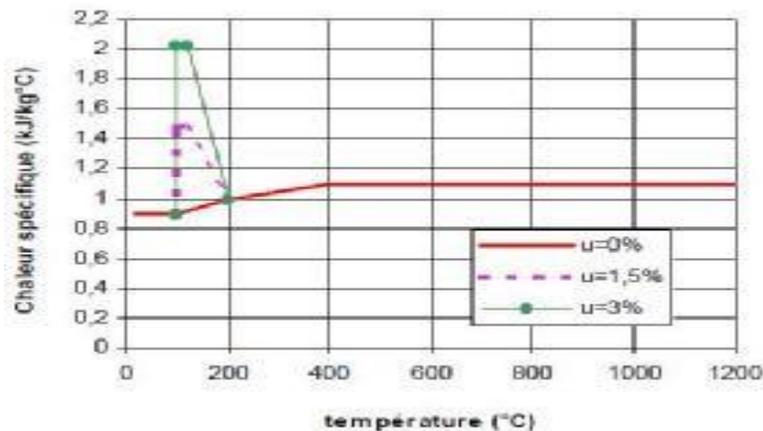


Figure 10: Chaleur spécifique du béton, $cp(\theta)$ en fonction de la température pour 3 teneurs en eau [10]

Le pic observé entre 100 et 200 °C correspond à la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le béton. Puis la chaleur spécifique augmente linéairement jusqu'à atteindre le 1.5 kJ/kg C° à 400C° où elle devient constante.

1.6.1.5. Conductivité thermique du béton

La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure [11].

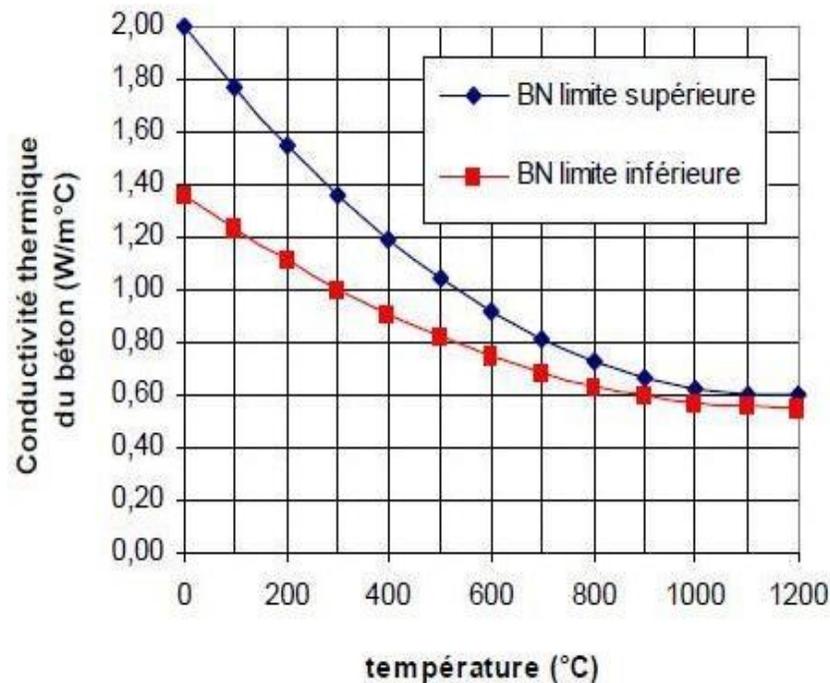


Figure 11 : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons normaux (BN) en fonction de la température [10]

La limite inférieure de la conductivité thermique a été obtenue à partir de comparaisons avec des températures mesurées dans des essais au feu de différents types de structures en béton.

La limite inférieure donne des températures plus réalistes pour les structures en béton que la limite supérieure qui a été obtenue à partir d'essais sur des structures composites en acier/béton.

Les courbes de conductivité thermique font apparaître à 20 °C une conductivité thermique des bétons de calcaire inférieure d'environ 20 % à celle des bétons de silice [10].

1.6.2. Acier

1.6.2.1. Résistance de l'acier

Le facteur de réduction de la résistance caractéristique de l'acier de béton armé en fonction de la température θ est illustré à la figure [12].

Ce facteur varie selon le type d'acier (laminé à chaud ou à froid) et en fonction de l'allongement des aciers :

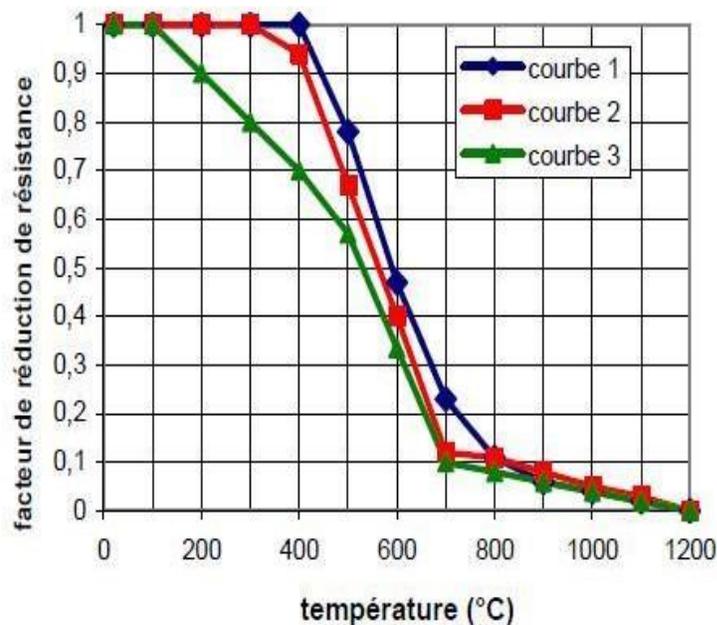


Figure 12 : Facteur $k_s(\theta)$ de réduction de la résistance caractéristique (f_{yk}) des armatures [10]

Courbe 1 : armatures tendues (acier laminé à chaud) pour des déformations $\geq 2\%$;

Courbe 2 : armatures tendues (acier formé à froid) pour des déformations $\geq 2\%$;

Courbe 3 : armatures comprimées ou armatures tendues pour des déformations $< 2\%$.

La différence entre les courbes 1 ; 2 et 3 est liée au fait que les résultats expérimentaux montrent que le palier de plasticité des aciers disparaît à chaud, et que donc le facteur $k_s(\theta)$ dépend de l'allongement à la rupture. Pour la résistance de l'acier de précontrainte la diminution de résistance est beaucoup plus rapide.

1.6.2.2 Déformation de l'acier

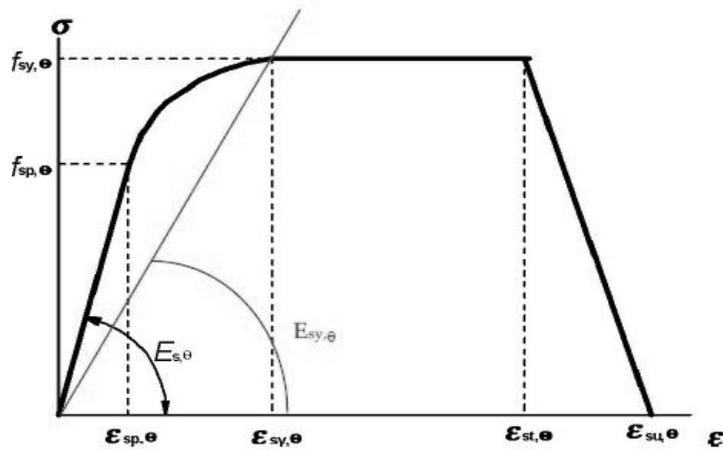


Figure 13 : La relation contrainte-déformation [11]

La relation contrainte-déformation régissant le comportement mécanique est définie par les paramètres suivants :

$f_{y,q}$ Limite d'élasticité efficace ;

$f_{p,q}$ Limite de proportionnalité ;

$E_{a,q}$ Pente du domaine élastique linéaire ;

$\varepsilon_{p,\theta}$ Déformation à la limite de proportionnalité ;

$\varepsilon_{y,\theta}$ Déformation plastique ;

$\varepsilon_{t,\theta}$ Déformation limite en élasticité ;

$\varepsilon_{u,\theta}$ Déformation ultime.

1.6.2.3. Dilatation thermique de l'acier

La variation de la dilatation thermique $\varepsilon_s(\theta)$ en fonction de la température est illustrée à la figure [14]

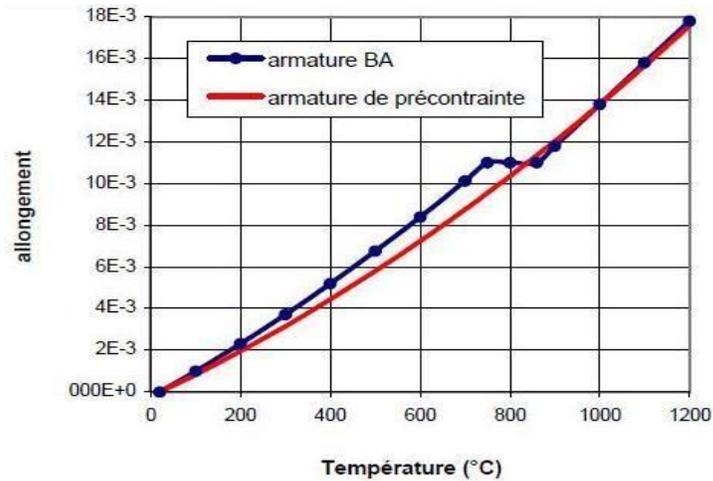


Figure 14 : Dilatation thermique de l'acier [11]

Nous constatons une diminution de la conductivité thermique en fonction de l'évolution de la température jusqu'à la valeur de 800 C° ou elle présente un pallier.

1.6.2.4. Chaleur spécifique de l'acier

Les propriétés thermiques de l'acier ne sont pas définies dans l'Eurocode 2 [10]. Elles ne sonten général pas nécessaires, sauf quand le pourcentage d'acier est important. On peut se référer aux valeurs présentées dans l'Eurocode 3 [11].

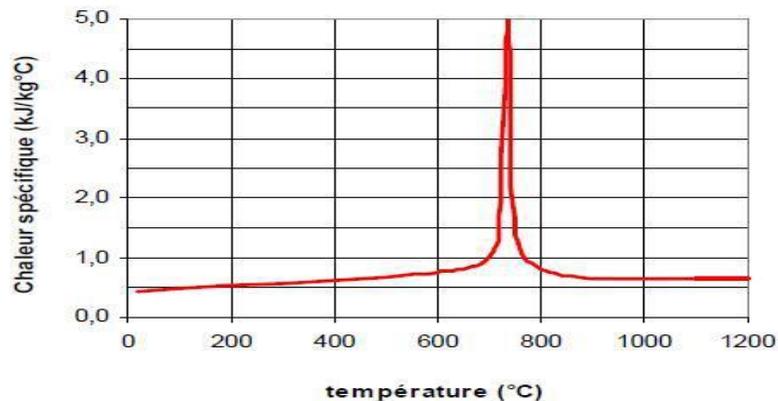


Figure 15 : Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température [11].

1.6.2.5. Conductivité thermique de l'acier

La variation de la conductivité thermique λ_s de l'acier en fonction de la température est illustrée à la figure [16] :

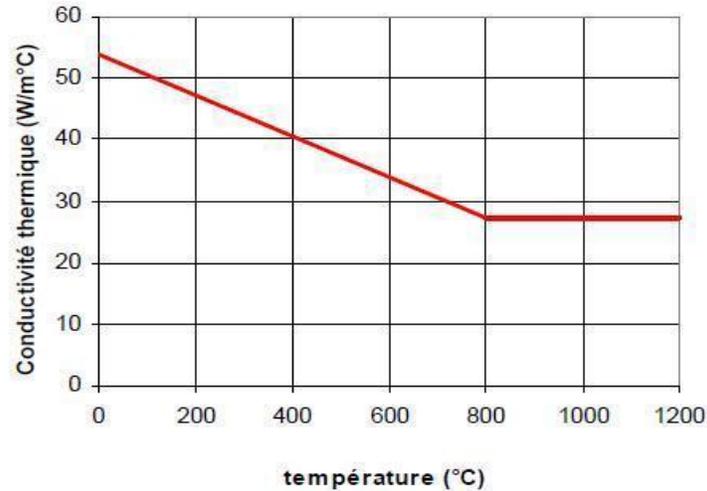


Figure 16: Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température [11].

1.7. Plastique

Les plastiques représentent une fraction importante et croissante de la charge de feu dans les environnements publics et résidentiels, et pourtant on en sait relativement peu sur les facteurs qui régissent leur comportement de feu. De plus, les plastiques les plus utilisés sont ceux qui sont les moins chers et ceux-ci ont tendance à être les plus inflammables.

