الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

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

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle
Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

SIMULATION DE L'INCENDIE DANS UNE INSTALLATION INDUSTRIELLE PAR FDS

Présenté et soutenu publiquement par :

Mme. Benaissa Hafida

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme. Benomar Fatima	Pr.	IMSI	Président
Mme. Serat Fatima Zohra	MCB	IMSI	Encadrante
Mme. Derias Fatma Zohra	MCA	IMSI	Examinateur

Année 2025/2026

Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse des risques d'incendie associés à un réservoir de stockage de gazoline au sein du complexe GL2/Z de SONATRACH. L'étude repose sur une simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS) afin de modéliser un scénario d'incendie et d'évaluer ses conséquences potentielles. Plusieurs méthodologies d'analyse des risques ont également été appliquées, dans le but d'identifier les sources de danger et les scénarios accidentels critiques. Les résultats ont mis en évidence les effets potentiels de l'incendie sur les équipements, le personnel et l'environnement. Ils ont également souligné l'importance des systèmes de prévention et de protection pour limiter la propagation de l'incendie et réduire ses conséquences. L'étude se conclut par des recommandations visant à renforcer la sécurité industrielle et à améliorer la gestion des risques au sein du complexe GL2/Z.

Mots-clés : Gazoline, Incendies Industriels, GL2/Z, SONATRACH, FDS, Analyse Préliminaire des Risques (APR), HAZOP, Arbre des Causes, Analyse des Risques, Sécurité Industrielle.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تحليل مخاطر الحرائق المرتبطة بخزان تخزين الجازولين بمركب **GL2/Z** التابع لشركة **سوناطراك** . اعتمدت الدراسة على المحاكاة العددية باستخدام برنامج **FDS** لنمذجة سيناريو حريق وتقييم آثاره المحتملة. كما تم تطبيق عدة منهجيات لتحليل المخاطر، لتحديد مصادر الخطر والسيناريوهات الحرجة. أظهرت النتائج التأثيرات المحتملة للحريق على التجهيزات والأفراد والبيئة. كما أبرزت أهمية أنظمة الوقاية والحماية في الحد من انتشار الحرائق وتقليل آثارها. وتُختتم الدراسة بتوصيات تهدف إلى تعزيز السلامة الصناعية وتحسين إدارة المخاطر داخل مركب **GL2/Z**.

الكلمات المفتاحية :الجازولين، الحرائق الصناعية، GL2/Z، سوناطراك، FDS، APR، HAZOP، تحليل المخاطر، السلامة الصناعية.

ABSTRACT:

This thesis addresses the analysis of fire risks associated with a gasoline storage tank at the GL2/Z complex of SONATRACH. The study is based on numerical simulation using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software to model a fire scenario and assess its potential consequences. Several risk analysis methodologies were also applied, in order to identify hazard sources and critical accident scenarios. The results highlighted the potential effects of fire on equipment, personnel, and the environment. They also emphasized the importance of prevention and protection systems in limiting fire propagation and reducing its consequences. The study concludes with recommendations aimed at enhancing industrial safety and improving risk management within the GL2/Z complex.

Keywords: Gasoline, Industrial Fires, GL2/Z, SONATRACH, FDS, Preliminary Risk Analysis (PRA), HAZOP, Fault Tree Analysis, Risk Analysis, Industrial Safety.

.

REMERCIMENT

Je loue et remercie Allah, le Très-Haut, d'une louange abondante, bonne et bénie, Lui qui m'a accordé la santé, la force et la détermination, et qui m'a permis d'achever ce travail et de le mener à son terme.

J'exprime également ma profonde gratitude à mon encadrante, ***Docteure Serat Fatima Zohra***, qui n'a cessé de me guider par ses précieux conseils et ses orientations pertinentes tout au long de la préparation de ce mémoire. J'apprécie grandement les connaissances qu'elle m'a transmises, ainsi que sa patience, son attention et son suivi constant, qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

J'exprime également ma profonde reconnaissance et mon estime aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de discuter et d'évaluer ce mémoire, et pour leurs observations pertinentes et leurs suggestions constructives qui ont permis de l'enrichir et de l'améliorer.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au Département Santé, Sécurité et Environnement (HSE) de la société Sonatrach pour sa bienveillante collaboration, pour les informations et les données mises à ma disposition, qui ont considérablement enrichi cette étude. Je remercie tout particulièrement mon amie chère ***Benchenine Sihem*** pour son aide précieuse, son soutien constant et ses encouragements permanents tout au long de ce parcours.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, par un mot aimable, un conseil ou un geste de soutien.

Louange à Allah, Seigneur de l'Univers, conformément à Sa parole, Exalté soit-Il : « Et que l'homme n'a que ce qu'il a acquis. » (Sourate An-Najm, verset 39)

DEDICACE

À moi-même, À celle qui a continué d'avancer malgré toutes les difficultés, à toutes ces longues nuits passées entre la fatigue, les larmes et l'espoir. Après dix-huit années d'études et d'efforts, je peux aujourd'hui dire avec fierté : **je l'ai fait.**

***À ma mère,* « Omi El Jamila »**, qui ne m'a jamais laissé abandonner et qui m'a toujours poussée à donner le meilleur de moi-même. Merci pour tes efforts sans limites, tes sacrifices inestimables et tes prières qui ont été mon soutien à chaque étape.

À ma chère mère qui nous a quittés pour rejoindre son Seigneur, qu'Allah lui accorde Sa vaste miséricorde et l'accueille dans Son Paradis. J'espère que tu peux me voir aujourd'hui et dire avec fierté : **« Ma petite fille est devenue ingénieure. »**

À mon père, qui ne s'est jamais mis en travers de mon chemin, qui a toujours veillé sur moi et sur mon bien-être, et dont la confiance a été l'une des raisons de ma réussite.

À mon cher frère Nouredinne, mon bouclier protecteur et mon soutien dans la vie. Merci d'avoir toujours été à mon écoute, et pour la force et la sérénité que tu m'as données simplement en sachant que tu étais toujours à mes côtés.

À ma chère sœur Assia, qui a toujours été le refuge vers lequel je pouvais revenir, et la véritable amie que j'ai trouvée dans ce monde.

À la personne spéciale dans ma vie, merci pour la joie que tu as apportée à mes jours, pour ton soutien, ta présence et ta compagnie, et pour avoir rendu les journées plus légères et plus faciles.

À tous les fils et filles de ***El Abassi***, à tous mes cousins et cousines, et plus particulièrement à ma cousine ***Amina*** et son mari.

À toute ma famille

À tous ceux qui m'aiment, qui m'ont souhaité le meilleur et qui ont cru en moi.

Je vous dédie le fruit de ce modeste travail avec toute ma gratitude, mon affection et mon respect.

SOMMAIRE

REMERCIMENT ..... ***iii***
DEDICACE ..... ***iv***
SOMMAIRE ..... ***v***
LISTE DES FIGURES ..... ***viii***
LISTE DES TABLEAUX ..... ***ix***
LISTE DES ABREVIATIONS ***1***
LISTE DES SYMBOLES ***1***
INTRODUCTION GENERALE ***1***
CHAPITRE I : GENERALITES ET ANALYSE DES INCENDIES INDUSTRIELS ***3***
I.1 Introduction 4
I.2 Généralités sur l'incendie : 4
I.2.1 Définition de l'incendie : 4
I.2.2 Conditions d'apparition : 4
..... 5
I.2.3 Types de la combustion : 6
I.3 limites et conditions de l'incendie : 7
I.3.1 Températures et limites d'inflammabilité (LIE/ LSE) : 7
I.3.2 Influence de l'oxygène, de la température et de la pression : 8
I.3.3 Conditions d'extinction et d'arrêt de la combustion 9
I.4 Phénomènes d'oxydation et aspects énergétiques : 10
I.4.1 Processus d'oxydation des hydrocarbures : 10
I.4.2 Dynamique et propagation des incendies industriels 11
I.4.3 Pouvoir calorifique et intensité des feux industriels : 12
I.5 Retour d'expérience (REX) et Analyse générale incidents industriels 13
I.5.1 Présentation synthétique des incendies industriels 13
I.5.2 Causes principales identifiées à partir des REX 14
I.5.3 Conséquences (humaines, matérielles, environnementales) 15
I.6 Analyse générale des incendies industriels 16
I.6.1 Synthèse des facteurs de risque majeurs : 17
I.6.2 Les phénomènes physico-chimiques et incidents réels 18
I.6.3 Intérêt de la simulation numérique pour l'analyse des scénarios incendie 19
I.7 Conclusion 20
CHAPITER II : PRESENTATION DU COMPLEXE GL2Z-SONATRACH ***21***
II.1 Introduction 22
II.2 Présentation du complexe GL2/Z : 22
II.2.1 Historique de complexe GL2/Z : 22

II.2.2 Situation géographique du complexe : 22
II.2.3 Objet du complexe : 23
II.2.4 Fiche technique du GL2/Z : 23
II.2.5 Cadre réglementaire et normatif : 23
II.3 L'organigramme général du complexe GL2/Z : 26
II.3.1 Service de la Direction du Complexe 26
II.3.2 Départements Centraux 27
II.3.3 Sous-Direction Exploitation 27
II.3.4 Sous-Direction Personnel : 27
II.3.5 Département Maintenance : 27
II.3.6 Département Hygiène, Sécurité et Environnement (HSE) : 28
II.4 Différentes unités du complexe GL2Z : 28
II.4.1 Zone des Utilités : 28
II.4.2 Zone de Procédé : 30
II.4.3 Zone de Stockage et de Chargement 31
II.5 Aspect de sécurité : 32
II.5.1 Identification et Mouvement du Personnel 32
II.5.2 Sources de Feu et Interdictions 32
II.5.2 Protection Individuelle (EPI) 32
II .5.3 Autorisations de Travail et Permis 33
II.5.4 Plan d'Alerte et Gestion des Urgences 33
II.6 Les systèmes de sécurité 34
II.6.1 Détection (Protection Active) 34
II.6.2 Analyse et Contrôle Centralisé : 34
II.6.3 Systèmes d'Extinction et de Lutte Contre l'Incendie 35
II.6.4 Autres Barrières de Sécurité 36
II.7 Contexte du Risque Incendie dans le Complexe GL2/Z : 36
II.7.1 Types de produits manipulés : 36
II.7.2 Sources potentielles d'incendie et scénarios majeurs : 36
II.7.3 Zones à risque élevé : 37
II.8 Conclusion 38
CHAPITRE III : MODELISATION SOUS FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS) 39
III.1 Introduction 40
III.1.2 Méthodologie générale adoptée 40
III.2 Description de l'installation et de l'environnement : 41
III.2.1 Description détaillée du bac de gazoline : 41
III.2.2 Description des installations environnantes : 43
III.2.3 Description de l'environnement extérieur et conditions naturelles 45
III.3 Identification des dangers et des risques liés aux bacs de stockage de gazoline : 46

III.3.1 Propriétés physico-chimiques de gazoline : 46
III.3.2 Propriétés Physico-Chimiques du Mélange Hypothétique d'Essence : 46
III.4 Présentation de l'outil de simulation Fire Dynamics Simulator (FDS) : 47
III.4.1 Définition du FDS : 47
III.4.2 Principes Physiques Fondamentaux 47
III.4.2 Choix du Fire Dynamics Simulator (FDS) pour la modélisation : 47
III.4.3 Domaines d'application en sécurité industrielle et HSE : 49
III.5 Définition et développement des scénarios d'accident 50
III.5.1 Démarche de sélection des scénarios 50
III.7 Analyse et évaluation des risques 51
III.7.4 Étude HAZOP du Bac de Stockage de Gazoline 55
III.7.5Arbre des causes de l'incendie de nappe dans le bac de gazoline 56
III.7 analyses de l'incendie par le FDS software 58
III.7.2 Description de Scénario 58
III.5.3 Choix de scénario : 59
III.5.4 Incendie /Feu suite à un déversement important dans le bac de gazoline 59
III.6 Paramètres d'entrée du modèle FDS pour le scénario principal 59
6.2 Résultats des simulations 62
6.2.1 Évolution temporelle du feu (HRR, température, panache de fumée) 62
II.6.2 Flux thermiques (radiatifs et convectifs) et distances d'effets 65
III.6.3 Effets sur les équipements environnants 67
III.6.4 Impact sur les populations avoisinantes 68
III.6.5 Impact environnemental et qualité de l'atmosphère 70
III.6.6Analyse de sensibilité 72
III.8 Synthèse et maîtrise des risques 74
III.8.1 Synthèse des résultats des simulations et de l'analyse des risques 74
III.8.2 Analyse des barrières de sécurité existantes 75
III.8.3 Recommandations et mesures de maîtrise des risques 76
III.9 Conclusion 78
CONCLUSION GENERALE 79
BIBLIOGRAPHIE 81
Annexes 82