1.7.1. Comportement au feu des matières plastiques

L'inflammation des plastiques est un phénomène compliqué car la thermochimie à l'état solide à taux fini est couplée à la chimie en phase gazeuse par la rétroaction thermique de la flamme. L'inflammation soutenue des liquides et des solides est compliquée par le fait qu'il existe un couplage dynamique entre la combustion en phase gazeuse et les réactions de génération de combustible en phase condensée, car il faut fournir de l'énergie pour élever la température de la phase condensée jusqu'au point de feu pour générer des gaz combustibles. La nature couplée et dépendante du temps de la flamme en phase condensée donne lieu à une variété de critères proposés pour l'allumage piloté des solides mais ceux-ci peuvent être grossièrement divisés en critères thermiques (état solide) et chimiques (phase gazeuse). Une température d'allumage pilotée correspond à une température à laquelle le plastique solide se décompose en combustible volatil à une vitesse suffisante pour maintenir un mélange inflammable au niveau de l'allumeur. [13-22]

1.7.2. Chaleur spécifique

1.7.2.1. Brûler en permanence

Une fois que l'allumage durable s'est produit, on suppose une combustion régulière et unidimensionnelle du polymère. La combustion régulière à une chaleur de surface constante flux est traitée comme un état stationnaire en choisissant un système coordi- naire qui est fixé à la surface et se déplace à la vitesse de récession v . S'il n'y a pas de chaleur de surface interne, la combustion est considérée comme un état stationnaire [23-31]

1.7.2.2. Brûlage instable

Le taux de dégagement de chaleur lors d'une combustion forcée à la flamme est le meilleur indicateur du risque de feu d'un matériau dans une enceinte [32]. Au lieu de cela, un test de flamme de résistance à l'inflammation est la seule évaluation du risque de feu exigée pour ces plastiques [22]. Les tests de résistance à l'inflammation classent les matériaux en fonction de la durée ou de l'étendue de la combustion après le retrait d'une petite-flamme source d'inflammation [31].

1.8. Bois

Le bois est un matériau qui présente de nombreux avantages. C'est une ressource naturelle et renouvelable, nécessitant peu de transformation (faible énergie grise) et pouvant être mise à disposition très rapidement .il est aussi un matériau de construction qui présente de nombreuses caractéristiques physiques et mécaniques intéressantes. [33]

1.8.1. Structure du bois

Un tronc est composé de l'assemblage de plusieurs types de cellules, toutes de faibles dimensions. Chacune de ces cellules constitue la brique élémentaire qui compose le matériau bois. [34]

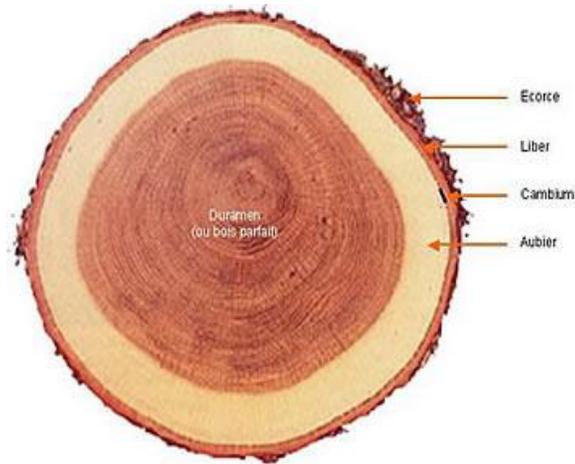


Figure 17 : Vue en coupe d'un troc d'arbre et des différentes parties qui le composent

(D'après site CNDB).

1.8.2. Comportement au feu de bois

Compte tenu de sa faible conductivité thermique, le bois présente une réaction au feu limitée. En général, les éléments à base de bois sont classés M3 ou M4 (moyennement ou facilement inflammable) suivant leur nature et leur épaisseur. Lorsqu'un fragment de bois compact brûle, trois zones sont à considérer : la zone périphérique constituée de charbon de bois après distillation complète et inflammation des gaz contenus dans cette zone, la zone intermédiaire de pyrogénéation à l'intérieur de laquelle la température est suffisante pour provoquer une distillation et la zone interne dont la température n'a pas encore subi d'élévation sensible et où il ne se passe provisoirement rien. [35]

1.8.3. La résistance au feu d'une structure en bois

La combustion du bois produit à la surface de l'élément considéré une couche carbonisée qui isole le bois non brûlé de la chaleur dégagée par les flammes. Ce phénomène réduit considérablement la vitesse de carbonisation qui demeure relativement constante pendant toute la durée du feu. De plus, le bois a une très faible conductivité thermique, ce qui veut dire que l'intérieur de la pièce de bois est peu affecté pendant que les faces extérieures brûlent. La résistance au feu d'une structure en bois peut être améliorée par l'adjonction d'une protection thermique sur les faces susceptibles d'être soumises à l'action du feu. Cette protection peut être fixée mécaniquement par clouage ou vissage (bois, panneaux dérivés du bois, plaques de parements de plâtre) ou par enrobage (plâtre projeté sur grillage ou treillis). Il peut être fait également appel à des procédés d'ignifugation qui ont pour objet de retarder l'inflammation et limiter le développement de l'incendie. En effet,

l'ignifugation modifie la réaction au feu des matériaux et retarde leur combustion, en absorbant la chaleur [36].

CHAPITRE 02

Les matériaux utilisés dans la protection passive contre l'incendie

1. Introduction

Dans les bâtiments ainsi que dans les structures de génie civil comme les tunnels, la protection active/ passive contre l'incendie est utilisée. La protection active comprend la détection automatique des incendies et les systèmes d'extinction, tandis que l'objectif principal de la protection passive contre l'incendie est de tenter de contenir les incendies ou de ralentir leur propagation. Le but de l'utilisation de ce type de système de protection est de maintenir la température du composant du bâtiment (élément de structure en acier, installation électrique) sous la température critique lors d'un incendie, mais sont également destinés à contenir un feu dans le compartiment d'incendie d'origine pendant une période de temps limitée.

Les matériaux de la protection passive ou d'isolation thermique peuvent être classés en trois catégories selon leurs fonctions [37] :

- Matériaux agissant comme barrière d'isolation thermique
- Matériaux de construction endothermique tel que : béton et gypse
- Nouveaux matériaux à base d'alcali activé.

Le béton est considéré comme un matériau de protection, cependant dans certains cas lorsqu'il est chauffé il a tendance à s'écailler mettant en péril la stabilité de la structure. Dans ce cas particulier, les fibres de polypropylène (PP) sont ajoutées au mélange de béton qui agissent comme un système de protection.

Un autre groupe de matériaux de protection passive contre l'incendie, décrit dans ce chapitre, sont les matériaux intumescents et ablatifs pour la protection des structures en acier. L'acier est très sensible à l'augmentation de température et 550 ° C est considéré comme la température critique pour l'acier de construction [37] car il induit une perte de résistance importante. Donc les mesures, comme système de protection passive, doivent être prises pour retarder la surchauffe de la structure en acier en créant une couche de charbon entre l'acier et le feu. Le présent chapitre décrit également les techniques des systèmes de protection passive contre l'incendie.

2. Matériaux de protection passive contre l'incendie

2.1. Matériaux d'isolation thermique

Il existe une grande variété de matériaux d'isolant thermique qui peuvent être utilisés comme barrière contre les transferts de chaleur. Cependant, en testant l'ignifugation des isolants thermiques, on ne trouve que peu de matériaux qui peuvent résister à des conditions d'incendie réelles. La laine minérale, argiles expansés et la cellulose sont des matériaux ignifuges d'excellence pour l'isolation thermique (Tableau 4).

Conditions	Températures (°C)		
	5 min	10 min	20 min
Acier	475	700	825
2,5 cm de laine minérale	70	379	671

Tableau 4 : L'effet de l'isolant thermique sur la température de parois exposées au feu [49].

2.1.1. Matériaux isolants fibreux

La laine minérale est un matériau isolant fibreux inorganique qui comprend la laine de roche, de verre et de laitier. Ceux-ci sont dérivés du calcin, du sable de quartz, de la diabase et du basalte [37] [38].

La laine minérale peut résister à des températures allant jusqu'à 1000 ° C et ne brûle pas. À plus de 1000 ° C, les fibres minérales commencent à fondre.

Ces matériaux sont disponibles dans le commerce sous forme de matelas et de planche. Les panneaux de laine minérale plus denses et plus durs sont utilisés dans les planchers, les murs et le toit. Ils sont également utilisés pour couvrir les tuyaux et conduites.

Les isolants en laine minérale consomment plus d'énergie au stade de la production en raison de l'exigence d'une température de 1400 ° C pour former des fibres de verre à partir de verre borosilicaté et de fusion de roche à 1500 ° C pour créer la laine de roche. Les résines phénoliques et l'huile de dépoussiérage lient la roche et les fibres de verre pour améliorer les caractéristiques thermiques et autres.

2.1.2. Matériaux isolants cellulaires inorganiques

Les matériaux isolants cellulaires inorganiques sont le silicate de calcium, le verre cellulaire (Figure 18), la perlite et la vermiculite. Leurs matériaux de base sont la craie, le sable, les fibres de cellulose, le calcin, la dolomie, l'oxyde (aluminium et silicium) et le silicate de magnésium-aluminium [38] [40].

Les isolants en mousse ont une faible conductivité thermique en raison de leur forte porosité qui réduit leur résistance mécanique et améliore leurs caractéristiques hygroscopiques [39].

De nouveaux matériaux isolants mousseux ont été élaborés préparé en utilisant de la perlite qui comprenait de la perlite / silicate de sodium, du H_2O_2 , du bromure de cétyltriméthylammonium et de la laine de roche. Le nouvel isolant mousseux était plus léger que tout autre matériau inorganique ayant une faible conductivité thermique et une résistance mécanique relativement élevée [41].



Figure 18 : Verre cellulaire

Enfin, l'isolant cellulosique est réalisé en vrac à partir d'un papier recyclé, journal, carton ou autre matériaux similaires, il est considéré comme l'un des matériaux d'isolation thermique les plus écologiques. Bien que la composition du matériau soit associée à la grande inflammabilité, le traitement chimique avec du sulfate d'ammonium et du borate confère son incombustibilité. De plus, en raison d'une compacité élevée des fibres cellulosiques, le matériau ne contient presque pas d'oxygène et étouffe efficacement les cavités murales de l'air de combustion et peut ainsi minimiser la propagation du feu. Comme l'isolant cellulosique est un matériau en vrac, il ne peut être utilisé que pour remplir le toit, le sol et les murs, de sorte que la partie externe de la structure est directement soumise au feu.

2.2. Propriétés des matériaux de la protection passive

Tableau 5 représente les propriétés des matériaux de la protection passive contre l'incendie [42] [43] [44] [45].

type d'isolation	Densité	conductivité thermique	la capacité thermique spécifique	facteur de résistance à la diffusion de vapeur	facteur d'absorption acoustique	Réaction au feu	Coût	énergie grise	carbone incorporé
Notion (unité)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	$K(mW/mK)$	$cp(j/g2c)$	$\mu(-)$	$\alpha(-)$	$\emptyset(-)$	$C_1(US \$/m^3)$	$EE(Mj/g)$	$EC(kgco_2/g)$
Matériaux d'isolation de bâtiment conventionnels									
laine de verre	10-100	30-50	0,8-1	1-1,3	0,45-0 ; 8	A1	9 ; 3-14,7	14-30,8	1,24
laine de roche	40-200	33-40	0,8-1,0	1,0-1,3	0,29-0,9	A1-A2	12-20	16,8	1,05
laine de bataille	50	40	0,7	0,5	0,5	-	-	-	-
polystyrène expansé	18-50	29-41	1,25	20-100	0,22-3,65	E	8,6-17	80,8-127	6,3-7,3
polystyrène extrudé	32-40	32-37	1,45-1,7	80-170	0,2-0,65	E	18-23	72,8-105	7,55
polyuréthane	30-160	22-35	1,3-1,45	50-100	0,67 ou 0,8	D-F	24,91	74-140	5,9
Polyisocyanates	30-45	18-28	1,4-1,5	55-150	-	B	20-24	69,8	5,5
verre moussé	100-200	38-55	0,21	+infini	-	A1	46-62	20,6-27	-
perlite	32-176	40-60	0,2	3,5	0,2-0,75	A1	38-42		
silicate de calcium	200-240	59-65	1,3	6-20	0,71	A1	10		
vermiculite	64-130	40-64	0,84-1,08	3-5	0,8	A1	7,2		
mousse phénolique	40-106	18-24	1,3-1,4	35	0,3-0,5	B-C	23	13-159	4,15-7,21
Liège	100-120	37-43	1,5-1,7	5-30	0,39-0,85	E	25,6-44,7	26	0,82
cellulose	30-80	37-42	1,3-1,6	1,7-3	0,53-0,9	B-C-E	24,6	3,3-105	0,31-1,53

Tableau 5 : PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX D'ISOLATION DES BÂTIMENTS
(classiques et de pointe)

2.3. Matériaux d'isolation thermique

2.3.1. Béton

Le béton est un matériau résistant au feu et incombustible, il a donc été utilisé comme matériau de base pour les structures résistantes au feu au cours des dernières décennies. Il protège une structure du feu de deux manières. Le béton lui-même contient de l'eau libre mais aussi la pâte de ciment est constituée d'une quantité importante de cristaux hydratés, elle

contient donc une grande quantité d'eau liée. En cas d'incendie, l'eau libre s'évapore d'une surface exposée à la chaleur et absorbe ainsi une grande partie de la chaleur, ce qui réduit la température dans la partie interne de l'élément structurel.

La réaction endothermique peut être encore plus élevée si les agrégats calcaires sont utilisés (Figure19).

Cependant, le développement technologique récent et la demande croissante de structures à haute résistance ont également conduit au développement de la technologie du béton. Ainsi le béton à haute performance qui présente un meilleur compactage de la microstructure grâce à sa densité élevée est particulièrement plus sensible à l'écaillage par le feu, contrairement au béton.

D'autre part, les enduits cimentaires tel que le béton projeté, utilisé comme protection incendie des éléments de charpente en acier (poutres, poteaux) est déconseillé en raison du risque d'écaillage, de fissuration ou de délaminage dans la couche de contact entre le béton et l'acier. De plus, les revêtements à base de béton, en tant que matériaux denses et massifs, ajoutent une composante importante de charge à une conception de capacité portante de la structure en acier.

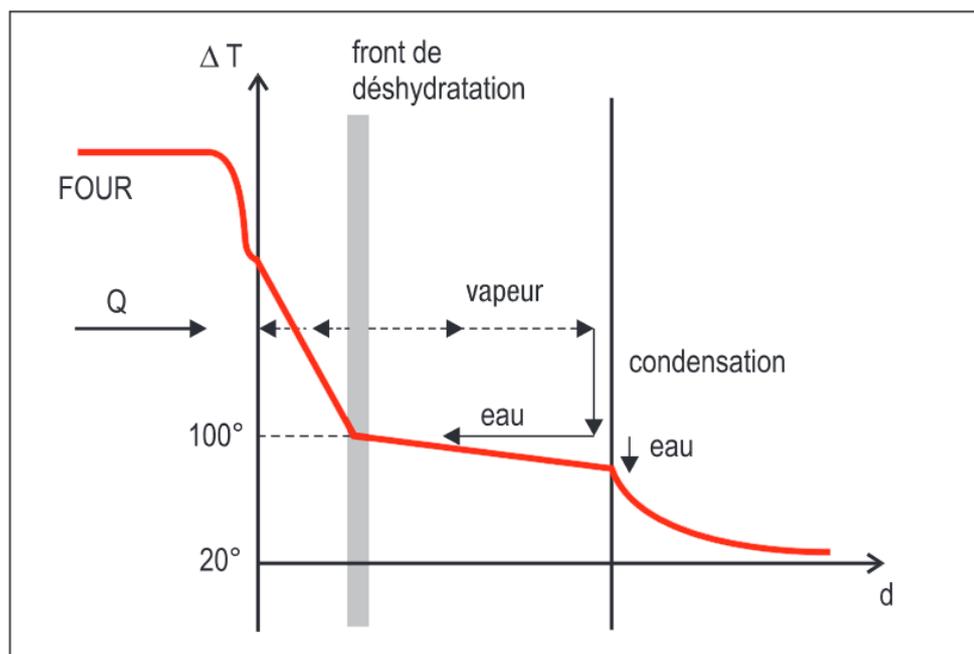


Figure 19 : Température dans une paroi en béton exposée au feu.

2.3.2. Gypse

Le gypse est une roche minérale cristalline. Les plaques de plâtre constituent une protection passive très efficace contre l'incendie. Etant donné que le gypse contient environ 20% d'eau chimiquement liée, il peut être évaporé en cas d'incendie et aider à minimiser la température à l'intérieur de la structure protégée et la propagation du feu, comme décrit précédemment. De plus, les plaques de plâtre sont des matériaux totalement incombustibles donc même après évaporation de la totalité de l'eau, elles constituent une barrière d'isolation thermique.

Les fabricants de plaques de plâtre offrent une grande variété de produits pour une gamme d'applications, y compris : des plaques de plâtre pour l'assemblage en surface sur les murs et les plafonds, ainsi qu'à l'intérieur des ascenseurs ou des gaines similaires. Les plaques de plâtre peuvent également être utilisées comme un séparateur entre deux zones ou montées directement sur des éléments structurels, par exemple : poutres en acier, pour fournir une couche résistante au feu.

2.4. Liants alcalis activés

Comme mentionné précédemment, le béton à base de ciment est incombustible et endothermique, cependant certains bétons, en particulier ceux à faible rapport eau/ciment comme les bétons en poudre réactive, sont particulièrement sensibles à l'éclatement du feu en raison de leur haute densité et une faible perméabilité.

Les liants alternatifs pour le ciment sont les liants activés par les alcalis (géopolymères) récemment développés. Ce sont des liants inorganiques, respectueux de l'environnement et offrent un meilleur comportement au feu, leur conductivité thermique est de l'ordre de 0,1 à 0,3 W/m.K, ce qui est relativement faible par rapport aux autres matériaux de construction structurels couramment utilisés et presque identiques ou comparables aux matériaux résistants au feu commercialisables [48]. Par conséquent, les liants activés par les alcalis ont la capacité de fonctionner comme une barrière efficace contre le flux de chaleur [48].

Le géopolymère est un type de céramique matériau avec des structures tridimensionnelles d'aluminate de silice amorphe à semi-cristalline [46]. Une fois les matériaux sources riches en silice (Si) et en aluminium (Al) activés par une solution alcaline mixte, les tétraèdres AlO_4 et SiO_4 dissous se combinent pour former des monomères en partageant un atome d'oxyde (O). Les monomères interagissent pour former des oligomères puis pour synthétiser un réseau

3D de structures aluminosilicatées [47]. Ce processus de dissolution et de polycondensation est appelé géopolymérisation (Figure 20).

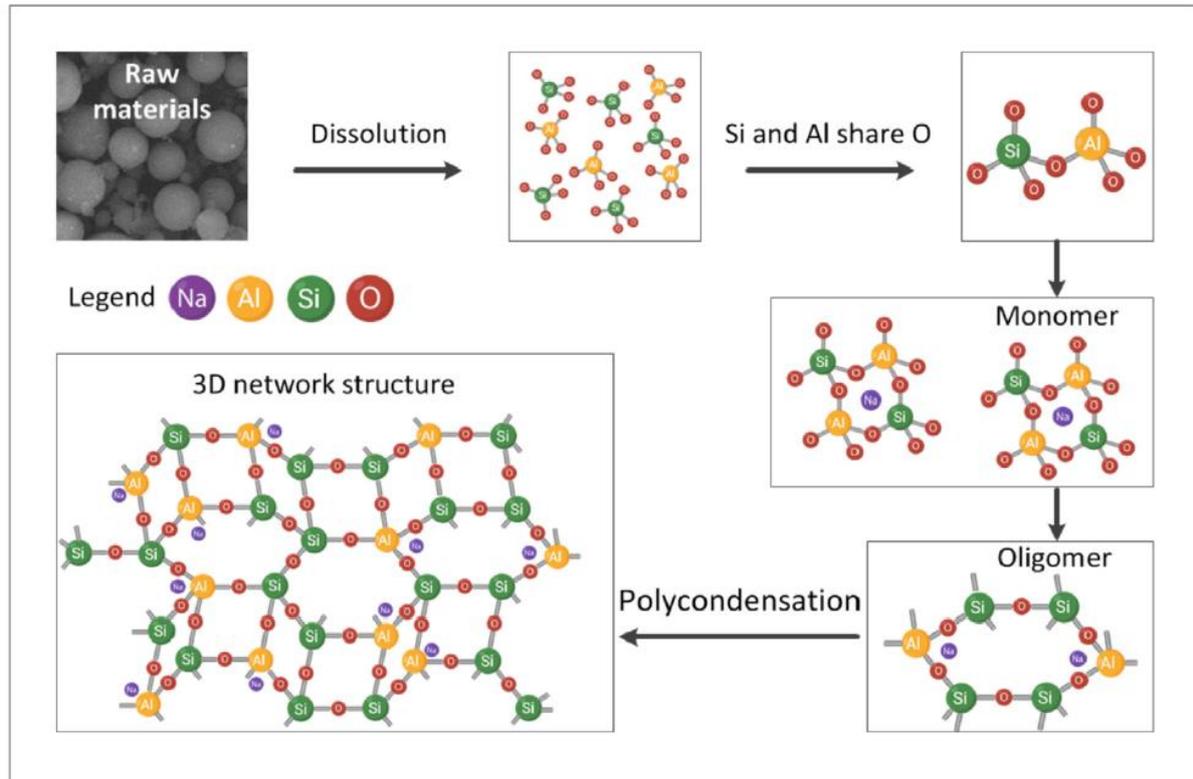


Figure 20 : Le procédé de la géopolymérisation[47].

type	Objet	Acronyme	constituent
Matières premières	cendres volantes	FA	SiO ₂
	mâchefer	BA	Al ₂ O ₃
	pouzzolane		Fe ₂ O ₃
	laitier de haut fourneau	BFS	CaO
	métakaolin	MK	P ₂ O ₅
	zéolites naturelles kaolin	kl	Na ₂ O
	cendres de carburant d'huile de palme	POFA	K ₂ O
	laitier de fonderie de plomb granulé	GLSS	MnO
	cendre de balle de riz	RHA	MgO
	ferrochrome	FS	SO ₃
	kaolite ultra fine frêne haute performance	HFA	TiO ₂

	cendres volantes de biomasse	BFA	
	Fumées de silico-manganèse	SMF	
additifs	ciment d'aluminates de calcium	cac	
	nano-silice		
	hydroxyde de calcium	Ca(OH) ₂	
	Portland ordinaire		
	ciment		
	fumée de silice		

Tableau 6 : Les principales sources des aluminosilicates.

2.5. Fibres de propylènes

Un béton fibré est un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres). Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques.

Il existe un certain nombre d'études concernant la quantité et le type de fibres de PP qui affectent positivement le comportement à l'écaillage du béton.

Des travaux antérieurs [51] [52] ont montré que le béton avec un rapport eau / ciment de 0,4, l'ajout de 0,05 % (en poids) de fibres de propylènes élimine complètement l'apparition d'écaillage. Lorsque le mélange contient des fibres de PP à plus de 0,05 % en volume, aucun écaillage ne s'est produit et la résistance du béton à l'écaillage est significativement améliorée. D'autres travaux [53] ont été effectués avec différentes quantités de fibres de PP (1 kg/m³ et 2 kg/m³) et différentes vitesses de chauffe (0,5, 1, 2, 4 et 8 °C/min). L'ajout de fibres PP à 2,0 kg/m³ permet de limiter le risque d'écaillage du matériau cimentaire. L'écaillage a été efficacement limité même lorsque la vitesse de chauffage relativement élevée (8 °C/min) a été appliquée.

2.6. Matériaux intumescents

Un intumescent est un matériau de revêtement semblable à une peinture, il peut être à base d'eau, de solvant ou d'époxy. A des de température de 200 °C à 250 °C, ces matériaux subissent des réactions chimiques complexes qui lui permet de gonfler (expansion), diminuent sa densité et entraînent une faible conductivité thermique de la couche

intumescente. Deux principaux types de matériaux intumescents peuvent être Distingués : couche mince et couche épaisse.

2.6 .1. Matériaux intumescents à couche mince

Le revêtement intumescent à couche mince ignifuge consiste en une couche de peinture à base d'eau ou de solvant d'environ 1 à 3 mm d'épaisseur. La couche complexe est généralement constituée de trois composants distincts : une couche d'apprêt, une couche de base qui réagit au feu et un scellant qui assure l'étanchéité du revêtement.

La couche de base est constituée d'un certain nombre d'ingrédients influençant le bon comportement lors de l'action du feu. Parmi eux, il convient de mentionner : une résine acrylique qui se ramollit à une température spécifique, et un agent « spumific » qui se décompose simultanément avec la fusion de la résine acrylique et produit une grande quantité de gaz ininflammables. Ces gaz comprennent le dioxyde de carbone, l'ammoniac et la vapeur d'eau. En raison de la présence d'une grande quantité de gaz libres, le matériau initial se dilate dans son volume de 20 à 50 fois. Une telle couche expansée peut supporter une charge calorifique même pendant 120 minutes.

Ce type de revêtement peut être appliqué sur les éléments de structure en acier soit sur site par des techniciens spécialisés, soit hors site dans un hall industriel.

L'application hors site est plus chère, mais plus précise en termes d'étanchéité du revêtement et d'apparence, ce qui est particulièrement important pour les composants exposés. Les revêtements en couche mince sont généralement utilisés pour la protection contre les incendies de type cellulosique qui se produisent dans les bâtiments industriels et commerciaux.

2.6. 2. Matériaux intumescents à couche épaisse

En cas de risque d'incendies d'hydrocarbures, l'application de matériaux intumescents à couche épaisse est recommandée principalement dans les immeubles de grande hauteur et les tunnels.

Les matériaux intumescents à couche épaisse à base d'époxy au lieu d'eau ou de solvant afin de fournir une protection supplémentaire contre la corrosion d'éléments en acier en contact avec l'eau.

Le revêtement en film épais peut être appliqué sous forme de pulvérisation, à la truelle ou par coulée, ce qui permet d'obtenir une surface de finition dure et lisse de haute qualité.

Cependant, les principes de fonctionnement en conditions d'incendie sont les mêmes que ceux décrits pour les revêtements en couches minces, mais le taux d'expansion du matériau dans ce cas atteint 5 fois la valeur initiale. Ces revêtements sont souvent utilisés dans les structures offshore pour protéger les éléments en acier de la corrosion et de l'environnement marin agressif.



Figure 21 : Câbles avec des matériaux intumescent [50].

2.7. Matériaux ablatifs

L'utilisation de la peinture ablative est importante comme protection passive contre le feu car celui-ci déclenche dans les matériaux ablatifs les réactions endothermiques, qui absorbent l'énergie thermique et minimisent l'augmentation de la température dans les couches sous-jacentes.