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Tétraèdre du feu 5
Figure 2 : Influence d'oxygène sur les limites d'inflammabilité 7
Figure 3 : Organigramme zone ADM du complexe GL2/Z. 26
Figure 4 : Service de la Direction du Complexe 26
Figure 5 : Schéma du procédé de liquéfaction du GNL 31
Figure 6: les bacs de gazoline 2130-FA et 2130-FB 41
Figure 7 : Légende de la Figure 42
Figure 8 : Localisation des bacs de gazoline et des installations environnantes 44
Figure 9 : localisation géographique du site de GL2Z 45
Figure 10 : Etapes de la Démarche de sélection des scénarios 50
Figure 11 : arbre des causes 57
Figure 12: évolution du HRR 62
Figure 13: Distribution spatiale de la température et développement du panache de fumée à t = 174 s (simulation FDS – Smokeview) 63
Figure 14: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈ 0.9s (simulation FDS) 63
Figure 15: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈ 5,4s (simulation FDS) 64
Figure 16: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈14,4s (simulation FDS) 64
Figure 17: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈96,3s (simulation FDS) 65
Figure 18: évolution du flux thermique 65
Figure 19: Évolution des puissances radiative et convective 67
Figure 20: Répartition spatiale de la visibilité dans le panache de fumée t ≈30,1s (simulation FDS) 69
Figure 21: Évolution de la concentration de monoxyde de carbone (CO) 70
Figure 22: évolution de la concentration en oxygène (O2) 71
Figure 23: Évolution temporelle de la concentration en vapeur d'eau (H2O) 71
Figure 24: Évolution temporelle de la fraction massique de suies (Soot) 72
Figure 25: Propagation du panache de fumée (Smokeview) 73
Figure 26: Développement de l'incendie et géométrie des flammes au-dessus de la zone de déversement 74
Figure 27 : Configuration géométrique et matérielle du scénario FDS. 83
Figure 28 : Configuration de la zone de déchets, de la torchère et des espèces combustibles. 83
Figure 29 : Configuration de la combustion, des capteurs et des paramètres de sortie. 84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des principaux incendies industriels 1950-2020 13
Tableau 2: fiche technique du complexe GL2/Z. 23
Tableau 3: Réglementation Algérienne sur le Stockage d'Hydrocarbures 23
Tableau 4: réglementation algérienne en matière HSE 24
Tableau 5: Conditions normales de stockage 41
Tableau 6: Propriétés physico-chimiques de gazoline 46
Tableau 7: Propriétés Physico-Chimiques du Mélange Hypothétique d'Essence 46
Tableau 8: étude par la méthode APR sur les dangers liés à la conception et à la construction du bac 51
Tableau 9 : étude par la méthode APR sur les dangers liés aux opérations 52
Tableau 10: étude par la méthode APR sur les dangers externes 53
Tableau 11: Etude HAZOP du bac de stockage de gazoline. 55
Tableau 12: Caractéristiques du bac et du déversement 59
Tableau 13: Conditions environnementales du site 60
Tableau 14: Caractéristiques du déversement de gazoline 60
Tableau 15: Caractéristique de la surface de la cuvette 60
Tableau 16: Éléments structuraux a modélisés 61
Tableau 17: Paramètres géométriques et matériaux des installations modélisées 61
Tableau 18: Dispositifs de mesure (Devices) et sorties 62
Tableau 19: Distances d'effets thermiques selon les seuils critiques 66
Tableau 20: critères couramment utilisés en sécurité industrielle : 67
Tableau 21: Hiérarchisation de la vulnérabilité des équipements 68

LISTE DES ABREVIATIONS

API : American Petroleum Institute
CAF : Compressed Air Foam
CO : Monoxyde de carbone
CO2 : Dioxyde de carbone
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
FDS : Fire Dynamics Simulator
H2O : Eau (vapeur d'eau)
HAZOP : Hazard and Opérabilité Study
HRR : Heat Release Rate (taux de dégagement de chaleur)
HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
kW : Kilowatt
kW/m² : Kilowatt par mètre carré
kWh : Kilowattheure
LES : Limite Supérieure d'Explosivité
LIE : Limite Inférieure d'Explosivité
LOPA : Layer of Protection Analysis
N2 : Azote
NFPA : National Fire Protection Association
O2 : Oxygène
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
PHA : Preliminary Hazard Analysis
REX : Retour d'Expérience

LISTE DES SYMBOLES

ΔH	Variation d'enthalpie de réaction
H•	Radical hydrogène
O•	Radical oxygène
OH•	Radical hydroxyle
v	Vitesse de réaction
k	Constante de vitesse
b	Exposant de réaction
t	Temps par Second
J/kg	Énergie massique par Joule par kilogramme
MJ/kg	Pouvoir calorifique massique par Mégajoule par kilogramme
MW	Puissance thermique par Mégawatt
m^3	Volume par Mètre cube
% vol	Concentration volumique Pourcentage volumique
°C	Degré Celsius

INTRODUCTION GENERALE

Les incendies industriels constituent l'un des risques majeurs auxquels sont confrontées les installations de stockage et de traitement des hydrocarbures. La présence de substances inflammables, telles que la gazoline, associée à des conditions d'exploitation parfois complexes, peut conduire à des accidents aux conséquences humaines, matérielles, environnementales et économiques importantes. Dans ce contexte, l'identification et l'évaluation des risques représentent des éléments essentiels pour garantir la sécurité des installations industrielles et assurer la continuité des activités.[1], [2]

L'analyse des risques industriels constitue une étape essentielle dans la maîtrise des dangers associés aux installations à haut risque. À cet effet, plusieurs méthodes qualitatives sont couramment utilisées, notamment l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'étude HAZOP ainsi que l'Arbre des Causes. Ces méthodes permettent d'identifier de manière systématique les dangers potentiels, les défaillances susceptibles de survenir et les scénarios accidentels pouvant affecter la sécurité des installations. Toutefois, bien qu'elles soient particulièrement efficaces pour l'identification et l'évaluation qualitative des risques, elles demeurent limitées lorsqu'il s'agit de décrire avec précision les phénomènes physiques complexes associés à un incendie et d'en quantifier les conséquences sur les équipements, les personnes et l'environnement.

Dans le contexte des bacs de stockage de gazoline, les phénomènes de combustion, de propagation des flammes, de transfert thermique et de rayonnement jouent un rôle déterminant dans l'évolution d'un sinistre et dans l'ampleur de ses impacts. La compréhension approfondie de ces phénomènes nécessite le recours à des outils complémentaires capables de reproduire leur comportement de manière réaliste. Dès lors, la problématique de ce mémoire peut être formulée comme suit : Comment renforcer les méthodes qualitatives d'analyse des risques par l'intégration d'outils de simulation numérique afin d'améliorer l'évaluation des conséquences d'un incendie de gazoline et d'estimer avec davantage de précision ses impacts sur les installations industrielles ?

Afin de répondre à cette problématique, ce travail repose sur l'hypothèse selon laquelle l'intégration de la simulation numérique, à travers le logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS), en complément des méthodes qualitatives traditionnelles d'analyse des risques, permet une meilleure représentation des phénomènes physiques liés à l'incendie et une évaluation plus précise de leurs conséquences. En effet, la modélisation numérique offre la possibilité de reproduire de manière dynamique l'évolution d'un incendie, d'analyser la distribution des températures, la propagation des fumées, les flux thermiques radiatifs et convectifs ainsi que les effets potentiels sur les structures environnantes. Cette approche contribue ainsi à une identification plus rigoureuse des zones vulnérables et à l'élaboration de mesures de prévention, de protection et d'intervention mieux adaptées aux risques encourus.[3]

Pour atteindre les objectifs fixés, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux fondements théoriques relatifs aux incendies industriels, en présentant les mécanismes de combustion, les différents types d'incendie ainsi que les principaux phénomènes thermiques qui les caractérisent.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation du complexe GL2/Z de SONATRACH, de ses installations et des risques d'incendie associés à ses activités.

Et Le troisième chapitre est dédié à l'évaluation du risque incendie à travers l'application des méthodes APR, HAZOP et Arbre des Causes, ainsi qu'à la modélisation numérique d'un scénario d'incendie de gazoline à l'aide du logiciel FDS. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus, met en évidence les apports de l'approche adoptée et propose des recommandations destinées à renforcer la maîtrise du risque incendie au sein des installations industrielles

CHAPITRE I : GENERALITES ET ANALYSE DES INCENDIES INDUSTRIELS

I.1 Introduction

L'incendie représente l'un des risques majeurs dans les installations industrielles, capable d'engendrer des conséquences humaines, matérielles, environnementales et économiques souvent dramatiques. Dans le secteur industriel, où coexistent des quantités importantes de matières inflammables, combustibles et dangereuses, un départ de feu peut rapidement évoluer vers un sinistre majeur, notamment à travers des phénomènes de propagation rapide, de sous-ventilation ou d'effets domino. Afin de se familiariser avec les contextes terme de ce dernier ce chapitre vise à poser les bases scientifiques et techniques nécessaires à une compréhension approfondie du risque incendie.[1], [2]

I.2 Généralités sur l'incendie :

I.2.1 Définition de l'incendie :

Un incendie est une réaction de combustion non maîtrisée dans le temps et l'espace qui se propage de manière incontrôlée, plus précisément .[1]

La combustion est une réaction d'oxydation exothermique entre un combustible et un comburant. Cette réaction produit de la chaleur, de la lumière, des flammes et des produits gazeux. Il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction où le combustible réagit avec le comburant pour former des produits comme le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O) et parfois des oxydes d'azote ou des particules. [1]

I.2.2 Conditions d'apparition :

Triangle du feu : le "triangle du feu" (ou "triangle de la combustion") est un modèle conceptuel simple et fondamental en sciences du feu, utilisé pour expliquer les conditions nécessaires à l'initiation et à la propagation d'une réaction de combustion. Représentant les trois éléments indispensables à l'apparition et au maintien d'un incendie. Ces éléments sont :

Le combustible *:* est une matière ou substance capable de subir une réaction chimique exothermique (libérant de la chaleur) lorsqu'elle est exposée à une source d'ignition, produisant des flammes ou de la chaleur. Cela inclut les liquides et les solides, les gaz inflammables et combustibles.

Le comburant *:* est une substance qui, en présence d'un combustible peut initier, soutenir ou intensifier une combustion en fournissant de l'oxygène ou en facilitant une réaction d'oxydation. Il s'agit généralement de l'oxygène présent dans l'air, mais il peut aussi s'agir d'autres gaz oxydants comme le chlore ou le fluor.

La source d'énergie d'activation *:* désigne l'énergie thermique ou autre nécessaire pour initier et soutenir la réaction chimique de combustion, en fournissant la barrière d'activation

énergétique, cette chaleur est l'élément déclencheur qui élève la température du combustible au-dessus de son point d'ignition, permettant la réaction exothermique.[2]

Tétraèdre du feu : est une extension moderne du modèle du triangle du feu, proposée dans les années 1950 par des experts en sciences du feu. Il ajoute un quatrième élément essentiel pour expliquer non seulement l'initiation de la combustion, mais aussi sa propagation et sa stabilité. Ce modèle est largement utilisé en ingénierie du feu, en prévention des incendies et en chimie physique pour une compréhension plus complète des réactions exothermiques. Contrairement au triangle (combustible, comburant, chaleur), le tétraèdre inclut un quatrième côté pour représenter la dynamique de la réaction :

La réaction chimique en chaîne : (ou réaction chimique non inhibée) Processus où les radicaux libres produits par la combustion se propagent, générant plus de chaleur et de radicaux, rendant le feu auto-entretenu. Sans cette chaîne, la réaction s'éteint rapidement.