De plus, l'énergie thermique absorbée provoque des réactions qui produisent une vapeur qui à son tour, contribue à retarder et à réduire la formation de flammes. Le revêtement ablatif peut être appliqué sous forme de pulvérisation ou à la truelle et son épaisseur dépend directement de la charge calorifique conçue et de sa durée.

Ces matériaux sont faits de silicone élastomère, suffisamment élastiques pour rester fixer sur une surface incurvée et pour résister également à la fissuration en phase d'exploitation de la structure. Selon les tests [54], l'épaisseur de 1 à 2 mm des revêtements ablatifs peut résister à la charge au feu pendant 20 minutes et les épaisseurs de revêtement sont donc appliquées approximativement entre 1 mm et 7 mm pour fournir une résistance au feu entre 30 minutes et 120 minutes. Afin de protéger la couche ablative de l'eau et des dommages mécaniques, une couche supérieure de résine est couramment appliquée.

2.8. Test de la protection passive

En règle générale, les tests de protection passive sont effectués conformément aux directives et procédures spécifiques décrites dans les normes. Pour l'Europe, la norme de base pour les essais au feu est EN 1363-1, tandis qu'aux États-Unis, la principale norme d'incendie est la norme ASTM E119 : Standard Test Methods for Essais au feu de la construction et des matériaux de construction. Il existe également une série de directives nationales et internationales et de rapports techniques fournissant des instructions détaillées pour tester la protection passive pour des fins particulières, exemple, les revêtements de tunnels.



Figure 22: Essai au feu des matériaux.

CHAPITRE 3

LOGICIELS DE SIMULATION ET DE VISUALISATION

1. Introduction

L'idée d'étudier la dynamique d'un feu par des outils de simulation numérique remonte au tout début de l'informatique. Cependant, malgré la connaissance de l'ensemble des équations relatives à la dynamique des fluides, il existe de très nombreuses difficultés auxquelles il faut faire face pour obtenir des résultats raisonnables. La puissance toujours croissante des moyens de calcul permet aujourd'hui d'envisager de façon sérieuse de résoudre ces équations en 3 dimensions et de pouvoir ainsi simuler des écoulements. Mais dans le cas d'incendie notamment, la complexité est accrue puisqu'il faut considérer également des transferts de chaleur importants et une modélisation pour le processus et les phénomènes de combustion qui sont encore assez mal connus. La nécessité de prendre en compte les phénomènes de turbulence dans ce genre de cas constitue également une difficulté importante. Les approches classiques du type $k-\epsilon$ ont permis de faire considérablement avancer les modèles numériques. Aujourd'hui, d'autres techniques différentes comme les modèles de sous-mailles ou même les simulations numériques par calcul direct de la viscosité turbulente sont en plein essor grâce à des résultats prometteurs. C'est dans ce cadre que le NIST travaille depuis plusieurs années sur la mise au point d'un code CFD (Computational Fluid Dynamics) utilisant la technique Large Eddy Simulation (LES) et même tout dernièrement la technique de Direct Numerical Simulation (DNS). Ce code nommé Fire Dynamics Simulator (FDS) a fait l'objet de cette étude.

1.1. Présentation du code FDS

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

FDS est un code à champ qui résout une forme simplifiée des équations de Navier-Stokes dans l'approximation d'écoulement à faible nombre de Mach. Par défaut, la turbulence est modélisée par la technique de simulation des grandes échelles **LES** (large Eddy Simulation) avec le modèle de sous maille de Smagorinsky. Il est néanmoins possible de réaliser des Simulations Numériques Directes **DNS** (Direct Numerical Simulation) [56].

1.2. Historique des versions

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

A partir de 5 FDS, a été mis en place un système de gestion de révision formelle pour suivre les modifications du code source FDS. Les outils de développement de programmes open-source sont fournis par GitHub .Le numéro de version pour trois parties a FDS. Par exemple, indique que 5.2.12 FDS est ce 5 FDS, la cinquième version majeure. Le 2 indique une mise à jour importante (une version mineure), mais toujours dans le cadre de 5. Le 12 FDS indique la douzième version de maintenance de 5.2, la plupart des corrections de bugs et demandes des utilisateurs mineurs. [58]

1.3. Les changements dans FDS

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

a) Espèces et combustion

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

b) Fonctions de contrôle

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

c) Appareils et sortie

- ✓ Les réseaux de tuyaux multiples peuvent être spécifiés pour les gicleurs pour la réduction du débit en fonction du nombre de têtes de fonctionnement.
- ✓ La valeur numérique d'une fonction de contrôle peut être émise avec un DEVC.
- ✓ Peut-être spécifié une ligne de dispositifs en utilisant un certain nombre de POINTS sur une DEVC ligne. [56]

1.4. Modèle développeurs

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

À partir de 2007 avec la version **FDS 5**, l'équipe de développement FDS a adopté

Google Code, un service Internet gratuit conçu pour aider le développement de logiciels open source en fournissant un référentiel pour le code source, le contrôle de révision, la distribution du programme, suivi des bogues, et divers autres services très utiles . En 2015, Google mis fin à ce service, et a fourni tous ses projets un chemin de migration vers GitHub, un service gratuit similaire qui utilise Git, Subversion plutôt que, comme son logiciel de contrôle de version. [58]

1.5 Utilisations prévues

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

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

Bien a été conçu spécifiquement **FDS** pour les simulations d'incendie, il peut être utilisé pour d'autres simulations d'écoulement de fluide à basse vitesse qui ne comprennent pas nécessairement le feu ou les effets thermiques. À ce jour, environ la moitié des applications du modèle ont été pour la conception des systèmes de contrôle de la fumée et des études d'activation de détecteur. L'autre moitié se compose de reconstructions d'incendie résidentielles et industrielles. [57]

1.6. Caractéristiques principales du code fds

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

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

- ❖ Il est gratuit et de plus en plus reconnu comme assez fiable dans de nombreuses publications.
- ❖ Il est relativement facile à utiliser.

- ❖ Il est fourni avec un logiciel gratuit de visualisation des résultats particulièrement soigné, nommé « **Smokeview** ».
- ❖ Il peut être utilisé avec la puissance informatique d'un ordinateur de bureau.
- ❖ Sa documentation est bien fournie.
- ❖ ses sources sont libres et écrites essentiellement en **FORTRAN**.
- ❖ pour encourager l'usage et le développement de leur code, les auteurs de **FDS** assurent un échange actif avec les utilisateurs. [56]

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

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

Tableau 07: Les caractéristiques principales de FDS

1.7. Ressource en ligne et support utilisateur

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

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

FDS a deux manuels distincts :

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

1.8. Installation sur Windows

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

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

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

1.9. Exécution de séries FDS sous Windows

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

1.10. Structure de FDS

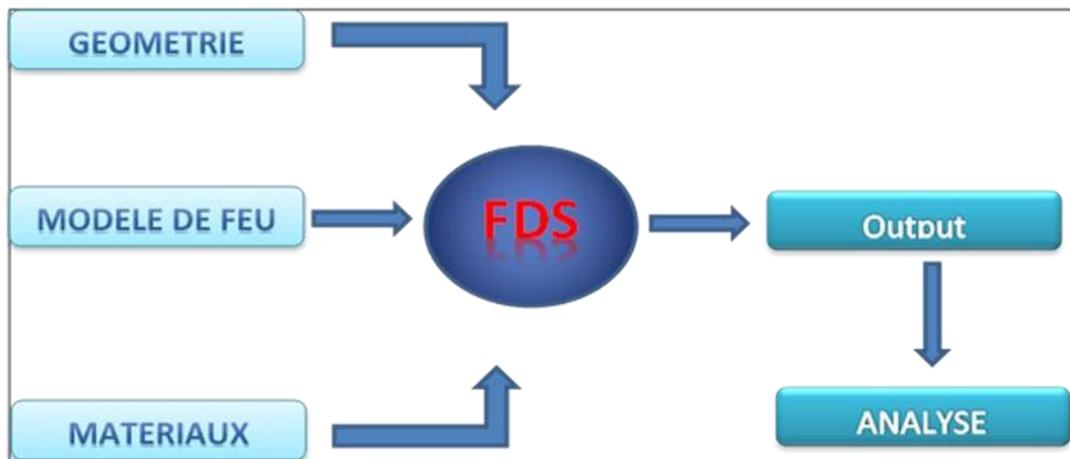


Figure 23: Les données principale de code FDS.

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

- ✓ La géométrie de base et la position des quelque éléments doivent être spécifiées. Les Surfaces rondes sont difficiles à construire.
- ✓ Le modèle de feu est un paramètre d'entrée critique.

- ✓ Les propriétés des matériaux doivent être spécifiés ou prises du data base FDS.
- ✓ Les commandes de simulation FDS sont détaillées sur le guide des techniques et le guide d'utilisateur.
- ✓ FDS produit plusieurs formes de sortie (résultats).
- ✓ Il est important de déterminer les paramètres de sortie et l'analyse des résultats. [56]

1.10.1. Structure de base d'un fichier fds

Introduction de données :

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

Format :

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

1.10.2. Paramètre dans le fichier d'entrée

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

POROUS_FLOOR=.FALSE. Ou POROUS_FLOOR=.TRUE.

A. Forme générale:

Un fichier FDS commence par &HEAD ...et se termine par &TAIL /.

B. Configuration générale

Tout d'abord, la configuration générale est effectuée.

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

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

C. Domaine de calcul

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

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

D. Propriétés

Certaines propriétés sont définies:

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

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

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

E. Géométrie solide

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

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

F. Logique de contrôle

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

G. Sortie

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

H. Les unités de mesure

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

Pour une liste complète, consultez la documentation.

I. Système de coordonnées de référence

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

Pour des raisons de calcul, il est toujours préférable que la dimension horizontale la plus longue du modèle soit alignée sur l'axe des x. Cela raccourcit souvent le temps de calcul. [58]

1.10.3. Quantités De Sortie

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

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

graphiquement à l'aide d'un tableur.

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

Grandeurs de sortie typiques pour la phase gazeuse comprennent:

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

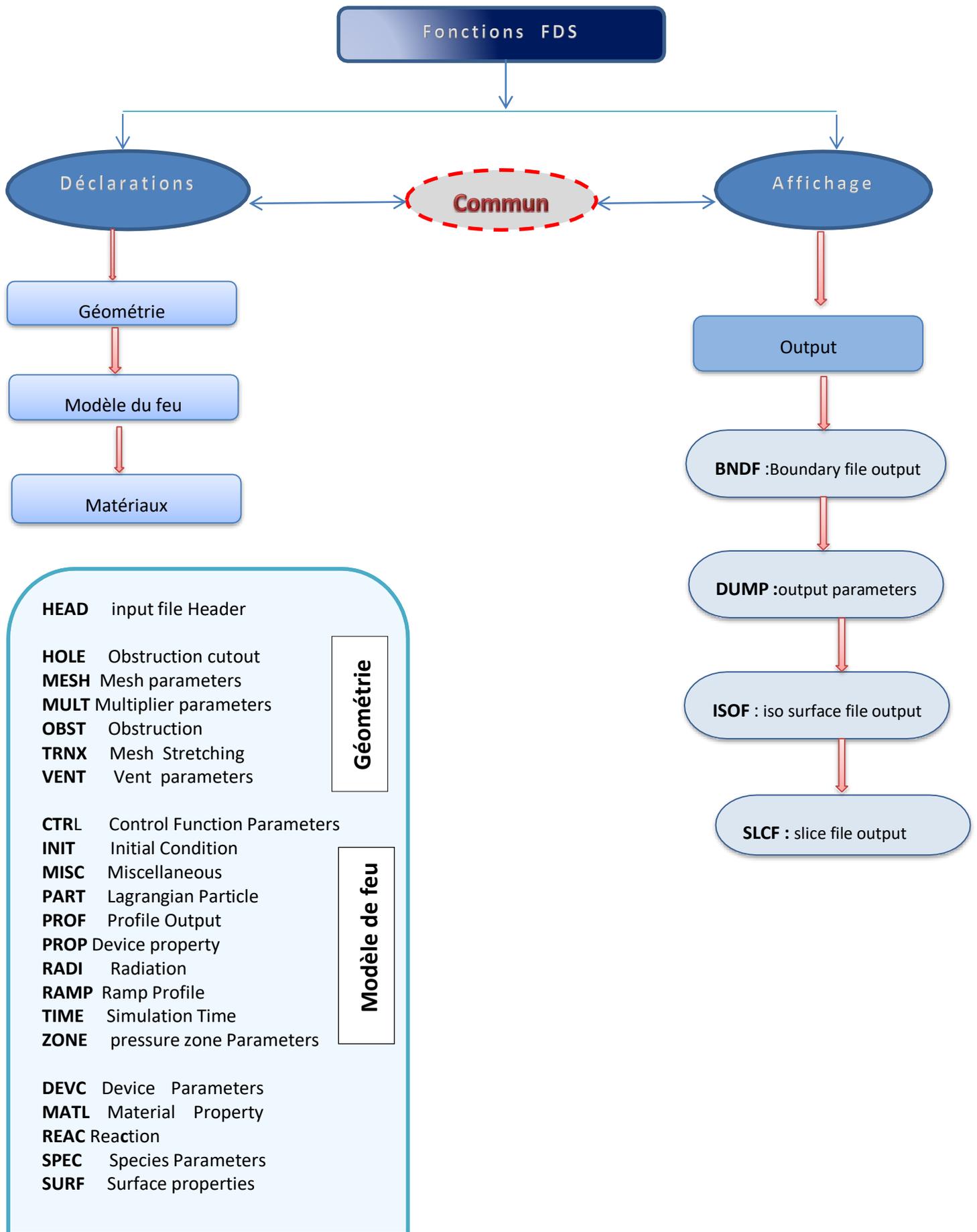
Sur des surfaces solides, FDS prédit des quantités supplémentaires associés à l'équilibre d'énergie entre le gaz et la phase solide, comprenant:

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

Quantités Globales Enregistrées Par Le Programme Comprennent:

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

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



3.2. SMOKEVIEW

3.2.1. Description de base de SMOKEVIEW

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

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

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

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

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

3.2.2. Historique des versions

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

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

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

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

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

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

3.2.3. Modèle de développement

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

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

simples sont régulièrement exécutées pour garantir que les modifications quotidiennes n'ont pas modifié les algorithmes de visualisation importants. [59]

3.2.4. Aperçu

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

Pour mettre en œuvre ces techniques, Smokeview utilise divers outils et techniques tels que la couleur, l'éclairage, le mouvement et la transformation. Ces éléments de base, sont utilisés par chacun des techniques utilisées par Smokeview pour visualiser les données, en particulier la visualisation de la fumée. [59]

3.2.5. Exécution de SMOKEVIEW

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

1. Créez un fichier nommé case nom. Fds décrivant le scénario feu.
2. Tapez fds case nom. Fds dans un interpréteur de commandes pour exécuter le cas.
3. Double-cliquez sur le fichier nommé case nom.smv ou de type smokeview case nom dans un interpréteur de commandes (sur d'autres plateformes) pour démarrer Smokeview.
4. Un clic droit dans la scène et sélectionnez un fichier à charger dans le Chargement / Déchargement menu. Ce rapport décrit l'étape 3 et l'étape 1 et 2 sont documentés dans le Guide de l'utilisateur FDS [58].