Les quatre éléments doivent être présents et interconnectés pour une combustion stable. La réaction en chaîne est cruciale car elle explique pourquoi un feu se propage sans apport externe continu de chaleur. Si l'un des éléments est supprimé, le feu s'arrête. Ce modèle s'appuie sur la cinétique chimique, où la vitesse de réaction suit des lois comme celle d'Arrhenius, et sur la thermodynamique, avec une enthalpie négative ($\Delta H < 0$). [1]



Figure 1 : Tétraèdre du feu [1]

I.2.3 Types de la combustion :

Combustion complète : la combustion complète désigne une réaction d'oxydation totale et rapide d'un combustible en présence d'un excès d'oxygène, produisant principalement du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O), avec une libération maximale d'énergie thermique et des émissions polluantes minimales.

Combustion incomplète : La combustion incomplète désigne une réaction d'oxydation partielle d'un combustible en raison d'un déficit d'oxygène, entraînant la production de sous-produits toxiques ou indésirables tels que le monoxyde de carbone (CO), du carbone solide (suie), des hydrocarbures non brûlés et d'autres gaz volatiles. Cette réaction se déroule à des températures variables, et est favorisée par une ventilation insuffisante, une vitesse de réaction lente ou des impuretés dans le combustible. Elle libère moins d'énergie thermique que la combustion complète

Combustion spontanée : La combustion spontanée désigne l'ignition d'une substance sans source de chaleur externe, due à une réaction exothermique interne lente qui accumule suffisamment de chaleur pour atteindre la température d'inflammation. Cela affecte des matériaux comme les huiles de lin ou les chiffons imprégnés d'huile, où l'oxydation lente génère de la chaleur sans étincelle.

Auto-inflammation : est l'ignition spontanée d'un mélange combustible gazeux ou liquide sous l'effet d'une élévation de température ou de pression, sans source d'ignition externe comme une étincelle ou une flamme. Elle est définie par le point d'auto-inflammation, la température minimale à laquelle la réaction d'oxydation devient auto-entretenue et rapide, dépendant de la composition chimique du combustible et des conditions environnementales.

Combustion lente est une forme d'oxydation lente et sans flamme visible, où le combustible se consume progressivement à basse température (généralement entre 300 et 600°C), produisant de la chaleur, des gaz comme le CO et le CO_2, ainsi que des résidus carbonés. Cette réaction progresse par conduction thermique à travers le matériau, sans propagation rapide, et est caractérisée par une faible vitesse de combustion et une absence de flamme ouverte. Elle est influencée par l'humidité du combustible, qui peut ralentir ou inhiber le processus, ainsi que par la ventilation et la porosité du matériau. Contrairement à la combustion complète, elle est inefficace énergétiquement et peut persister longtemps, posant des risques d'incendies cachés.

Combustion de surface : est une oxydation catalysée à la surface d'un matériau poreux, permettant une réaction uniforme et contrôlée à température modérée sans flamme ouverte.[2]

I.3 limites et conditions de l'incendie :

I.3.1 Températures et limites d'inflammabilité (LIE/ LSE) :

Le point d'éclair ou point de flash : La température de point d'éclair est la température minimale à laquelle un combustible liquide émet assez de vapeurs pour permettre une courte inflammation en présence d'une flamme. Les vapeurs s'enflamment et s'éteignent aussitôt.

Le point d'inflammation : Le point d'inflammation est la température à laquelle les vapeurs émises par un combustible liquide sont en quantité suffisante pour alimenter la combustion. Il y a non seulement allumage, mais continuation de la combustion, contrairement au point d'éclair où l'inflammation est brève et s'éteint aussitôt. Le point d'inflammation se situe généralement de quelques degrés à quelques dizaines de degrés au-dessus du point d'éclair,

Le point d'auto-inflammation : Une élévation de température peut amener le mélange combustible à sa température d'auto-inflammation. Le produit s'enflamme alors spontanément en présence d'air, sans présence de flamme ni d'étincelle. L'inflammation survient simultanément en tous les points du mélange gazeux.

Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) : La LIE est la concentration minimale (en % vol.) de gaz ou vapeur au-dessus de laquelle le mélange air-combustible peut s'enflammer ; en dessous, Le mélange est trop pauvre en combustible pour propager une flamme. Elle est mesurée à température et pression ambiantes standard

Limite supérieure d'Explosivité (LSE) : La LSE est la concentration maximale (en % vol.) de gaz ou vapeur en-dessous de laquelle le mélange peut encore s'enflammer ; au-delà, le mélange est trop riche en combustible et manque d'oxygène pour brûler. La plage entre LIE et LSE constitue la zone explosive. [4]



Figure 2 : Influence d'oxygène sur les limites d'inflammabilité [4]

I.3.2 Influence de l'oxygène, de la température et de la pression :

L'influence de l'oxygène, de la température et de la pression sur un incendie repose sur la modification de la cinétique chimique de l'oxydation. Plus ces facteurs augmentent, plus la réaction est rapide et intense.

L'Oxygène (O2) : joue un rôle central dans la combustion en tant qu'oxydant primaire, permettant la réaction chimique exothermique entre un combustible et un oxydant ; il fournit les atomes nécessaires pour briser les liaisons du combustible et former de nouvelles liaisons plus stables, libérant ainsi de l'énergie sous forme de chaleur et de lumière. Cette réaction d'oxydoréduction est essentielle, car sans oxygène, la combustion ne peut pas se produire de manière significative. La concentration en oxygène influence directement la vitesse cinétique : selon la loi de vitesse v = k [O2] ^b, une augmentation de l'oxygène accélère la réaction, rendant le feu plus intense et rapide, tandis qu'un déficit (en dessous de 15-16 %) ralentit ou arrête la combustion, favorisant une réaction incomplète avec des sous-produits toxiques comme le monoxyde de carbone. L'oxygène contrôle l'initiation, la propagation et l'efficacité énergétique de la combustion

La Température : La température est un élément fondamental dans la combustion, influençant l'initiation, la propagation et l'efficacité des réactions chimiques. Elle réduit les délais d'allumage en fournissant l'énergie d'activation nécessaire, où des températures élevées accélèrent l'inflammation. Elle affecte également la vitesse de propagation de la flamme en augmentant les collisions moléculaires et les réactions chimiques. Une température initiale plus élevée intensifie la flamme, augmentant son rayon et sa vitesse.

La température influence la stabilité de la flamme, étendant les conditions de maintien ou causant l'extinction à des niveaux trop bas. Elle détermine la formation des produits : des températures élevées favorisent CO2 et H2O (combustion complète), tandis que des températures basses produisent CO et suies. L'enrichissement en oxygène réduit les suies en augmentant la température de la flamme. Elle est un paramètre clé pour optimiser la combustion, réduire les émissions et améliorer l'efficacité énergétique.

La Pression : La pression est un facteur critique qui influence profondément les caractéristiques de la combustion, notamment la cinétique des réactions, la température de la flamme, et l'efficacité globale du processus. La pression accrue élève la vitesse de réaction et la température de l'onde de combustion, favorisant une oxydation plus efficace.

La pression stabilise la flamme, augmente sa vitesse de propagation et réduit les délais d'allumage en abaissant la barrière d'énergie d'activation, améliorant le transfert de chaleur et de masse.[4]

I.3.3 Conditions d'extinction et d'arrêt de la combustion

L'arrêt de la combustion, ou extinction, est un phénomène complexe qui dépend de l'interruption des conditions nécessaires à la réaction de combustion, combustible, comburant et énergie d'activation. L'extinction d'une flamme se produit lorsque le processus de génération de chaleur et de radicaux chimiques ne peut plus maintenir le cycle auto-entretenu de la combustion.

Plusieurs mécanismes peuvent entraîner l'arrêt de la combustion :

1. **Refroidissement (extinction thermique)**

   Le refroidissement est l'un des moyens les plus intuitifs d'éteindre une flamme. En réduisant la température des réactifs en dessous de la température d'inflammation.

   - Agents extincteurs à base d'eau : L'eau et les agents à base d'eau, tels que la mousse traditionnelle et la mousse à air comprimé (CAF), agissent principalement par refroidissement. Leurs différentes structures de bulles peuvent affecter leur efficacité thermique.
   - Barrières thermiques : Le contact d'une flamme avec une paroi froide agit comme un puits de chaleur, pouvant conduire à l'extinction thermique. C'est le principe des pare-flammes, qui empêchent la propagation des flammes à travers des canaux étroits en évacuant rapidement la chaleur.

2. **Dilution du comburant** (réduction de la concentration en oxygène)

La combustion nécessite une concentration minimale d'oxygène. En diluant l'atmosphère autour de la flamme avec des gaz inertes, la concentration d'oxygène peut être réduite en dessous du seuil critique, entraînant l'extinction.

- CO2 : Le dioxyde de carbone (CO2) est un agent extincteur couramment utilisé qui agit en réduisant la concentration d'oxygène et en refroidissant la flamme.
- N2 : L'azote (N2) est également utilisé comme agent inerte pour diluer le comburant.
- Agents extincteurs gazeux propres : Les agents extincteurs gazeux, comme les halogènes ou les agents phosphorés, en raison de leur grande efficacité.

3. **Inhibition chimique** (rupture de la chaîne de réaction)

La combustion est une réaction en chaîne radicalaire. Certains agents extincteurs agissent en interférant avec ces radicaux hautement réactifs, brisant la chaîne de réaction et arrêtant la combustion.

- Agents à base de phosphate d'ammonium : La poudre sèche à base de phosphate d'ammonium est un agent extincteur qui peut être comparé à des agents à base d'eau
- Aérogels nanométriques : Des nouveaux agents extincteurs à base d'aérogel ont montré une grande efficacité en formant une mousse au contact de la chaleur, offrant un mécanisme d'extinction spécial.

- Surfactants : L'application de surfactants dans différents agents extincteurs de batteries lithium-ion est un domaine de recherche important pour réduire les accidents d'emballement thermique.

4. **Suppression du combustible**

L'élimination ou la limitation de l'approvisionnement en combustible est une méthode directe pour éteindre un incendie. Cela peut être réalisé en fermant une vanne de gaz, en retirant les matériaux combustibles ou en utilisant des techniques comme le remblayage moussé.[1]

I.4 Phénomènes d'oxydation et aspects énergétiques :

I.4.1 Processus d'oxydation des hydrocarbures :

L'oxydation des hydrocarbures est un processus chimique fondamental qui implique la réaction d'hydrocarbures avec un agent oxydant, généralement l'oxygène, conduisant à la formation de nouveaux composés. Ce processus est au cœur de la combustion, mais il peut également se produire de manière contrôlée dans diverses applications industrielles et biologiques. L'oxydation des hydrocarbures est une réaction exothermique en chaîne qui libère une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur et de lumière.

Les mécanismes d'oxydation des hydrocarbures sont complexes et impliquent une série d'étapes élémentaires :

1. Initiation : Cette étape implique la formation initiale de radicaux libres à partir des molécules d'hydrocarbures et d'oxygène.
2. Propagation : C'est l'étape clé où les radicaux libres réagissent avec des molécules stables pour former de nouveaux radicaux, perpétuant ainsi la chaîne de réaction. Des radicaux tels que H•, O• et OH• sont très réactifs et jouent un rôle central dans la propagation de la flamme. Ces réactions se déroulent très rapidement, d'où la nature explosive de la combustion
3. Ramification de chaîne : Certaines réactions de propagation peuvent conduire à la formation de plus d'un radical libre, augmentant ainsi le nombre total de radicaux dans le système et accélérant la réaction. Ces réactions sont cruciales pour maintenir la haute réactivité et la propagation rapide des flammes
4. Terminaison : À cette étape, les radicaux libres se recombinent pour former des molécules stables, ou ils peuvent être désactivés par des surfaces solides ou par la présence d'agents inhibiteurs. La terminaison réduit la concentration de radicaux libres et ralentit la réaction, conduisant finalement à l'extinction de la flamme si la vitesse de terminaison dépasse la vitesse de propagation et de ramification

Les produits finaux de l'oxydation complète des hydrocarbures sont le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O). [4]

I.4.2 Dynamique et propagation des incendies industriels

La dynamique des incendies industriels étudie l'évolution temporelle et spatiale du feu dans des environnements à haute charge calorifique, en tenant compte des phénomènes thermiques, fluidodynamiques et chimiques qui gouvernent sa propagation.

1. **Modes de propagation du feu :**
   - La propagation par **conduction** thermique est prédominante dans les structures solides continues, la chaleur générée par un foyer initial se propage le long du support métallique par conduction
   - La propagation par **convection** implique le transport de chaleur par mouvement de fluide, remontée des fumées chaudes et gaz enflammés, transportant la chaleur vers le haut et vers les zones adjacentes via les courants d'air (canalisations, trémies, entrepôts multi-niveaux).
   - La propagation par **rayonnement** est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques, ne nécessitant aucun support matériel. Il est capable d'enflammer des matériaux combustibles situés à plusieurs mètres du foyer principal sans contact physique. Cette capacité est particulièrement critique dans les feux de jet, où la flamme projetée émet un flux radiatif intense. [1]
2. **L'influence de la configuration industrielle :**

L'influence de la configuration industrielle sur la dynamique d'un incendie est un facteur déterminant dans l'évaluation du risque et la conception de mesures de protection efficaces.

La géométrie des installations définit constitue un facteur déterminant dans la dynamique de propagation du feu, influençant directement les mécanismes de transfert thermique, la stratification des gaz chauds, la trajectoire du panache et le potentiel d'effets domino. Contrairement à une simple enveloppe architecturale, la géométrie agit comme un modulateur actif des phénomènes physiques sous-jacents à l'incendie, dictant la manière dont la chaleur, la fumée et les flammes se distribuent dans l'espace.

L'espacement entre réservoirs ou équipements combustibles constitue l'un des paramètres de conception les plus critiques en sécurité incendie industrielle, car il détermine directement la probabilité de propagation du feu par rayonnement thermique et, par conséquent, le risque d'effets domino. Ce concept repose sur un principe physique fondamental : le flux radiatif émis par une flamme décroît avec le carré de la distance qui la sépare d'une cible potentielle. Ainsi, un espacement adéquat permet de maintenir le flux incident sur un équipement voisin en dessous du

seuil critique d'inflammabilité, généralement estimé entre 10 et 20 kW/m² pour la plupart des matériaux de l'industrie.

Présence de structures métalliques omniprésente dans les installations industrielles sous forme de poutres, de supports de tuyauterie ou de chemins de câbles, introduit un mode de propagation par conduction thermique. Ces structures, ayant une conductivité thermique élevée, peuvent transporter la chaleur loin du foyer initial. L'arrangement spatial de ces chemins de câbles, leur densité et leur empilement vertical, a été démontré comme un facteur clé influençant le taux de perte de masse et la vitesse de propagation du feu 4. La conduction à travers ces structures peut ainsi créer des points d'ignition secondaires imprévus, contournant les barrières coupe-feu basées uniquement sur la séparation de l'air.

La ventilation naturelle ou forcée constitue un paramètre de conception fondamental en sécurité incendie industrielle, car elle régule directement l'apport d'oxygène au feu, déterminant ainsi son régime de combustion, son taux de dégagement de chaleur (HRR), la production de fumée et de gaz toxiques, ainsi que le risque d'embrasement généralisé. Ces deux modes de ventilation engendrent des scénarios d'incendie radicalement différents, chacun avec ses propres défis en matière de prévention et de gestion.[3]

I.4.3 Pouvoir calorifique et intensité des feux industriels :

Le pouvoir calorifique (PC) mesure la quantité de chaleur libérée par la combustion complète d'une unité de masse (kg) ou de volume m^3 de combustible, exprimée en J/kg ou kWh. Il permet d'évaluer la performance énergétique des combustibles. On distingue le PCI (vapeur d'eau non condensée) du PCS (incluant la chaleur de condensation).

- **Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) :** Quantité de chaleur libérée sans la récupération de la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans les fumées. C'est la valeur standard pour les chaudières classiques.
- **Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) :** Quantité de chaleur totale, incluant la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau. Utilisé pour les chaudières à condensation pour un meilleur rendement.
- **Unités :** Généralement exprimé en mégajoules par kilogramme MJ/kg ou kilowattheures kWh par unité de combustible.

L'intensité d'un incendie industriel est principalement caractérisée par le taux de dégagement de chaleur (Heat Release Rate – HRR), Il représente la puissance thermique dégagée par un feu, exprimée en kilowatts (kW) ou en mégawatts (MW), et est considéré comme la variable la plus importante pour déterminer la dangerosité d'un incendie, il détermine aussi le développement de l'incendie, la température atteinte et l'émission de fumées toxiques.[5]

I.5 Retour d'expérience (REX) et Analyse générale incidents industriels

L'analyse des retours d'expérience (REX) et des incidents industriels est un pilier fondamental de la gestion de la sécurité industrielle et environnementale (HSE), permettant une compréhension approfondie des causes, des conséquences et des stratégies de prévention. Ce processus vise à transformer une approche réactive de la sécurité en une démarche proactive et d'amélioration continue. Les principaux objectifs du REX sont multiples et interdépendants :

- **Identification des causes profondes :** Le REX vise à comprendre les facteurs techniques, humains et organisationnels sous-jacents qui ont contribué à un incident, plutôt que de se limiter aux causes immédiates. Cela permet d'adresser les vulnérabilités systémiques.
- **Évaluation des conséquences :** Il est crucial de quantifier et de qualifier l'ensemble des impacts d'un incident, qu'ils soient humains (blessures, décès, traumatisme psychologique), matériels (dommages aux infrastructures, pertes de production), environnementaux (pollution, contamination) ou sur la réputation de l'entreprise.
- **Formulation de recommandations :** Le processus doit aboutir à des mesures correctives et préventives concrètes, applicables et efficaces pour améliorer la sécurité des processus et éviter la répétition d'incidents similaires.
- **Amélioration continue de la culture de sécurité :** Le REX favorise un environnement où le partage des leçons est valorisé et où l'apprentissage organisationnel est intégré aux pratiques quotidiennes, renforçant ainsi la culture de sécurité [5]

I.5.1 Présentation synthétique des incendies industriels

L'analyse des retours d'expérience (REX) est essentielle pour comprendre les dynamiques des incendies industriels et améliorer la prévention des risques HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement). Les cas réels d'incendies industriels sont variés et révèlent des causes profondes, des mécanismes de propagation et des conséquences importantes.

Tableau 1 : Liste des principaux incendies industriels 1950-2020 [6]

Événements	Pays	Date	Description	Conséquences
Explosions du port de Beyrouth	Liban	4 août 2020	Explosion de 2 750 tonnes de nitrate d'ammonium	Plus de 100 décès et 4000 blessés Entre 3,8 et 4,6 milliards USD de pertes économiques.
Incendie de l'usine Lubrizol	Rouen, France	26 septembre 2019	5 000 tonnes de produits chimiques inflammables s'embrasent	Nuage de fumée de plus de 20 kilomètres
Explosion dans une usine de pesticides	Yancheng, Chine	21 mars 2019	—	78 morts et 617 blessés Pollution importante

Incendie de la tour Grenfell	Londres, Royaume-Uni	13 juin 2017	—	72 morts et 74 blessés
Explosions au port Tianjin	Tianjin, Chine	12 août 2015	Un incendie s'est déclaré dans un entrepôt qui stockait des produits dangereux et inflammables	173 morts
Explosion et incendie de quatre jours	Lac-Mégantic, Canada	6 juillet 2013	Déraillement d'un train de 70 citernes de pétrole	Destruction de 2 km² du centre de la ville
Explosion de la West Fertilizer Company	Texas, États-Unis	17 avril 2013	—	14 morts et 200 blessés
Incendie de Buncefield	Londres, Angleterre	11 décembre 2005	Explosions suivies d'un incendie dans un terminal pétrolier	43 blessés
Incendie dans une usine de pesticides	Béziers, France	27 juin 2005	1 700 tonnes de produits toxiques se sont enflammées	Confinement de plusieurs milliers de personnes
Explosion dans une raffinerie de BP	Texas City, États-Unis	23 mars 2005	—	15 morts
Explosion de gaz	Ghislenghien, Belgique	30 juillet 2004	—	24 morts et 132 blessés

I.5.2 Causes principales identifiées à partir des REX

Les REX mettent en évidence les catégories suivantes, classées par fréquence récurrente :

1. **Défaillances électriques :**
   - Courts-circuits, surcharges, câblages vétustes ou non conformes.
   - Équipements mal entretenus, tableaux électriques défectueux, échauffements de récepteurs (moteurs, transformateurs).
   - Installations provisoires ou improvisées lors de travaux.
2. **Travaux par points chauds (Hot Work) :**
   - Soudage, oxycoupage, meulage, découpage, brasage… sans mesures de prévention adaptées (permis de feu insuffisant, surveillance post-travaux inexistante).
   - Ces activités sont responsables d'un incendie sur trois dans de nombreux retours d'expérience industriels.
3. **Erreurs humaines et facteurs comportementaux :**
   - Négligences, imprudences (ex. : cigarettes, mauvaise élimination de déchets inflammables).
   - Non-respect des procédures, ignorance d'alarmes, pression de production.
   - Normalisation de la déviance : tolérance progressive aux écarts répétés (ex. : alarmes ignorées, maintenance reportée).

4. **Défaillances techniques et de maintenance :**
    - Corrosion, usure, vieillissement non maîtrisé des équipements (jaugeages, vannes, pompes, tuyauteries).
    - Pannes mécaniques ou défaillances d'équipements de process.
    - Manque d'inspection prédictive ou de maintenance préventive.
5. **Mauvaise gestion des matières inflammables, combustibles ou dangereuses :**
    - Surstockage ou stockage inapproprié (mélange incompatible de produits, accumulation de poussières combustibles).
    - Auto-échauffement (déchets, chiffons imbibés d'huiles/solvants, matières organiques en fermentation).
    - Fuites de liquides ou gaz inflammables, débordements de réservoirs.
    - Effet « loupe » ou emballement thermique sous l'effet de la chaleur (ex. : fortes températures extérieures).
6. **Facteurs aggravants ou externes** :
    - Conception obsolète des installations (manque de compartimentage, espacement insuffisant).
    - Absence ou défaillance de systèmes de détection et d'extinction automatique.
    - Conditions climatiques (foudre, canicule favorisant l'auto-échauffement).
    - Impacts extérieurs (véhicules, actes de malveillance).
7. **Causes profondes (racines) identifiées dans les REX :**
    - Insuffisance de la culture de sécurité : priorité donnée à la production sur la sécurité, faible apprentissage des incidents mineurs.
    - Défaillances organisationnelles : procédures incomplètes ou non appliquées, formation et qualification du personnel insuffisantes, encadrement inadéquat, manque de communication.
    - Gestion des risques défaillante : analyses de dangers (HAZOP, PHA) non actualisées, non prise en compte des scénarios d'effets domino, REX insuffisamment capitalisé.
    - Manque de maintenance et de contrôles : inspections irrégulières, organisation des contrôles défaillante.[5]

I.5.3 Conséquences (humaines, matérielles, environnementales)

1. **Conséquences Humaines :** Les conséquences humaines sont les plus critiques et peuvent inclure des blessures de diverses gravités, des incapacités permanentes, voire

des décès. Les accidents peuvent également provoquer des traumatismes psychologiques à long terme pour les survivants et le personnel d'intervention.