Les menus de Smokeview sont activés en cliquant avec le bouton droit de la souris n'importe où dans la fenêtre de Smokeview. Les fichiers de données peuvent être visualisés en sélectionnant l'option de menu souhaitée Charger / Décharger.. De nombreuses commandes de menu ont des raccourcis clavier équivalents. Les fonctions de visualisation non contrôlables par le menu peuvent être personnalisées à l'aide du fichier de préférences Smokeview, **smokeview.ini**. [60]

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

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

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

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

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

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

Bien que certaines marques de cartes vidéo ne puissent pas être recommandées, elles devraient être haut de gamme en raison des exigences graphiques élevées de Smokeview. Ces exigences ne feront qu'augmenter à mesure que de nouvelles fonctionnalités seront ajoutées. Une carte vidéo conçue pour fonctionner correctement sur des jeux d'ordinateur sophistiqués devrait bien fonctionner pour Smokeview. Certains bogues apparents dans Smokeview résultent de problèmes rencontrés dans les cartes vidéo d'anciens ordinateurs. [60]

3.3. PyroSim

3.3.1. Introduction

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

sécurité des bâtiments existants, à reconstituer les incendies pour les enquêtes post-accidentelles et à faciliter la formation des pompiers. FDS est étroitement intégré à PyroSim.

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

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

En résumé, PyroSim vous aide à construire rapidement et de manière fiable des modèles d'incendie complexes. [61]

3.3.2. Télécharger et installer

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

Lors de l'installation de PyroSim, le programme d'installation mettra à niveau une version existante ou installera PyroSim vers un nouvel emplacement. Ce comportement est basé sur la version. Dans le cas de mises à jour mineures (mise à niveau de PyroSim 2015.1 à PyroSim 2015.2, par exemple), le programme d'installation supprimera l'ancienne version et la remplacera par la nouvelle version. Lors de l'installation d'une mise à jour majeure (PyroSim 2013 à PyroSim 2015, par exemple), l'ancienne version ne sera pas modifiée et la version la plus récente sera installée dans un autre dossier. Des privilèges d'administrateur sont requis pour installer PyroSim. Cela est nécessaire car le programme d'installation ajoute des processus au système d'exploitation pour la gestion des licences et la simulation FDS parallèle.

3.3.3. Quelques suggestions de modélisation

Dans cette section, nous formulons quelques suggestions susceptibles d'accélérer le

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

- Prenez le temps de travailler à travers les exemples. Sur la page Didacticiels PyroSim (<http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/tutorials/>), nous fournissons une série d'exemples qui vous guident à travers des concepts de modélisation de plus en plus complexes. Cela vaut la peine de travailler à travers ces exemples.

- N'oubliez pas de «commencer petit». Lorsque vous développez un nouveau modèle, ne vous contentez pas de vous précipiter pour créer le modèle final. Utilisez de petits modèles pour vous assurer de bien comprendre les détails.

3.3.4. FDS s'enclenche dans le maillage

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

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

3.3.5. Utilisation d'un exécutable FDS différent

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

Pour changer la version de FDS utilisée par PyroSim:

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

3.3.6. Interface PYROSIM

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

- **Vue de navigation:** cette vue répertorie de nombreux enregistrements importants dans le modèle. Il vous permet d'organiser la géométrie de votre modèle en groupes tels que la pièce ou le canapé. La localisation et la modification des enregistrements sont souvent plus rapides et plus faciles dans cette vue.
- **Vue de navigation:** cette vue répertorie de nombreux enregistrements importants dans le modèle. Il vous permet d'organiser la géométrie de votre modèle en groupes tels que la pièce ou le canapé. La localisation et la modification des enregistrements sont souvent plus rapides et plus faciles dans cette vue.
- **Vue 2D:** Cette vue est utile pour dessiner rapidement des géométries telles que des murs et des meubles. Vous pouvez choisir parmi trois plans de visualisation et effectuer de nombreuses manipulations géométriques utiles.
- **Vue d'enregistrement:** cette vue donne un aperçu du fichier d'entrée FDS qui sera généré pour la simulation. Il fournit également un moyen d'ajouter des enregistrements personnalisés qui ne seront pas traités par PyroSim, mais qui seront envoyés à FDS. [61]

```

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

```

Figure 24 : le fichier d'entrée de code FDS.

```

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

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

Fire Dynamics Simulator

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

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

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

Job TITLE         : room fire model
Job ID string     : room

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

```

Figure 26 : l'exécution de fichier d'entrée.

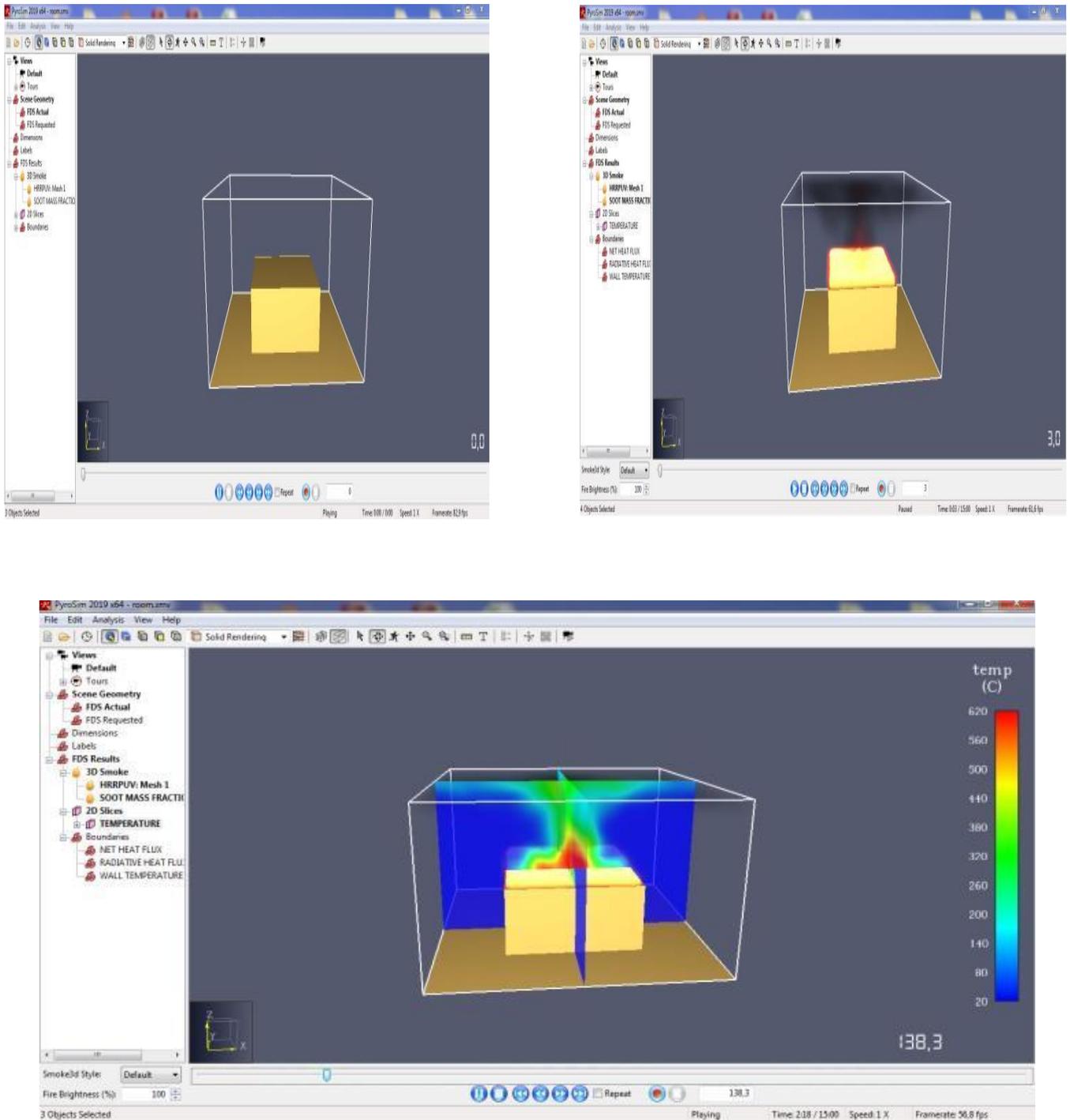


Figure 27 : visualisation des données et des résultats avec le PyroSim.

CHAPITRE 4 :
PARTIE PRATIQUE

1. Introduction

La protection passive contre l'incendie (PFP) est un mécanisme défensif qui ne nécessite aucune méthode d'activation pour empêcher la propagation du feu et la désintégration de la structure. Quelques exemples de PFP sont les murs et les portes coupe-feu, les aérosols de protection contre l'incendie et la mousse auto-expansible qui sont conçus pour limiter l'élévation de température et pour l'absorption de chaleur excessive des équipements et des structures. Un autre type de système PFP vise à empêcher la propagation d'hydrocarbures (notamment d'hydrocarbures liquides).

Avec une telle variété de systèmes de protection incendie, le choix d'un PFP dépend principalement du type de feu comme le feu de nappe, le feu-jet ou le feu éclair. De plus, une utilisation inadéquate ou excessive de PFP peut entraîner des problèmes tels qu'une augmentation des coûts de fabrication et de construction et une difficulté à effectuer des tests de corrosion. Ainsi, une sélection de PFP doit être considérée avec soin pour maximiser la rentabilité et les performances du PFP appliqué.

L'objectif de ce travail est d'évaluer par comparaison les performances de plusieurs systèmes de protection passive dans l'industrie de raffinerie de pétrole ou de gaz, en utilisant le logiciel de simulation d'incendie FDS (Fire Dynamic Simulator).

2. Méthode de travail

La méthodologie commence par l'élaboration de scénarios d'incendie dans une installation de raffinerie de pétrole et de gaz. Ensuite, L'application de la simulation par le logiciel FDS est effectuée sur le scénario d'incendie. Par la suite, plusieurs systèmes de protection passive PFP sont appliqués et modélisé pour le scénario d'incendie proposé. Les résultats de la simulation FDS sont adoptés pour l'analyse comparative des performances de divers systèmes PFP.

2.1. Scénario d'incendie proposé

Un scénario d'incendie est une description qualitative d'une cause majeure du déroulement possible d'un incendie, qui provient généralement de dangers présents dans une installation, possédants un potentiel de menace pour le personnel et les installations.

Dans une installation de raffinerie de pétrole et de gaz, les produits chimiques dangereux sont stockés tels que le pétrole brut ou tout sous-produit, cependant, si une perte de confinement se

produit, il peut générer par conséquent, si une source d'inflammation se présente, un incendie ou explosion entraînant potentiellement des victimes et des pertes économiques considérables.

Dans notre étude, nous avons considéré une zone qui comporte quatre équipements, un feu d'hydrocarbure a été déclenché suite à un déversement accidentel du diesel sur le sol de la zone étudiée, les caractéristiques de la zone étudiée sont :

- ✚ Scénario : Feu d'hydrocarbure dans une zone qui contient quatre équipements.
- ✚ La superficie de la zone étudiée : 20m de longueur et 15m de largeur
- ✚ Le matériau des équipements : Acier
- ✚ Le matériau du sol de la zone : Béton
- ✚ Le type d'hydrocarbure : Diesel

2.2 Simulation par le logiciel FDS

En raison de la large application du FDS dans la modélisation des incendies, cette simulation numérique est réalisée à l'aide de ce logiciel. Le pré-traitement de la simulation a été fait de manière appropriée. La configuration de la simulation pour le scénario d'incendie est indiquée dans Tableau08. Les résultats après la simulation FDS contiennent : la distribution de la charge thermique, la température de la paroi et le rayonnement thermique total reçu par l'équipement. La Figure 27 représente la disposition de la simulation du scénario étudié, le carré en rouge représente le feu d'hydrocarbure causé par le déversement du diesel.