2. **Conséquences Matérielles et Économiques :** Les incendies industriels entraînent souvent des dommages matériels considérables, allant de la destruction d'équipements et d'infrastructures à la perte totale de bâtiments de production ou de stockage. Cela se traduit par des pertes financières directes importantes, incluant les coûts de réparation, de reconstruction et de remplacement des biens endommagés. Au-delà des dommages immédiats, les entreprises subissent des pertes indirectes telles que l'interruption de la production, la perte de parts de marché, les pénalités contractuelles et les surcoûts liés à la gestion de crise.
3. **Conséquences Environnementales :** Les incidents industriels peuvent avoir des effets dévastateurs sur l'environnement. La libération de substances dangereuses, qu'elles soient liquides, gazeuses ou sous forme de particules, peut entraîner une pollution de l'air, de l'eau et des sols. Les incendies libèrent une variété de polluants persistants et de gaz à effet de serre, contribuant à la dégradation de la qualité de l'air et au changement climatique. Les déversements de pétrole ou de produits chimiques peuvent contaminer les écosystèmes aquatiques et terrestres, affectant la biodiversité et les ressources naturelles.
4. **Conséquences Induites et Effet Domino :** Un incendie initial peut déclencher une série d'événements en cascade, connus sous le nom d'effet domino, qui aggravent considérablement les conséquences. Bien que les effets d'un incendie aient souvent une portée physique plus courte que ceux d'une explosion, ils peuvent être le point de départ de séquences d'événements complexes et destructrices. De plus, les incidents majeurs peuvent gravement nuire à la réputation d'une entreprise, entraînant une perte de confiance du public, des sanctions réglementaires et des difficultés à maintenir les licences d'exploitation.[5]

I.6 Analyse générale des incendies industriels

L’analyse générale des incendies industriels repose sur l’intégration des phénomènes physico-chimiques fondamentaux avec les données issues des retours d’expérience (REX). Elle permet d’identifier les vulnérabilités systémiques, d’évaluer les limites des méthodes traditionnelles et de valoriser les outils modernes comme la simulation numérique pour une prévention proactive en matière de HSE

I.6.1 Synthèse des facteurs de risque majeurs :

Les facteurs de risque majeurs des incendies industriels résultent de la combinaison des éléments du triangle/ tétraèdre du feu avec des défaillances techniques, humaines et organisationnelles. Les analyses de Retours d'Expérience (REX), notamment celles issues de la base ARIA gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et des Pollutions Industrielles), mettent en évidence des catégories récurrentes :

- **Sources d'inflammation :** Les défaillances électriques constituent la première cause, représentant environ 30 % des sinistres en milieu industriel. Elles incluent courts-circuits, surcharges, câblages vétustes, échauffements de récepteurs (moteurs, transformateurs) et installations provisoires ou non conformes. Les travaux par points chauds (soudage, oxycoupage, meulage, découpage…) sans mesures de prévention adéquates (permis de feu insuffisant, surveillance post-travaux inexistante) sont responsables d'environ un incendie sur trois. S'ajoutent les sources thermiques ou mécaniques (échauffements par friction, frottements, surfaces chaudes).
- **Présence et accumulation de combustibles :** Surstockage de matières inflammables ou combustibles, mélange incompatible de produits, auto-échauffement (déchets, chiffons imbibés d'huiles ou solvants, poussières combustibles, matières organiques en fermentation), fuites ou débordements de liquides inflammables. Ces situations favorisent l'initiation ou l'emballement de la combustion.
- **Facteurs aggravants (techniques et environnementaux)** : Conception obsolète des installations (manque de compartimentage, espacement insuffisant entre équipements favorisant les effets domino par rayonnement thermique), ventilation inadaptée (favorisant la combustion incomplète ou l'accumulation de fumées), absence ou défaillance des systèmes de détection et d'extinction automatique, et conditions environnementales (canicule favorisant l'auto-échauffement, foudre, impacts extérieurs).
- **Facteurs humains et organisationnels :** Normalisation de la déviance (tolérance progressive aux écarts répétés : alarmes ignorées, maintenance reportée, procédures non respectées), formation et sensibilisation insuffisantes du personnel, pression de production prioritaire sur la sécurité, et faible apprentissage des incidents mineurs ou quasi-accidents. Ces facteurs systémiques expliquent pourquoi de nombreuses barrières de défense s'alignent et transforment un départ de feu localisé en sinistre majeur.[1], [5]

Cette combinaison explique la dynamique observée dans la majorité des incidents : un événement initiateur (source d'inflammation) rencontre un combustible disponible en quantité suffisante, dans un environnement qui ne permet ni détection précoce ni confinement rapide.

I.6.2 Les phénomènes physico-chimiques et incidents réels

Les phénomènes physico-chimiques liés aux incendies sont des processus complexes et interdépendants qui régissent le comportement du feu, depuis son initiation jusqu'à sa propagation et son extinction. Ces phénomènes incluent la chimie de la combustion, la pyrolyse, les mécanismes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) et la dynamique des fluides, ainsi que la formation de fumée et la production de gaz toxiques.

Flash-over Phase transitionnelle dans le développement d'un incendie en espace confiné au cours de laquelle les surfaces exposées au rayonnement thermique des gaz chauds accumulés atteignent leur température d'inflammation plus ou moins simultanément, provoquant une propagation rapide du feu dans tout l'espace et entraînant l'embrasement généralisé de l'ensemble des matériaux combustibles (full room involvement).

Backdraft Déflagration résultant de l'introduction soudaine d'air dans un espace confiné contenant des produits de combustion incomplets (oxygène-déficient) et une forte concentration de gaz inflammables et de produits de pyrolyse non brûlés. L'apport brutal d'oxygène rend le mélange explosif, entraînant une inflammation violente et rapide.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) et Fireball Explosion résultant de la rupture catastrophique d'un réservoir ou d'une cuve contenant un liquide inflammable sous pression, lorsque celui-ci est chauffé au-dessus de son point d'ébullition par un incendie extérieur. La chute brutale de pression provoque la vaporisation instantanée massive du liquide, générant une onde de pression explosive suivie d'une boule de feu (Fireball) sphérique ou en forme de champignon, de grande dimension et de très forte intensité thermique.

Feux de Nappe (Pool Fires) Combustion d'une nappe ou d'une flaque de liquide inflammable répandue sur une surface horizontale (sol, cuvette de rétention ou autour d'un réservoir), caractérisée par une flamme de diffusion turbulente relativement stationnaire. Le feu est alimenté par l'évaporation continue du liquide, avec un dégagement de chaleur et un rayonnement thermique importants qui augmentent avec la surface et le diamètre de la nappe.

Flammes de Jet (Jet Fires) Flamme directionnelle, longue, étroite et très intense produite par la combustion d'un gaz, de vapeurs ou d'un liquide pulvérisé s'échappant à haute vitesse et sous pression à travers une brèche ou un orifice (fuite de canalisation, vanne, joint, etc.). Il s'agit d'un feu de diffusion turbulent à fort moment cinétique, dont la longueur et l'intensité dépendent du débit, de la pression et des conditions environnementales.

Feux de Nuage de Vapeur (Vapor Cloud Fires ou Flash Fires) Combustion rapide d'un nuage préalablement formé de gaz ou de vapeurs inflammables mélangés à l'air, résultant d'une fuite importante de produit volatil. La flamme se propage à travers le nuage à une vitesse subsonique sans générer de surpression significative, pouvant entraîner une propagation très rapide sur une large zone (flash fire).[4]

I.6.3 Intérêt de la simulation numérique pour l'analyse des scénarios incendie

1. Capture de la dynamique temporelle et spatiale réelle Contrairement aux méthodes traditionnelles qui supposent souvent des scénarios linéaires ou des conditions idéalisées, la simulation numérique modélise l'évolution complète du feu en 3D et dans le temps. Elle restitue fidèlement :

- La croissance et la propagation des flammes
- La stratification et le mouvement des fumées
- Les phénomènes de sous-ventilation et de combustion incomplète
- Les interactions complexes entre feu, ventilation, géométrie des locaux et obstacles

2. Prise en compte des couplages multi-physiques Les modèles CFD intègrent simultanément les phénomènes thermiques, fluides, chimiques et radiatifs. Ils permettent d'analyser :

- La pyrolyse des matériaux solides
- Le transfert de chaleur par rayonnement et convection
- Les effets domino (propagation à d'autres équipements ou stockages)
- L'impact de la ventilation mécanique ou naturelle sur le comportement du feu

3. Gestion des incertitudes et exploration de multiples scénarios La simulation permet de tester rapidement un grand nombre de scénarios (variations de charge combustible, position du départ de feu, conditions météo, dysfonctionnements de systèmes de protection, etc.). Elle facilite l'analyse de sensibilité et la prise en compte des incertitudes épistémiques et aléatoires, ce que les approches classiques peinent à faire.

4. Évaluation performancielle des mesures de prévention et de protection
    - Dimensionnement optimisé des systèmes de désenfumage, sprinklage, détection
    - Évaluation de l'efficacité des cloisonnements, des voies d'évacuation et des temps d'évacuation disponibles
    - Analyse des conséquences sur les structures, l'environnement et les personnes (flux thermiques, toxicité des fumées, visibilité)

5. Avantages économiques et pratiques
   - Coût très inférieur aux essais expérimentaux à grande échelle (souvent impossibles en milieu industriel)
   - Possibilité de simuler des configurations innovantes ou des procédés nouveaux pour lesquels il n'existe pas de retour d'expérience
   - Visualisation détaillée des résultats (températures, vitesses, concentrations, flux thermiques) via des outils comme Smokeview, facilitant la compréhension et la communication aux parties prenantes
6. Amélioration de la prédictivité et de la robustesse des études de risques La simulation numérique s'inscrit dans une démarche performance-based (basée sur les performances) plutôt que purement prescriptive. Elle permet de démontrer la sécurité d'une installation au-delà des règles minimales, tout en optimisant les coûts d'investissement et d'exploitation.[3], [7]

I.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions fondamentales liées aux incendies industriels, aux mécanismes de combustion et aux facteurs influençant la propagation du feu, tout en soulignant l'intérêt de la simulation numérique dans l'analyse des risques. Ces acquis constituent une base essentielle pour l'étude des scénarios d'incendie au sein des complexes industriels du secteur pétrolier et gaz

CHAPITRE II : PRESENTATION DU COMPLEXE GL2Z-SONATRACH

II.1 Introduction

Le complexe GL2Z est considéré comme l'une des installations industrielles les plus importantes du secteur pétrolier et gazier en Algérie, en raison de son rôle stratégique dans le traitement, la liquéfaction et l'exportation du gaz naturel vers les marchés internationaux. Ce complexe se caractérise par la présence d'équipements industriels complexes fonctionnant sous pression et à très basse température, ainsi que par la manipulation de grandes quantités de substances inflammables et explosives, ce qui fait du risque incendie l'un des principaux dangers industriels potentiels au sein de l'installation. Afin de mieux comprendre cet environnement industriel et ses spécificités, ce chapitre vise à présenter le complexe GL2/Z à travers son historique, sa situation géographique, son organisation générale, ses différentes unités de production ainsi que les systèmes de sécurité et de protection mis en place.

II.2 Présentation du complexe GL2/Z :

II.2.1 Historique de complexe GL2/Z :

L'historique du complexe GL2Z, situé dans la zone industrielle d'Arzew-Bethioua, est étroitement lié au développement de l'industrie gazière de l'Algérie postindépendance et à la stratégie de la compagnie nationale SONATRACH.

La conception et la construction du complexe ont été confiées à la société américaine Pullman Kellogg.

- 9 février 1976 : Signature du contrat de construction.
- 1er avril 1976 : Mise en vigueur officielle du contrat.
- 21 février 1978 : Pose de la première pierre du complexe.
- 27 juillet 1980 : Début de la production de vapeur et d'électricité dans la zone des utilités.
- 29 janvier 1981 : Mise en service officielle et début de la production de GNL.
- 11 février 1981 : Première production effective de GNL par le premier train
- 20 juillet 1981 : Première expédition de GNL vers le marché international [8], [9]

II.2.2 Situation géographique du complexe :

Le complexe GL2/Z est situé à BATHIOUA, s'étendant sur une superficie de 72 hectares, à 40Km à l'ouest d'Oran, son emplacement au bord de la mer lui permet d'utiliser son eau source d'alimentation pour le refroidissement, la production d'eau distillée et à la lutte contre la pollution.[8], [10]

II.2.3 Objet du complexe :

Le complexe GL2/Z a été spécifiquement conçu pour traiter le gaz naturel provenant du gisement géant de Hassi R'Mel, acheminé via un réseau de gazoducs (GZ1 et GZ3) sur plus de 500 km

Missions principales :

- Liquéfaction du gaz naturel : Réduction du volume ~600 fois pour stockage et transport maritime longue distance.
- Extraction de sous-produits : Propane/butane (GPL), gazoline (export), hélium, éthane (réfrigérant ou combustible).
- Renforce la souveraineté économique, la sécurité énergétique (approvisionnement Méditerranée/Europe) et l'optimisation des ressources face à la transition énergétique. C'est un levier de puissance économique et diplomatique pour l'Algérie via l'exportation de GNL et dérivés.[9], [11]

II.2.4 Fiche technique du GL2/Z :

Tableau 2: fiche technique du complexe GL2/Z.[8]

La superficie	72 hectares
Localisation	BETIOUA-ORAN
Constructeur	L'américain ''PULLMAN KELLOGG''
La fonction	Traitement et liquéfaction du gaz naturel
Produits finals	Gaz naturel liquéfie GNL et Gazoline ave possibilité d'extraction du propane et butane
Destination de la production	Europe et Etats-Unis
Capacité de production GNL	18 000 000 m^3 /ans
Capacité totale de stockage GNL	Bacs calorifugés : 100 000m^3 chacun
Capacité de production Gazoline	200 000 tonnes /ans
Capacité totale de stockage	14 000 m^3 chacun

II.2.5 Cadre réglementaire et normatif :

a) Réglementation Algérienne sur le Stockage d'Hydrocarbures :

Tableau 3: Réglementation Algérienne sur le Stockage d'Hydrocarbures[10], [12]

Loi /décret	contenu
Décret exécutif n° 21-319	Fixe les procédures d'autorisation pour la mise en service des installations de stockage d'hydrocarbures.
Décret exécutif n° 21-320	Définit les conditions d'exercice des activités de stockage et impose des garanties financières et techniques suffisantes aux opérateurs.

Décret exécutif n° 15-57	Organise le stockage et la distribution des produits pétroliers. Il rend obligatoire l'agrément de l'Autorité de Régulation des Hydrocarbures (ARH) et fixe les conditions d'implantation des installations.
Décret exécutif n° 21-315	Établit les règles techniques de conception, construction et exploitation des réservoirs et canalisations. Il impose un système de gestion de l'intégrité (SGI) et des inspections régulières.
Décret exécutif n° 21-261 :	Réglemente les équipements sous pression (ESP) et les installations électriques associées. Il renforce le contrôle, la certification et la maintenance pour prévenir les accidents majeurs
Décret exécutif n° 21-256	Organise l'accès aux infrastructures de stockage et encadre la régulation des tarifs via un système de péréquation
Décret exécutif n° 21-242	Encadre le stockage souterrain des hydrocarbures dans les gisements épuisés, avec exigences géologiques et de surveillance renforcées
Décret exécutif n° 97-435	Spécifique au stockage et à la distribution du GPL, il fixe les règles de sécurité pour limiter les risques d'explosion et de fuite
Décret exécutif n° 94-43	Porte sur la sécurité des réservoirs d'hydrocarbures légers (étanchéité, ventilation et conception anti-explosion).
Décret exécutif n° 08-312	Impose la réalisation d'études d'impact environnemental pour tout projet hydrocarbures, avec mesures de prévention et de compensation.
Décrets complémentaires (ICPE et risques)	Les décrets n° 06-198, 07-145, 05-495, 09-335 et 06-141 renforcent les obligations en matière d'installations classées, de prévention des accidents majeurs et de protection de l'environnement

b) Réglementation Nationale HSE (Algérie)

Le complexe applique rigoureusement la réglementation algérienne en matière d'hygiène, sécurité et environnement :

Tableau 4: réglementation algérienne en matière HSE[13] [14]

Loi /décret	contenu
Loi n° 88-07	Obligation pour l'employeur d'assurer la sécurité des travailleurs et de fournir les EPI nécessaires, ainsi que la médecine du travail
Décret exécutif n° 91-05	Prescriptions générales d'hygiène et de sécurité, particulièrement pour les risques d'incendie et

	d'explosion
Décret n° 01-342 et Décret n° 05-08	Risques spécifiques (risques électriques) et (manipulation des substances dangereuses).
Décret exécutif n° 06-141	qui fixe les valeurs limites de rejet des effluents liquides industriels pour les complexes énergétiques

c) Standards et Normes Internationales

- Conception technique : Normes américaines ASME (mécanique), API (pétrole), ASTM (matériaux) et NFPA (protection incendie).
- Management de la Qualité : Certification ISO 9001-2000 obtenue en novembre 2002.
- Laboratoires : Démarche d'accréditation selon ISO/IEC 17025 pour la fiabilité des analyses.
- Sûreté de fonctionnement : Normes IEC 61508 et IEC 61511 pour les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) et les niveaux d'intégrité de sécurité (SIL).
- Éthique et Responsabilité : ISO 37001 (anti-corruption) et ISO 26000 (responsabilité sociétale). [8]

d) Référentiels Internes Sonatrach

Le Groupe Sonatrach impose ses propres exigences renforcées :

- Politique HSE 2021 : Engagement fort sur l'objectif « zéro accident » et la protection stricte de l'environnement.
- Règles SALAMATI (« Règles d'Or ») : Règles comportementales obligatoires pour prévenir les accidents et maîtriser les risques majeurs.
- Code d'Éthique (mis à jour 2021) : Définit les standards de conduite pour les employés et partenaires.
- Process Safety Management (PSM) : Projet dédié à la maîtrise de la sécurité des procédés et à l'intégrité continue des installations de liquéfaction.[8], [9]

II.3 L'organigramme général du complexe GL2/Z :

L'organigramme général du complexe GL2/Z, tel qu'il est présenté dans les documents techniques, structure les responsabilités autour d'une direction centrale et de plusieurs pôles opérationnels et administratifs.

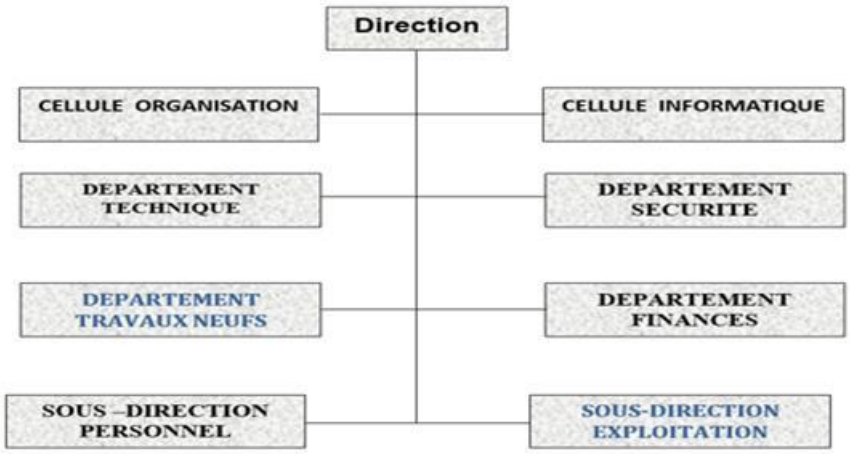


Figure 3 : Organigramme zone ADM du complexe GL2/Z.

II.3.1 Service de la Direction du Complexe

Au sommet de la pyramide, la Direction chapeaute l'ensemble du site. Elle est directement assistée par :

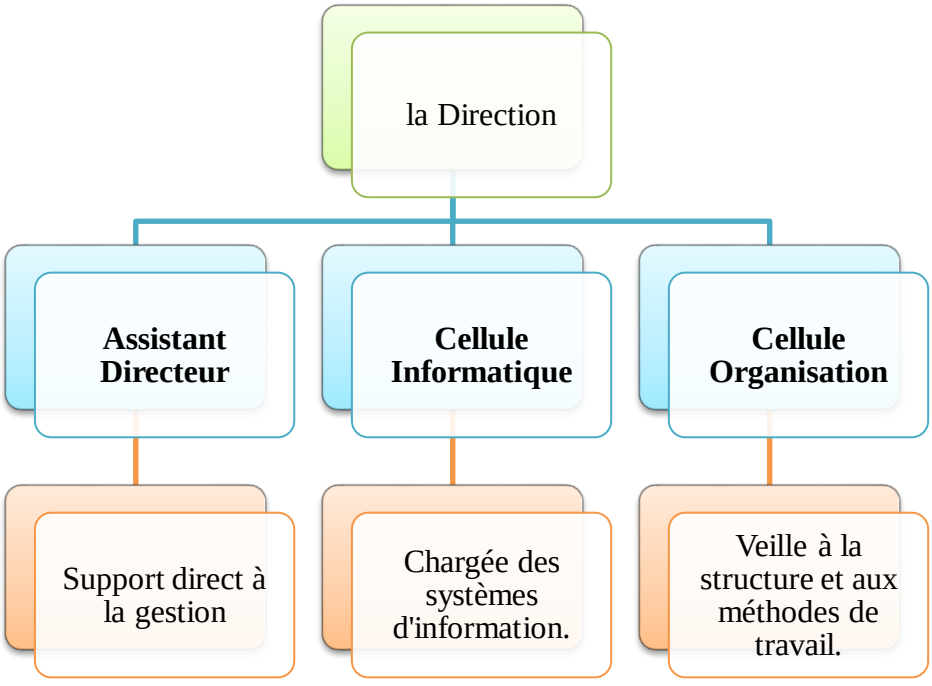


Figure 4 : Service de la Direction du Complexe

II.3.2 Départements Centraux

Certains départements stratégiques rapportent directement à la Direction du complexe :

- Département Finance : Gestion budgétaire et comptable.
- Département Technique : Études, ingénierie et support technique.
- Département Sécurité : Surveillance des installations, prévention des risques et intervention.[15]

II.3.3 Sous-Direction Exploitation

Ce pôle est le cœur opérationnel de l'usine, gérant la production de GNL et l'entretien des actifs :

- Département Production : Chargé de l'exploitation des six trains de liquéfaction.
- Département Maintenance : Assure l'entretien préventif et curatif des équipements (mécanique, électrique, instrumentation, etc.).
- Département Approvisionnements : Gestion des stocks et des pièces de rechange nécessaires au fonctionnement.

II.3.4 Sous-Direction Personnel :

Elle gère le capital humain et les moyens logistiques pour les travailleurs :

- Département Ressource Humaine : Gestion des carrières et de la formation.
- Département Administration : Gestion administrative courante.
- Département Moyens Généraux : Logistique, transport et restauration sur site.
- Cellule Relation de Travail : Liaison sociale au sein du complexe.

II.3.5 Département Maintenance :

Le Département Maintenance, rattaché à la Sous-Direction Exploitation, assure l'entretien préventif, prédictif et curatif des équipements des six trains de liquéfaction afin de garantir la fiabilité et la disponibilité optimale des installations.

Organisation :

- **Service Planning et Méthodes :** Coordination, préparation, planning, maintenance prédictive, statistiques et gestion des arrêts (MPE 1 à 3).
- **Service Électricité Industrielle :** Maintenance des réseaux et équipements électriques (Process, Utilités et Terminal).
- **Service Instrumentation :** Maintenance des instruments, SNCC (Honeywell TDC3000), vannes, PSV et systèmes de sécurité (SIS).
- **Service Chaudronnerie :** Réparation des équipements statiques et tuyauteries.
- **Service Logistique et Maintenance Industrielle :** Anticorrosion, calorifugeage, manutention et génie civil.

- **Service Mécanique Industrielle :** Maintenance des machines tournantes (turbines, compresseurs, pompes).
- **Task Force Chaudières :** Maintenance spécialisée des chaudières (ABB & IHI) produisant la vapeur motrice.

Le département applique une stratégie MPE structurée (niveaux 1 à 3) allant de la lubrification à la révision complète des turbines et compresseurs.[8], [9], [16]

II.3.6 Département Hygiène, Sécurité et Environnement (HSE) :

Le Département HSE, rattaché directement à la Direction, veille à la protection du personnel, du patrimoine industriel et de l'environnement selon la politique « Zéro accident, zéro dommage ».

Organisation :

- **Service Prévention :** Approche proactive : analyse des risques, délivrance des permis de travail, inspections, formation et sensibilisation du personnel. Structuré en deux sections : Contrôle (surveillance) et Animation (formation et culture sécurité).
- **Service Intervention** : intervention d'urgence 24h/24. Composé de sapeurs-pompiers et secouristes organisés en quarts. Assure la lutte contre les incendies, le sauvetage et la protection des installations. Dispose d'une section dédiée à la maintenance des équipements de sécurité.
- **Service Environnement :** Garant de la conformité environnementale : suivi des rejets (air, eau), gestion des déchets, réduction des émissions (LDAR), analyses environnementales et application du Plan de Gestion Environnementale (PGE).[9]

II.4 Différentes unités du complexe GL2Z :

II.4.1 Zone des Utilités :

La zone des utilités joue un rôle vital en produisant sur site l'intégralité des ressources nécessaires (eau, vapeur, air, électricité) pour assurer le démarrage et le fonctionnement continu des six (06) trains de liquéfaction.

a) Source d'Énergie : La vapeur d'eau est la force motrice principale choisie pour le complexe, alimentant les équipements rotatifs stratégiques (turbocompresseurs, turbopompes, turboventilateurs).