Scénario	Feu d'hydrocarbure
Le volume de la zone	20m x 15m x 10 m
Le temps de simulation	80 secondes
Les conditions aux limites	ouvert
Type d'hydrocarbure	Diesel
Rayon du feu	3 m

Le flux de chaleur	1500 KW/m ²
--------------------	------------------------

Tableau 08: Configuration du scénario sur Pyrosim.

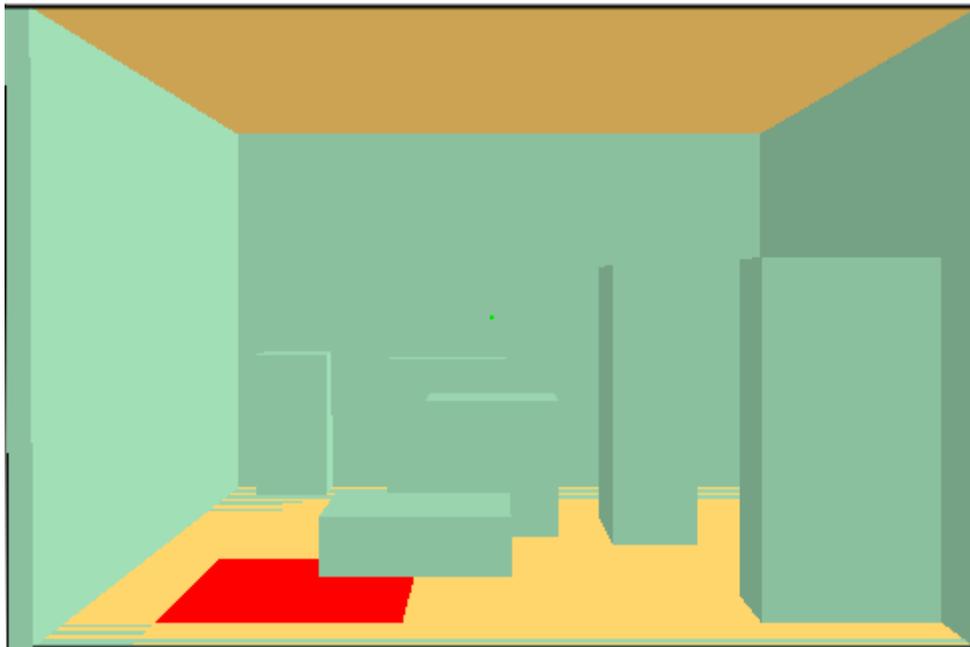


Figure 27 : La disposition de la simulation du scénario étudié.

2.3. Application de la protection passive sur l'équipement

Plusieurs revêtements PFP sont appliqués sur l'équipement. L'objectif principal de l'utilisation du PFP est d'éviter la désintégration structurelle en maintenant la température interne d'une structure en dessous d'un point critique et de ralentir la propagation du feu.

Selon le type de feu, le flux de chaleur reçu, la durée et la taille du feu, différents systèmes PFP peuvent être appliqués. Pour les jets d'incendie, une méthode d'atténuation efficace comprend un pare-feu, un revêtement intumescent, un revêtement en fibres minérales et un revêtement en matériau cimentaire [62].

Pour les feux de piscine, une protection passive efficace comprend une mousse auto-expansible, une barrière d'isolation thermique, un revêtement intumescent ou un matériau de construction endothermique qui peut résister à une longue durée d'exposition au feu [62][63].

Pour atténuer l'impact thermique sur la structure du feu éclair, il est recommandé d'utiliser une barrière d'isolation thermique et un revêtement intumescent.

Dans notre étude nous avons choisi trois types de protection passive contre l'incendie :

- L'époxy
- Fibre de verre
- Verre cellulaire

Leurs caractéristiques sont illustrées sur le Tableau 09 :

	Densité (Kg/m ³)	Capacité calorifique (Kj/Kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Emissivité
Epoxy	1000	1,172	0,066	0,90
Fibre de verre	150	0,700	0,040	0,75
Verre cellulaire	115	0,770	0,078	0,20

Tableau 09 : Propriétés thermiques des matériaux de la protection passive [62].

3. Résultat de la simulation

3.1. Sans protection passive

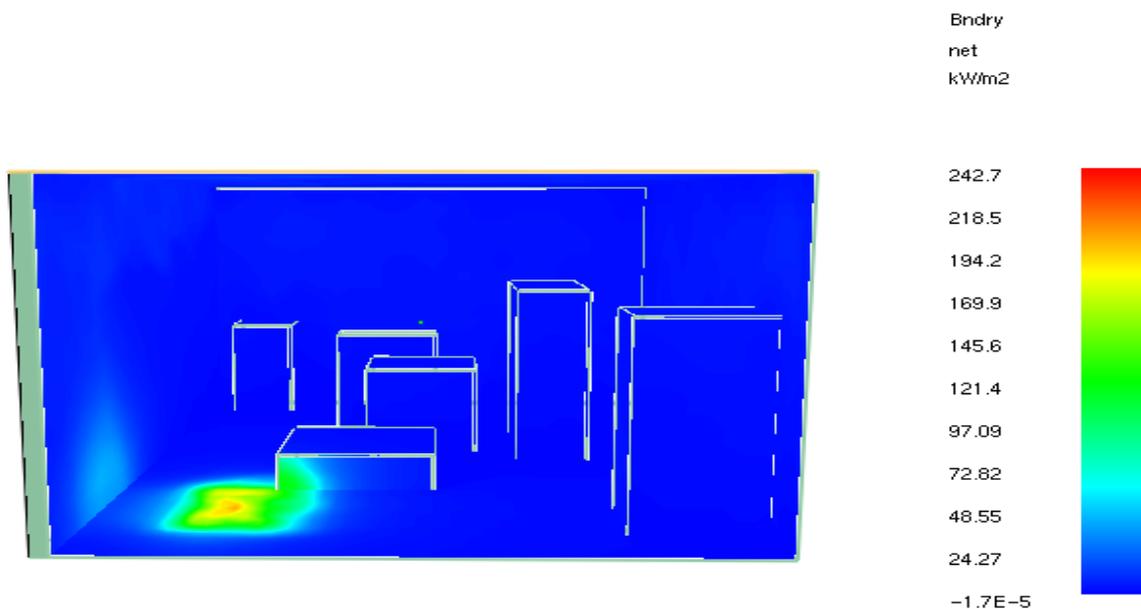
L'impact du feu est analysé à l'aide de la répartition de la charge thermique et la température des parois des équipements après exposition au feu d'hydrocarbures.

Dans notre étude le matériau de construction des équipements est en acier. En général, lorsque le facteur de résistance diminue en dessous de 60% dans des conditions atmosphériques [62][65], la structure en acier est supposée avoir échoué. D'après les expériences, la limite

d'élasticité de l'acier commence à diminuer de manière significative lorsque la température est au-dessus de 550 °C [62].

Lorsque la température atteint 474 °C, une réduction de 60 % de la limite d'élasticité est observée par rapport à la limite d'élasticité à température ambiante [62], qui est supposée être le point de rupture de l'acier. D'après la simulation, La température des parois de l'équipement atteint 1190°C.

Nous remarquons aussi que le flux de chaleur reçu par l'équipement est de 72,82 KW/m², cette valeur est très importante et peut endommager de façon considérable le matériau de l'équipement. En effet, Le rayonnement thermique reçu par l'équipement dépend fortement de l'émissivité de surface ainsi que du transfert de chaleur par convection qui lui est associé. Il a été montré qu'une valeur de 37,5 KW/m² du flux de chaleur peut détériorer énormément l'acier.



(a)

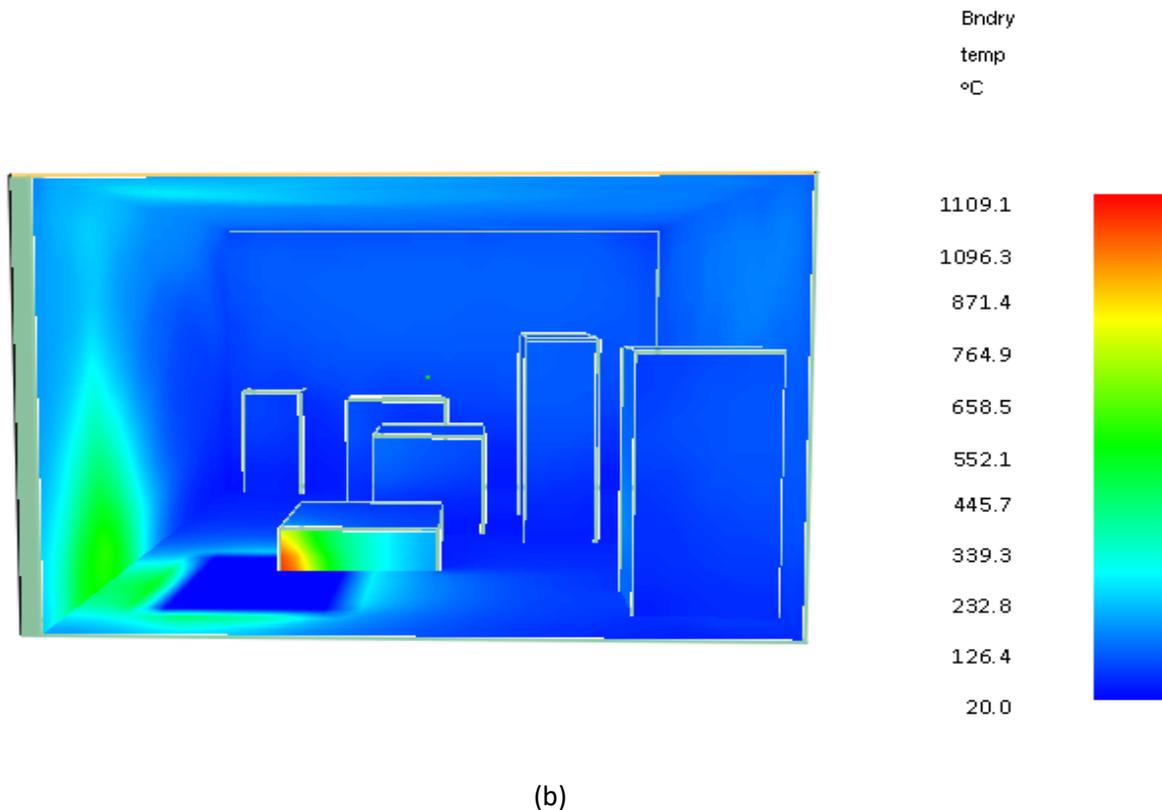


Figure 28 :(a) Résultat de la simulation du flux de chaleur sans protection passive (b) Résultat de la simulation de la température des parois après 80s.

3.2. Avec protection passive

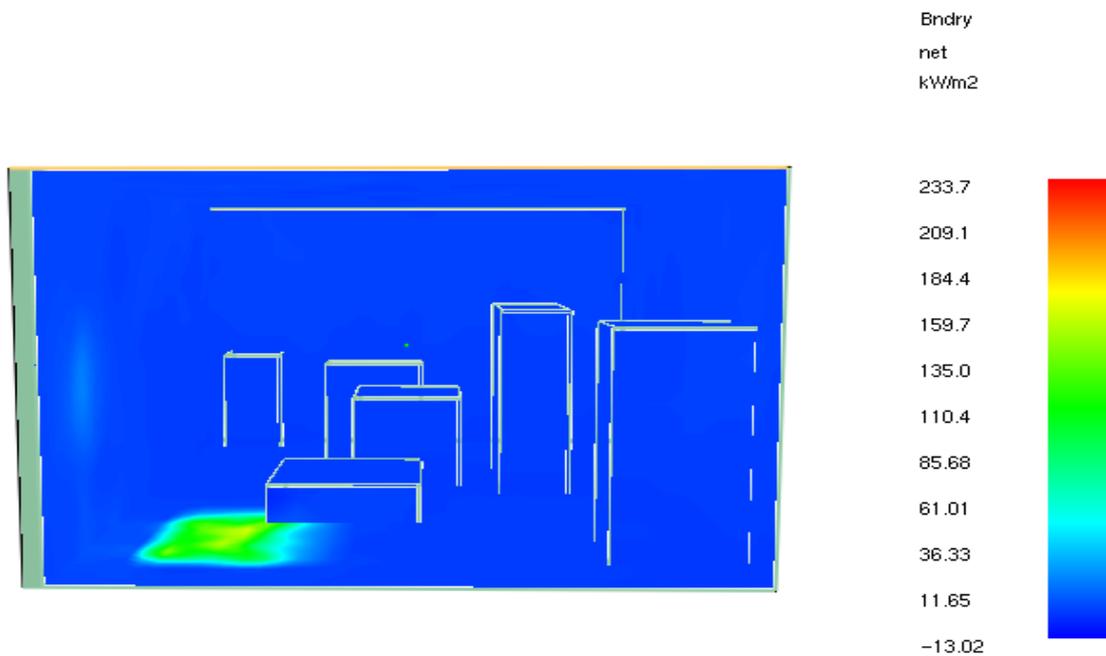
Les performances de la protection passive contre l'incendie appliquées aux équipements sont évaluées. L'efficacité de ces derniers est déterminée en fonction de leur capacité à protéger une structure contre l'élévation de température d'une part et à empêcher l'absorption de charge thermique d'autre part [65].

Par conséquent, nous avons évalué par simulation numérique la température du mur et la charge thermique sur l'équipement après incendie. Ainsi, nous pouvons montrer la capacité de la protection passive appliquée à empêcher avec succès l'augmentation de la température jusqu'à la température critique du matériau structurel.

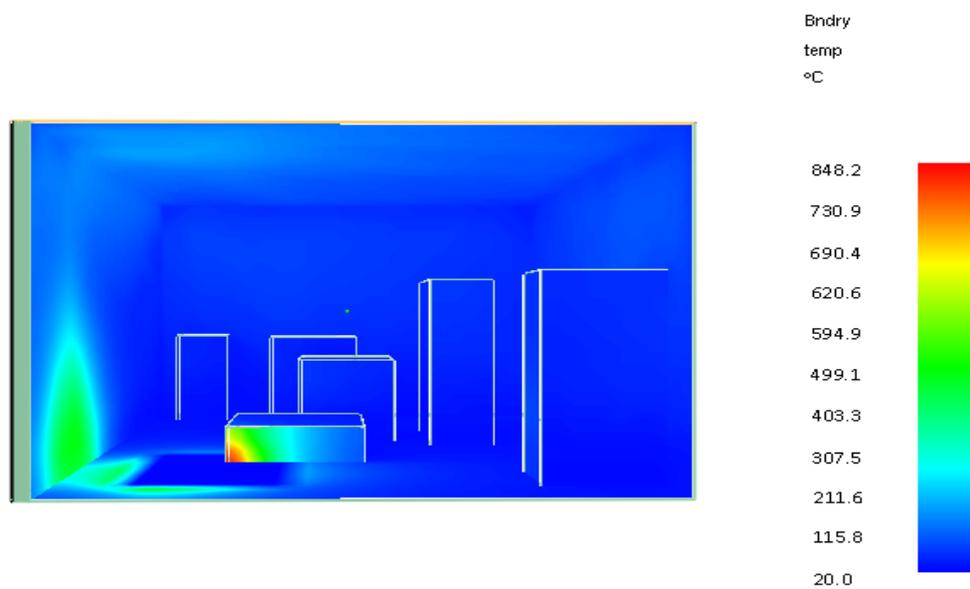
A-Avec Epoxy :

L'époxy utilisé possède une épaisseur de 10 cm, les résultats de la simulation du flux de chaleur et la température des parois sont illustrés sur la Figure 29.

Les résultats montrent que le flux de chaleur reçu par l'équipement après l'application de l'époxy est de $36,33\text{Kw/m}^2$ et la température est de $848,2^\circ\text{C}$.



(a)



(b)

Figure 29 : Résultat de la simulation des parois après application de l'époxy : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

B-Avec Fibre de verre

L'application de la fibre de verre est réalisée pour une épaisseur de 10cm. Les résultats de la simulation sont montrés sur la Figure30 Nous remarquons une baisse des deux paramètres étudiés, d'après la simulation par Pyrosim nous avons trouvé que le flux de chaleur est de 35,79 KW/m² et la température est de 830,6°C.

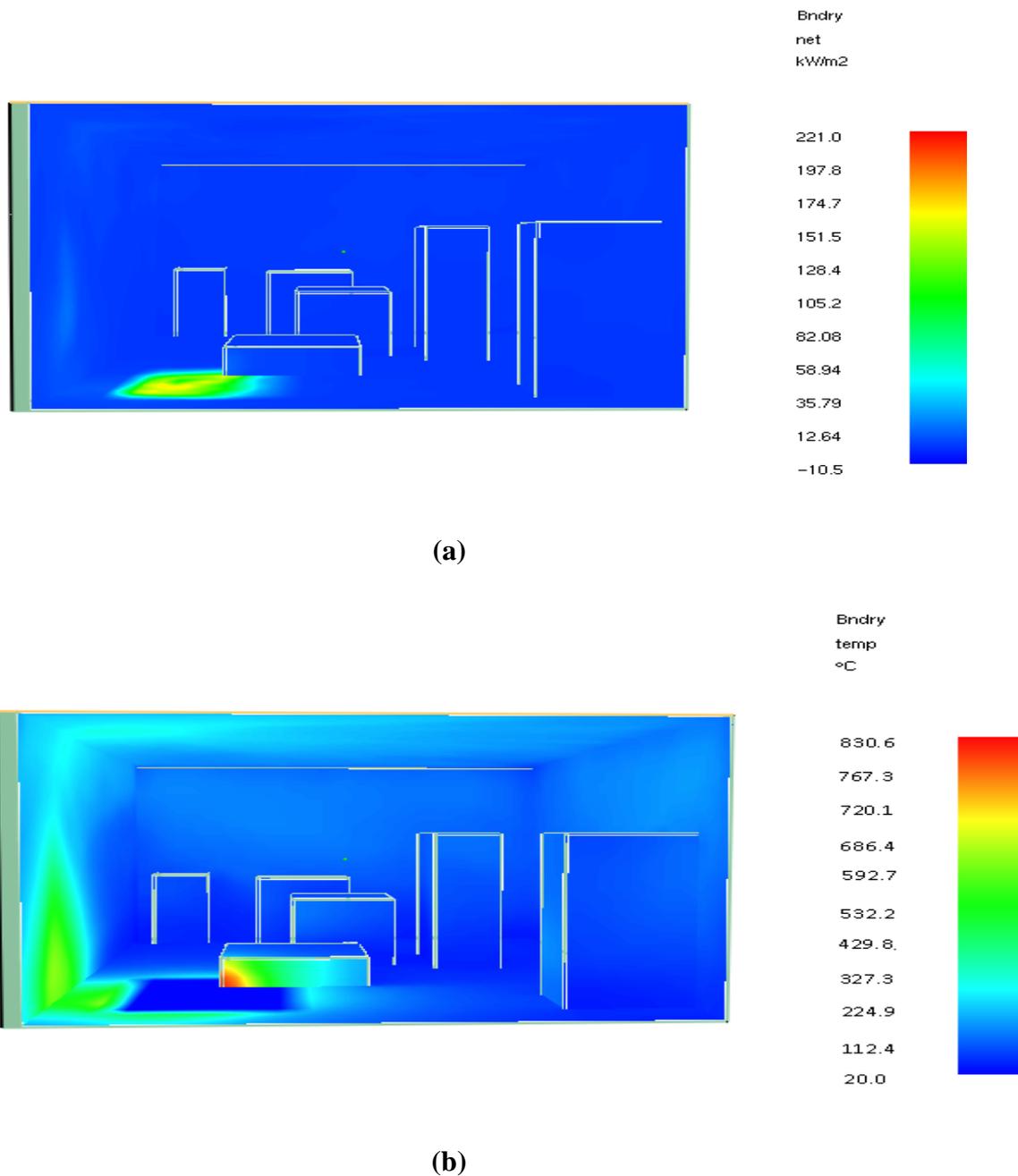


Figure 30 : Résultat de la simulation des parois après application de la fibre de verre : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

C-Avec verre cellulaire

Pour une épaisseur de 10 cm de verre cellulaire sur l'équipement de notre étude, les résultats de la simulation numérique montrent une baisse considérable de la température des parois jusqu'à 672,3°C, le flux de chaleur est de 40,88KW/m² (Figure 31).

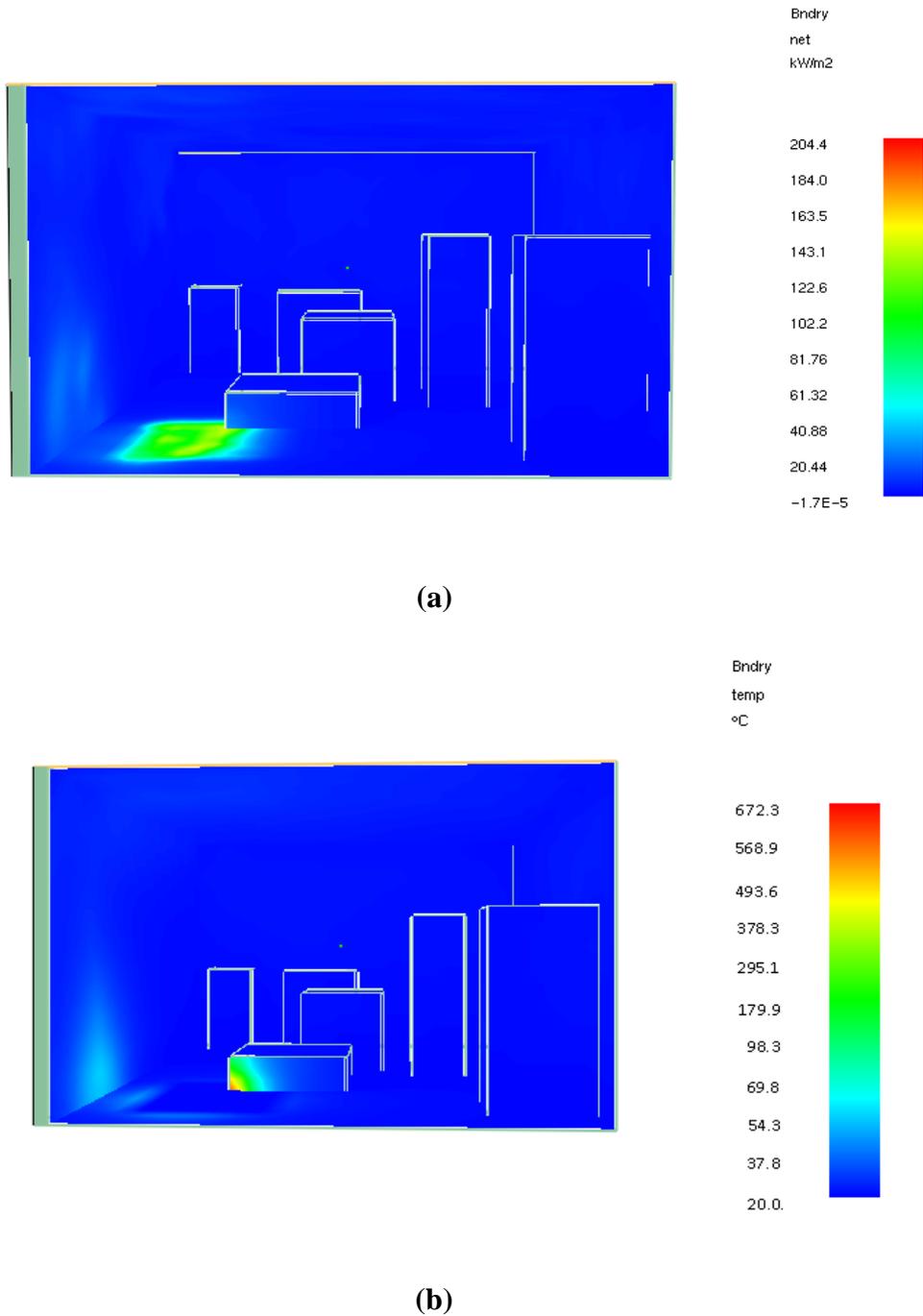


Figure 31 : Résultat de la simulation des parois après application du verre cellulaire : (a) flux de chaleur, (b) la température après 80s.

3.2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à partir de la simulation FDS Pyrosim sont discutés et comparés en fonction du flux thermique et de la température de la paroi obtenus à la fois pour l'acier sans protection passive et pour les équipements revêtus.

Les figures 31 et 32 montrent les valeurs du flux de chaleurs reçues et la température des parois des équipements. Il s'avère que l'équipement adjacent à la source d'incendie reçoit un flux de chaleur maximal et que la température de la paroi est proche ou supérieure à la valeur seuil spécifiée.

Par conséquent, l'équipement est soumis à une résistance à la traction, ce qui peut entraîner une défaillance structurelle de l'acier.

L'application de la protection passive réduit d'une manière significative les deux paramètres de notre étude, en général, la plupart des matériaux ont démontré une réduction d'environ 40 à 50 % du flux de chaleur lorsque les revêtements de la protection passive sont appliqués sur de l'acier de construction (Tableau 10).

La réduction la plus significative du flux de chaleur s'est produite lorsque des revêtements en époxy et en fibre de verre sont appliqués à l'équipement, nous avons remarqué une baisse de 50% du flux de chaleur avec époxy comme revêtement (Tableau 10).

La température de la paroi de l'équipement est examinée pour déterminer la capacité de divers types de revêtement à maintenir la température de la paroi en dessous du point critique. L'étude montre que le verre cellulaire a une grande capacité à maintenir la température des parois structurelles inférieures à celles des autres revêtements, une diminution de 39,38% a été constatée.

Revêtements	Efficacité du revêtement (%)	
	Flux de chaleur	Température des parois
Epoxy	50,1	23,5
Fibre de verre	50,8	25,11
Verre cellulaire	43,8	39,38

Tableau 10 : L'efficacité du revêtement.