- Production HP : Chaque train dispose de trois chaudières haute pression (62 bars) avec un débit de 40 tonnes/heure. Des chaudières produisent de la vapeur à 65 bars avec des capacités allant jusqu'à 400 tonnes/heure.

- Production BP : Une chaudière basse pression (17,5 bars) fournit la vapeur nécessaire aux turbines à contre-pression et au système d'éjecteurs des unités de dessalement.
- Collecteur Commun : Un réseau d'interconnexion permet à chaque train d'utiliser la vapeur des autres unités ou des chaudières de secours (type ABB), garantissant une flexibilité maximale.

b) Source de Refroidissement : Le refroidissement des échangeurs thermiques repose sur un débit massif d'eau de mer puisé directement sur le littoral.

- Capacité : Un ensemble de six (06) pompes électriques de grande puissance (associées à une turbopompe de secours) assure un débit nominal de 173 400 à 175 000 m³/h.
- Traitement : L'eau subit un dégrillage par des systèmes rotatifs pour éliminer les corps étrangers, suivi d'une chloration (ou électro-chloration pour les installations modernisées) pour neutraliser la faune et la flore marine, prévenant ainsi l'encrassement biologique des équipements.

c) Production d'Électricité : L'autonomie électrique est garantie par une centrale interne couplée au réseau national pour la sécurité.

- Configuration : Trois (03) turbo-alternateurs fournissent une puissance de 18 à 36 MW chacun.
- Fonctionnement : En marche normale, deux générateurs suffisent à couvrir la demande totale du site (~36 MW).
- Secours : En cas de défaillance, le complexe peut s'appuyer sur le réseau SONELGAZ, un groupe diesel de secours ou une interconnexion avec le complexe voisin GL1Z.

d) Unité de Dessalement : Pour préserver l'intégrité des chaudières et éviter l'entartrage, le complexe transforme l'eau de mer en eau distillée.

- Équipements : Cinq à six (05-06) unités de dessalement d'une capacité unitaire de 45 m³/h
- Usage : L'eau produite alimente prioritairement les chaudières, mais sert aussi à la lutte anti-incendie et aux besoins du procédé.

e) Production d'Air Comprimé et d'Azote : La fiabilité du contrôle-commande dépend de la qualité de l'air fourni aux systèmes pneumatiques.

- Air Instrument : Un ensemble de quatre (04) compresseurs (mélange de turbines et moteurs électriques) produit l'air service et l'air instrument, purifié et séché pour éviter tout blocage des vannes pneumatiques.
- Azote (N2) : Une unité dédiée fournit l'azote nécessaire à l'inertage des circuits lors des interventions de maintenance et au balayage des réservoirs pour prévenir tout risque d'explosion. [8], [9]

II.4.2 Zone de Procédé :

Le complexe GL2/Z repose sur six (06) trains de liquéfaction identiques et indépendants, fonctionnant en parallèle selon le procédé APCI (C3-MR). Cette configuration modulaire assure une grande flexibilité opérationnelle, permettant la maintenance rotative sans interrompre la production globale.

L'énergie thermique nécessaire est fournie par un parc de 22 chaudières, incluant les quatre unités ABB ou MHI/IHI de haute performance. Chaque train traite un débit nominal de 270 000-280 000 Nm^3/h de gaz naturel brut en provenance de Hassi R'Mel.

Le cycle de transformation s'articule autour de quatre étapes majeures :

1. Traitement et Purification Profonde : Avant d'atteindre les sections cryogéniques, le gaz doit être débarrassé de ses impuretés pour éviter tout bouchage ou corrosion :

- Décarbonatation : Lavage à la MEA (Monoéthanolamine) pour réduire la teneur en CO2 à < 70 ppm, évitant la cristallisation à basse température.
- Déshydratation : Passage sur tamis moléculaires pour abaisser la teneur en eau à < 0,5 ppm (ou < 1 ppm), prévenant la formation de glace.
- Démercurisation : Élimination des traces de mercure pour protéger les échangeurs de chaleur en aluminium contre la corrosion.

2. Pré-refroidissement au Propane (Cycle C3) : Le gaz purifié subit un premier refroidissement dans une boucle de propane pur (4 niveaux de pression) qui abaisse sa température à -30°C / -35°C. Cette étape condense les hydrocarbures lourds, dirigés vers la section de fractionnement.

3. Liquéfaction Cryogénique (Boucle MCR) : Le gaz naturel pénètre dans l'échangeur principal (MCHE ou X16C). Il est refroidi et liquéfié à contre-courant par le MCR (Multi-Component Réfrigérant : mélange d'azote, méthane, éthane, propane). À la sortie, le GNL atteint -148°C sous 24-25 bars.

4. Désazotation et Stabilisation du GNL : Le GNL subit une détente finale (vanne Joule-Thomson) dans un ballon désazoter où l'azote excédentaire est extrait (N2 < 1%). Le produit fini est stabilisé à -162°C / 1,03 bar, puis acheminé vers les bacs de stockage par pompes cryogéniques.

5. Fractionnement et Valorisation des Sous-Produits : La section de fractionnement traite les condensats récupérés :

- Éthane : Appoint MCR, réinjection GNL (PCS) ou fuel gaz.
- Propane/Butane : Expédiés par canalisation vers GP1/Z.
- Gazoline (C5+) : Stockée dans 2 bacs de 13 500-14 000 m³ pour exportation.
- Gaz de charge : Vapeurs riches en hélium envoyées à l'unité HELIOS (extraction He/N2 liquide).[9], [11]

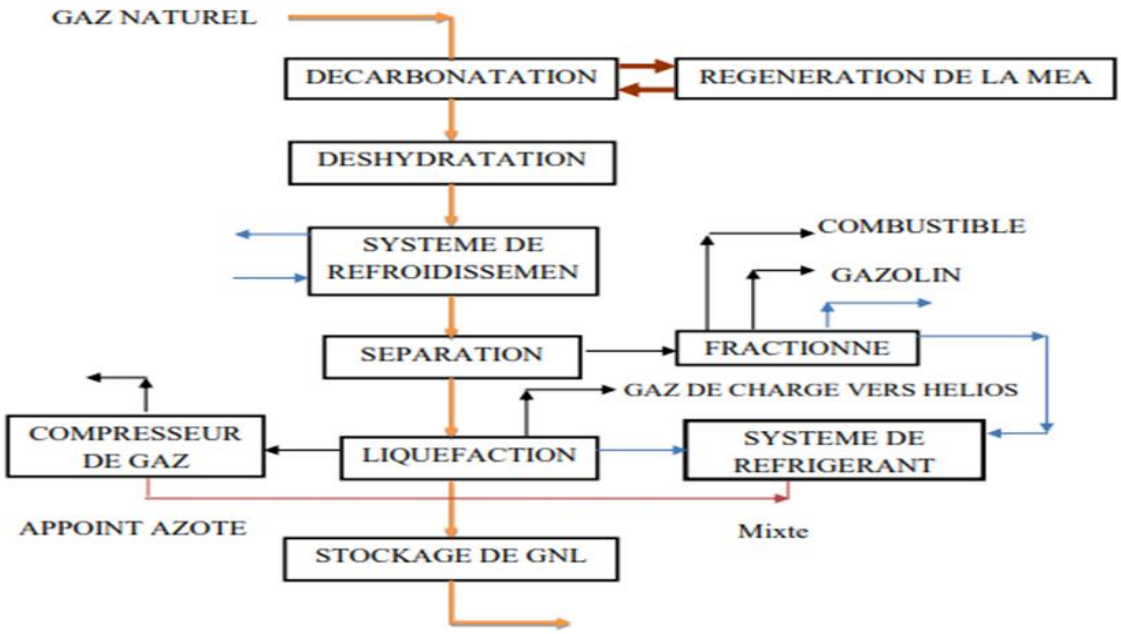


Figure 5 : **Schéma du procédé de liquéfaction du GNL***[9]*

II.4.3 Zone de Stockage et de Chargement

La zone du terminal constitue l'interface stratégique entre la production continue des six trains de liquéfaction et l'exportation maritime. Elle assure le stockage sécurisé des produits finis (GNL et Gazoline) et gère la logistique complexe du chargement des navires méthaniers.

a) Stockage : Le GNL et la gazoline sont maintenus dans des parcs de stockage distincts, conçus pour répondre aux contraintes physiques de chaque produit :

- Stockage du GNL (Gaz Naturel Liquéfié) : Le stockage du GNL est assuré par trois (03) bacs aériens calorifugés à double paroi métallique avec toit suspendu en aluminium, d'une capacité unitaire de 100 000 m³, soit une capacité totale de 300 000 m³. Les conditions opératoires sont maintenues à une température comprise entre -161°C et -162°C sous une pression absolue de 1,03 à 1,05 bar. Afin de prévenir le phénomène de stratification et le risque de roll over, les réservoirs disposent d'une flexibilité de remplissage par le haut ou par le bas. Les vapeurs de

BOG (Boil-Off Gas) sont récupérées et dirigées soit vers le réseau Fuel Gas, soit vers l'unité HELIOS dédiée à l'extraction de l'hélium et de l'azote.

- Stockage de la Gazoline (C5+) : Le complexe utilise deux (02) réservoirs à toit fixe équipés d'un écran flottant afin de minimiser les pertes par évaporation. La capacité unitaire de chaque réservoir est comprise entre 13 500 m^3 et 14 000 m^3.

b) Chargement Logistique et Transfert Cryogénique : Les installations permettent un transfert massif et sécurisé :

- Puissance de Transfert : La station de pompage dispose de cinq (05) motopompes cryogéniques assurant un débit de transfert de 1000 m^3/h. L'infrastructure portuaire comprend également deux quais, M4 et M5, destinés à l'accueil des méthaniers d'une capacité comprise entre 40 000 m^3 et 170 000 m^3.
- Bras de Chargement (par quai) : Chaque quai est équipé de quatre (04) bras de chargement dédiés au GNL liquide ainsi que d'un (01) bras de retour vapeur fonctionnant en circuit fermé, sans rejet atmosphérique. Ainsi, l'ensemble des deux quais totalise dix (10) bras de chargement.[8], [9]

II.5 Aspect de sécurité :

Le complexe GL2/Z est une unité de traitement de produits très inflammables (GNL). La sécurité y est une priorité absolue. La politique de SONATRACH est claire *: « Aucun travail n'est urgent au point qu'il ne puisse être effectué de la manière la plus sûre possible ».*

II.5.1 Identification et Mouvement du Personnel

La carte professionnelle ou le badge visiteur doit être porté de manière visible en permanence dans toute l'enceinte du complexe.

Votre position est connue en tout temps grâce au système de vidéosurveillance. Vous devez signaler votre présence à votre responsable et/ou à la personne visitée.

II.5.2 Sources de Feu et Interdictions

Il est strictement interdit de fumer, d'allumer un feu ou d'utiliser un téléphone portable dans les zones classées (unités de fabrication, extérieur des bureaux, voies de circulation). Le tabac est autorisé uniquement dans les fumoirs désignés. Les moyens de communication autorisés dans la zone industrielle sont les haut-parleurs, les talkies-walkies, les téléphones fixes, les boutons d'urgence (déclenchement de sirène) ainsi que les interphones.

II.5.2 Protection Individuelle (EPI)

Dans les zones d'exploitation, le port des équipements suivants est obligatoire :

- Casque anti-choc
- Chaussures de sécurité

- Tenue de travail
- Gants
- Lunettes de protection

Protections auditives (stops-bruits) – zone très bruyante (risque de fatigue auditive et surdité)

Pour les travaux en hauteur : harnais de sécurité et stops-chute obligatoires.