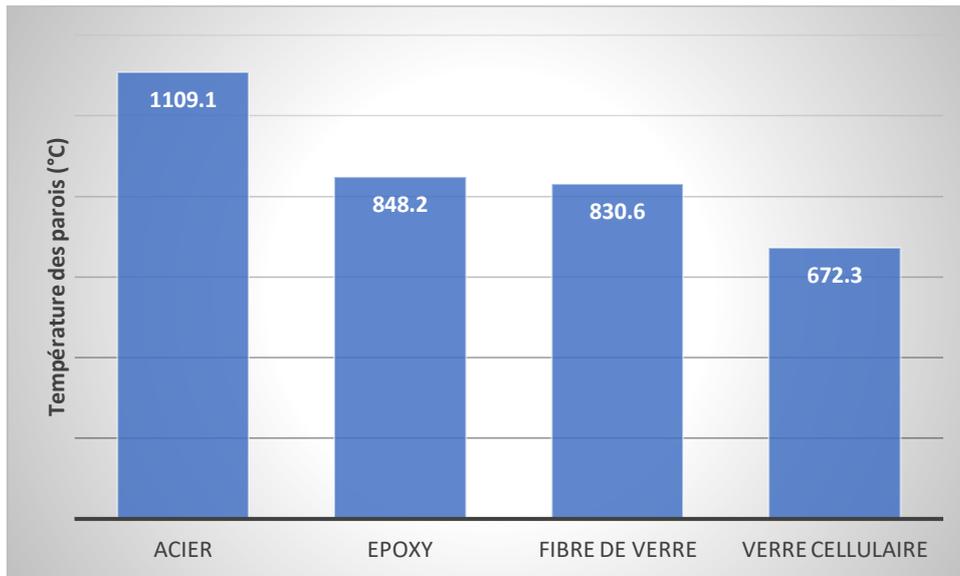


Figure 32 : Température des parois en fonction du revêtement.

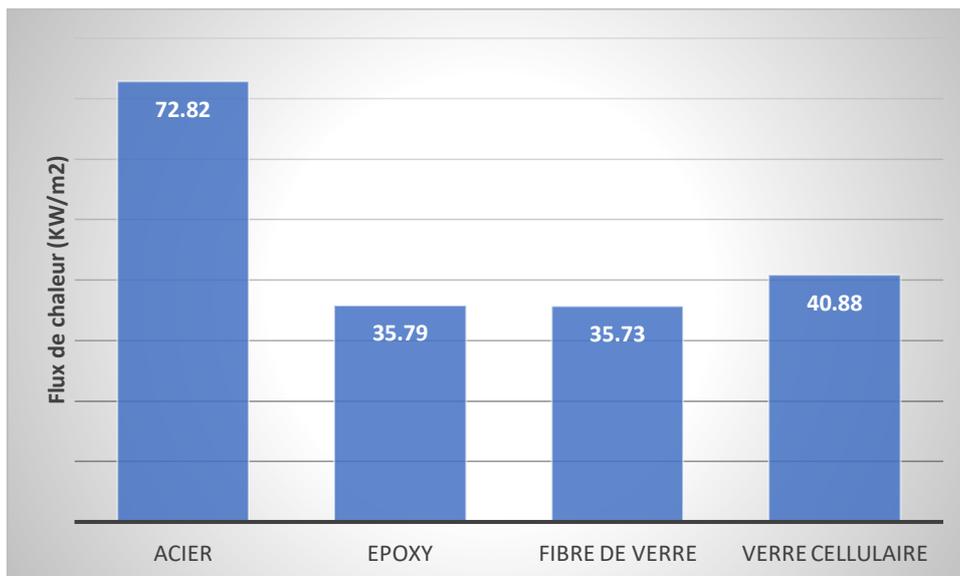


Figure 33 : Flux de chaleur en fonction du revêtement.

4. Conclusion

Dans cette étude, l'utilisation du logiciel FDS/Pyrosim nous a permis d'évaluer l'efficacité de plusieurs revêtements de la protection passive contre l'incendie. L'étude a montré une baisse considérable du flux de chaleur et de la température des parois après l'application de la protection passive. La meilleure performance est attribuée à l'époxy et la

fibre de verre grâce à leur capacité à absorber le flux de chaleur causé par l'incendie, l'abaissement est d'environ 50%.Cependant, le verre cellulaire présente une meilleure performance pour l'abaissement de 39% de la température des parois par rapport à la température de l'équipement sans protection.

CONCLUSION GENERALE

L'efficacité de la protection passive contre l'incendie est déterminée en fonction de sa capacité à protéger une structure contre l'élévation de température et la capacité à empêcher l'absorption de la charge thermique. L'évaluation de la température du mur et de la charge thermique sur l'équipement après l'incendie peut déterminer si la protection passive contre l'incendie appliquée peut empêcher avec succès une élévation de température à la température critique du matériau de structure.

A cet effet, nous avons proposé un scénario d'incendie causé par un feu d'hydrocarbure dans une zone contenant plusieurs équipements. Ce scénario a fait l'objet d'une simulation par le logiciel Pyrosim/FDS.

Sans la protection passive contre l'incendie, les équipements sont soumis à un risque de défaillance car ils ont à la fois, dépassé ou proches des seuils de rayonnement thermiques et de température. Par conséquent, divers systèmes PFP sont modélisés et appliqués à l'équipement pour réduire le rayonnement reçu par l'équipement et l'élévation de température.

Les résultats de simulation ont montré une baisse considérable des deux paramètres étudiés et que l'efficacité de la protection est satisfaisante pour les trois systèmes de protection étudiés.

Néanmoins, l'époxy intumescent et la fibre de verre présente de meilleures performances concernant l'abaissement du flux de chaleur reçu par l'équipement. Le verre cellulaire possède une meilleure protection contre l'élévation des températures des parois de l'équipement.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. SCHOONBAERT. Fire safety engineering une solution pour le futur.
- [2] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie, <http://www.aresu.be/>, Helid Aresu de Seui.
- [3] Sobane. Fiche 1 d'observation le triangle du feu et les principes d'extinction 2004.
- [4] thèse SEKKIOU SOUMAYA. Etude de comportement des poteaux mixte (acier-béton) compte tenu d'une exigence au feu.
- [5] L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre Projet DIFISEK Partie 1: Actions thermiques et mécaniques PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Grand Duché du Luxembourg
- [6] Loïc Thomas Guy Archambault .sécurité incendie Collection Mémentos acier .Nouvelle édition 2005.
- [7] Eurocode 1. Bases du calcul.et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures —Actions sur les structures exposées au feu. Décembre 1997.
- [8] B. ZHAO. Projet DIFISEK Partie 3: Comportement mécanique au feu. CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France
- [9] Ir Jean-François Denoël. Sécurité incendie et constructions en béton Choix du béton, FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge.
- [10] Eurocode 2. Calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale Partie 1-2 : Règles générales, Calcul du comportement au feu Février 2001
- [11] Eurocode 3.Calcul des structures en acier et document d'application nationale Partie 1-2: Règles générales - Calcul du comportement au feu.
- [12] Timothy Mark Jennings .UT Fire a Preprocessor for SAFIR2007, for Analysis of Heat Transfer for Structural Members Exposed to Fire. The University of Texas at Austin December 2009.
- [13] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [14] Quintiere, J.G., Principles of Fire Behavior, Del Mar Publishers, Albany, NY, 1998.
- [15] Cullis, C.F., and Hirschler, M.M., The Combustion of Organic Polymers, Clarendon Press, Oxford, UK, 1981.
- [16] Aseva, R.M., and Zaikov, G.E, Combustion of Polymer Materials, Hanser, New York, 1985.
- [17] Nelson, G.L., ed., Fire and Polymers: Hazards Identification and Prevention, ACS

Symposium Series 425, American Chemical Society, Washington, DC, 1990.

[18] Babrauskas, V., and Grayson, S.J., eds., Heat Release in Fires, Elsevier Applied Science, New York, 1992.

[19] Le Bras, M., Camino, G., Bourbigot, S., and Delobel, R., Fire Retardancy of Polymers: The Use of Intumescence, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1998.

[20] Horrocks, A.R., and Price, D., eds., Fire Retardant Materials, Woodhead Publishing, Ltd., Cambridge, UK, 2001.

[21] Friedman, R., Principles of Fire Protection Chemistry and Physics, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1998. 3.46 CHAPTER THREE

[22] Troitzsch, J., International Plastics Flammability Handbook, 2nd edition, Carl Hanser, Munich, Germany, 1990.

[23] Grand, A.F, Wilkie, and C.A., eds., Fire Retardancy of Polymeric Materials, Marcel Dekker, Inc., NY, 2000.

[24] Landrock, A.H., Handbook of Plastics Flammability and Combustion Toxicology, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1983.

[25] Fire, F.L., Combustibility of Plastics, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

[26] Pal, G., and Macskasy, H., Plastics: Their Behavior in Fires, Elsevier, New York, 1991.

[27] Nelson, G.L., ed., Fire and Polymers II: Materials and Tests for Hazard Prevention, ACS Symposium Series 599, American Chemical Society, Washington, DC, 1995.

[28] Glassman, I., Combustion, 3rd edition, Academic Press, New York, 1996.

[29] Turns., S.R., An Introduction to Combustion—Concepts and Applications, McGraw-Hill, New York, 1996.

[30] Strehlow, R.A., Combustion Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1984.

[31] Flammability of Plastic Materials, UL 94 Section 2 (Horizontal: HB) and Section 3 (Vertical: V-0/1/2), Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, IL, 1991.

[32] Babrauskas, V., and Peacock, R.D., “Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard,” Fire Safety Journal, 18: 255–272, 1992.

[33] Cours de bois de V. Eyraud (IUT GC, UJF - Grenoble 1)

[34] Transparents du cours de Construction Bois de F. Duprat (INSA Toulouse).

[35] « Règles pour la conception des torches couramment implantées dans l’industrie » pétrolière. American Petroleum Institute. API RP 521. 1990.

- [36] « Les accidents de gaz liquéfiés (Le BLEVE) » Rapport GESIP n° 91/05, 1991.
- [37] Mróz K, Hager K, Korniejenko K. Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing. *Procedia Engineering* 151 (2016) 284 – 291.
- [38] Kumar D, Alam A Zou P, Sanjayan G, Memon R. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (2020) 110038.
- [39] Abu-Jdayil B, Mourad A-H, Hittini W, Hassan M, Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview. *Construct Build Mater* 2019;214:709–35.
- [40] Villasmil W, Fischer LJ, Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;103:71–84
- [41] Gao H, et al. A novel inorganic thermal insulation material utilizing perlite tailings. *Energy Build* 2019;190:25–33.
- [42] Asdrubali F, D’Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies* 2015;4:1–17.
- [43] Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov KV. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Build Acoust* 2012;19(4):283–312.
- [44] Schiavoni S, D’Alessandro F, Bianchi F, Asdrubali F. Insulation materials for the building sector: a review and comparative analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;62:988–1011.
- [45] Zhao C, Wang P, Wang L, Liu D. Reducing railway noise with porous soundabsorbing concrete slabs. *Advances in Materials Science and Engineering* 2014: 1–11.
- [46] Zhang P, Wang K, Li Q, Wang J, Ling Y. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. *Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120896.
- [47] Davidovits J. Properties of geopolymer cements. In: *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine. 1994a.
- [48] Papias D, Balomenos E, Sakkas K. *The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*,

2015;423–461.

[49] Haper C. Handbook of building materials for fire protection. Mc Graw Hill. 2004.

[50] Zybina O. Gravt M. Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials. Springer. 2020.

[51] R. Connolly, The Spalling of Concrete in Fires. PhD Thesis, The University of Aston in Birmingham, 1995.

[52] C. Han, Y. Hwang, S. Yang, N. Gowripalan, Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement Concrete Res. 35 (2005) 1747–1753.

[53] I. Hager T. Zdeb K. Krzemie, The impact of the amount of polypropylene fibres on spalling behaviour and residual mechanical properties of Reactive Powder Concrete, MATEC Web of Conferences 6 (2013).

[54] P. Conroy, U. Sorathia, Fireproof barrier system for composite structure, US5270105 A patent, 1993.

[55] EN 1363-1:201, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements, CEN, 2012.

[56] Introduction FDS/SMV, Application: Simulation de la flame de premelange dans un tunnel, Présenté par: R. RANANE, Proposé et dirigé par: O. Sero-guillaume.

[57] FDS and Smokeview introduction.en.fr.

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

[59] Forney, Glenn January 18, 2017. Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics

Simulation Data Volume II: User's Guide, Sixth Edition. Gaithersburg, Maryland, USA. NIST Special Publication 1017-2.

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

[61] Manhattan, 2019, PyroSim User Manual, Suite B, KS 66502 USA.

[62] Jia Wui Lim a, Til Baalisampang a, Vikram Garaniya a, Rouzbeh Abbassi b, Faisal Khan , Jie Ji d, 2019. Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. Journal of loss prevention in the process industries. 62. 103970.

[63] Spitzenberger, C., Johnson, C., Le, M., Mshelia, A., Pitblado, R., 2016. Strike the right balance between active and passive fire protection. Chem. Eng. Prog. 112, 61–68.

[64] Outinen, J., Mäkeläinen, P., 2004. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down. Fire Mater. 28, 237–251.

[65] Tugnoli, A., Cozzani, V., Di Padova, A., Barbaresi, T., Tallone, F., 2012. Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: a risk-based strategy. Reliab. Eng. Syst. Saf. 105, 25–35.