II .5.3 Autorisations de Travail et Permis

Aucun travail ne peut commencer sans les permis et certificats appropriés, visés par l'inspecteur prévention. Les principaux permis utilisés sont le permis à froid (entretien, inspection, travaux mécaniques), le permis à chaud (soudure, découpage, meulage, chalumeau, etc.), le permis de pénétration pour les espaces confinés, le permis d'accès engins/véhicules, le permis d'excavation, le permis de radiographie, le permis de travaux en hauteur, le permis de levage, le permis de fermeture de route, le permis électrique, le permis de limitation d'accès, le permis de test sur équipement HT ainsi que le permis de mise en service d'équipement ou système. Les certificats exigés comprennent le certificat de consignation électrique, le certificat de confirmation d'isolement (CCI) et le certificat d'échafaudage. Une autorisation spécifique est également requise pour la prise de photos, signée par la Sécurité et l'autorité de zone.

Le permis à froid est valable une semaine avec validation quotidienne par le chef de quart et l'inspecteur prévention. Le permis à chaud est valable une seule journée et exige la vérification de l'absence de gaz ainsi que la présence d'un extincteur pendant toute l'opération. Le permis de pénétration nécessite une inspection préalable obligatoire et une surveillance extérieure permanente, avec une validité d'un jour. Le permis d'accès engins interdit les véhicules à essence et impose des équipements de sécurité adaptés (cache-flamme, extincteur, coupe-circuit, etc.). Les autres permis, tels que ceux liés à l'excavation, à la radiographie ou au levage, possèdent des exigences et des durées spécifiques selon les risques associés.

II.5.4 Plan d'Alerte et Gestion des Urgences

Le Plan d'Intervention Interne (PII) définit les rôles de chacun. Alertes diffusées par sirènes codées :

- ✓ 1 coup de 30 secondes → Alarme zone (arrêt des travaux, mise en sécurité).
- ✓ 10 coups de 5 secondes → Alarme PII (rejoindre le point de rassemblement).
- ✓ 1 coup de 2 minutes → Évacuation totale vers les bus.
- ✓ Numéro d'urgence : 5599

En cas d'accident majeur, le Poste de Direction des Opérations Internes (PDOI) peut activer le Plan d'Assistance Mutuelle (PAM) avec les autres complexes d'Arzew.

Le site dispose de systèmes avancés de détection (gaz, flamme, fumée), d'extinction (eau incendie 3000 m^3/h, déluges, mousse, poudre, CO_2) et d'un Distributed Control System (DCS) pour la supervision.

II.6 Les systèmes de sécurité

Le complexe GL2/Z traite et stocke de grandes quantités de gaz naturel liquéfié (GNL), produit hautement inflammable et cryogénique. Des fuites de gaz, vapeurs ou liquides inflammables peuvent générer des atmosphères explosibles. C'est pourquoi le site dispose d'une architecture complète et redondante de systèmes de sécurité permettant la détection précoce, l'analyse rapide et l'intervention efficace en cas de fuite, incendie ou explosion.

L'objectif est de protéger le personnel, les installations et l'environnement en réduisant au maximum la probabilité et les conséquences d'un événement majeur.

II.6.1 Détection (Protection Active)

Les détecteurs sont répartis sur tout le site et reliés au DCS (Distributed Control System), le « cerveau » du complexe.

- Détecteurs de gaz : Type infrarouge (IR) – détectent les fuites de gaz combustibles avant d'atteindre les limites explosibles.
- Détecteurs de flamme : Détectent la présence de flamme (UV/IR).
- Détecteurs de fumée (Smoke Detector) : Détectent la fumée et déclenchent l'alarme.
- Détecteurs Haute Température (HTD) : Déclenchent l'alarme lorsque la température ambiante dépasse une consigne prédéfinie.
- Détecteurs Basse Température (LTD) – cryogéniques : Installés dans les zones de stockage et fosse des pompes pour détecter tout déversement de GNL (-162°C).
- Vidéosurveillance : Caméras couvrant les zones sensibles (bacs, quais de chargement…).

II.6.2 Analyse et Contrôle Centralisé :

Toutes les informations des détecteurs convergent vers le DCS, protégé par :

- Deux portes coupe-feu
- Extincteurs à poudre
- Système CO2 automatique
- Appareil Respiratoire Isolant (ARI)

II.6.3 Systèmes d'Extinction et de Lutte Contre l'Incendie

a. Réseau Eau Anti-incendie : Le réseau d'eau anti-incendie est un réseau bouclé maillé à double alimentation, isolable par vannes de sectionnement. Il est alimenté par trois pompes aspirant l'eau de mer : une pompe Jockey de 125 m³/h assurant le maintien de la pression à 6,5 bars, ainsi qu'une pompe électrique (JAM) et une pompe diesel (JAD), chacune d'une capacité de 2 920 m³/h à 9 bars. Ce réseau alimente 160 poteaux incendie (PI) avec un débit total de 1 113 m³/h, dix lances monitors à balayage automatique (LMBA), les systèmes déluges installés sur les bacs GNL, les bâtiments à mousse (2115K et 2117K) ainsi que les générateurs de mousse.

b. Systèmes à Poudre (Skids) : Les systèmes à poudre sont utilisés pour les feux de classe B et C. Ils sont composés de réservoirs de poudre de 2 000 kg ou de deux réservoirs de 1 000 kg, d'un système de pressurisation au gaz azote (N_2), d'un réseau de distribution et de buses de projection. Ces systèmes sont principalement installés au niveau des trains de fractionnement, des chaudières, des utilités, de la fosse des pompes, du quai de chargement et des évents de bacs.

Le fonctionnement d'un système SKID suit plusieurs étapes : déclenchement des bouteilles pilotes (Sparklet), activation de la bouteille starter, ouverture de la vanne pneumatique de la zone concernée, puis projection de la poudre extinctrice.

c. Système CO2 : Le système CO2 est particulièrement adapté aux salles électriques et informatiques, car il ne laisse aucun résidu après utilisation. Son principe repose sur la réduction du taux d'oxygène jusqu'à l'extinction de la combustion. Le système est constitué de bouteilles de 67 litres contenant chacune 45 kg de CO2, reliées à un réseau de buses de diffusion. Il est installé au niveau des turbogénérateurs, des sous-stations électriques, de la salle DCS, de la salle informatique et du bâtiment terminal.

Le fonctionnement repose sur des détecteurs de fumée installés en diagonale : une première détection déclenche une alarme, tandis que deux détections entraînent la libération automatique du CO2.

d. Extincteurs : Le complexe dispose de deux types d'extincteurs : les extincteurs à pression auxiliaire fonctionnant avec une cartouche de gaz, et les extincteurs à pression permanente dans lesquels la pression est maintenue directement dans le réservoir.

e. Systèmes à Mousse : Les systèmes à mousse produisent un tapis isolant permettant d'étouffer les vapeurs inflammables et d'empêcher leur contact avec l'oxygène. Leur principe de fonctionnement repose sur le mélange d'eau et d'émulseur pour former une solution moussante, à laquelle s'ajoute l'air afin de produire la mousse.

Selon le taux de foisonnement (TF), on distingue :

- Le bas foisonnement : $4 < TF < 20$;
- Le moyen foisonnement : $20 < TF < 200$;

- Le haut foisonnement : TF > 200.

Ces systèmes sont installés au niveau des cuvettes de rétention des bacs GNL, de la fosse des pompes et des bacs de gazoline. Des systèmes déluges sont également présents sur les bacs GNL et gazoline afin d'assurer leur refroidissement et leur protection en cas d'incendie.

II.6.4 Autres Barrières de Sécurité

- Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) et ESD (Emergency Shut Down) – Arrêt d'urgence automatique.
- Cuvettes de rétention pour confinement des liquides.
- Soupapes de sécurité (PSV) et torches pour évacuation contrôlée des gaz.
- Ignifugeage (Fire roofing) des structures.
- Niveaux d'intégrité de sécurité SIL selon normes IEC 61508/61511.

II.7 Contexte du Risque Incendie dans le Complexe GL2/Z :

Le risque incendie constitue l'un des dangers industriels majeurs du complexe GL2/Z. Il résulte de la manipulation continue de produits inflammables et cryogéniques dans le cadre du procédé de liquéfaction C3-MR. La prévention et la maîtrise de ce risque représentent une priorité absolue afin de protéger le personnel, préserver l'intégrité des installations et prévenir tout impact sur l'environnement littoral.

II.7.1 Types de produits manipulés :

Le complexe manipule principalement les produits suivants :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL) à -162 °C, hautement inflammable une fois vaporisé
- Hydrocarbures lourds issus du fractionnement : propane, butane et gazoline (C5+)
- Réfrigérants du procédé C3-MR : propane pur et mélange réfrigérant MCR (azote, méthane, éthane et propane).

Ces produits présentent des risques spécifiques liés à leur nature cryogénique (vaporisation rapide du GNL au contact de l'eau ou de surfaces chaudes), leur forte inflammabilité (propane et butane) et leur capacité à former des nuages de vapeur inflammables.

II.7.2 Sources potentielles d'incendie et scénarios majeurs :

Les sources d'incendie sont multiples et directement liées aux équipements de procédé, aux conditions cryogéniques et aux opérations courantes. Les principales incluent :

- Les fuites de gaz inflammables au niveau des tuyauteries, brides, vannes et joints, pouvant générer des jets de feu ou des nuages de vapeur inflammables
- Les déversements de GNL ou de liquides cryogéniques lors des transferts ou débordements des bacs de stockage, avec vaporisation rapide du produit

- Les ruptures mécaniques ou pertes d'intégrité des équipements (compresseurs, turbines, pompes cryogéniques, échangeurs principaux MCHE)
- Les surpressions lors du chargement des méthaniers sur les quais M4 et M5
- Le contact entre le GNL et l'eau ou des surfaces chaudes pouvant provoquer un Rapid Phase Transition (RPT)
- Les sources d'ignition présentes dans la zone utilités, notamment les chaudières haute pression.

II.7.3 Zones à risque élevé :

Le complexe GL2/Z est une installation classée à haut risque en raison des volumes importants d'hydrocarbures liquéfiés manipulés dans des conditions extrêmes de température et de pression. La sécurité du site s'articule autour de quatre zones névralgiques :

1. Zone de Stockage « Terminal » (GNL et Gazoline) Cette zone présente le potentiel de danger le plus élevé en raison des inventaires massifs stockés.

- Infrastructures : Trois bacs de GNL de 100 000 m^3 chacun (double paroi, toit suspendu) et deux bacs de gazoline de 14 000 m^3 (toit flottant).
- Risques majeurs : Rupture de bac (scénario catastrophe) ou un déversement, BLEVE, UVCE et feu de cuvette.
- Effet domino : Forte probabilité de propagation aux bacs voisins et au complexe mitoyen GL1/Z par rayonnement thermique.

2. Zone de Procédé (Process) Cette zone concentre les risques liés à la complexité technique et aux pressions élevées du procédé de liquéfaction.

- Configuration : Six trains de liquéfaction indépendants utilisant le procédé APCI au réfrigérant mixte (MCR).
- Points critiques : Unités de décarbonatation, déshydratation, fractionnement et plates-formes de compression (compresseurs propane et MCR).
- Détection et sécurité : 32 détecteurs de gaz combustible (AIT) par train, détecteurs de flammes IR, systèmes d'arrêt d'urgence PSD/ESD, et skids à poudre de 2 000 kg positionnés à proximité des équipements sensibles.

3. Réseau des Torches et Brûlot : Le système de torche constitue l'ultime barrière de sécurité pour l'évacuation des gaz.

- Composition : Quatre torches (chaude, froide, basse pression GNL, mise à froid des méthaniers) et un brûlot pour l'élimination des condensats.
- Risques associés : Flux radiatif intense, fumées noires en cas de mauvaise combustion.

- Fonction : Évacuation sécurisée des fluides lors des démarrages, arrêts d'urgence et marches perturbées.

4. Zone des Utilités (Soutien Critique) Bien qu'auxiliaire, cette zone est essentielle car elle alimente les systèmes de sécurité et les compresseurs.

- Équipements : Chaudières haute pression (62 bars) et turbogénérateurs.
- Risques spécifiques : Explosion de chaudière ou formation de nuage inflammable dans la chaufferie

II.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le complexe GL2/Z de Sonatrach, ses principales installations ainsi que les dispositifs de sécurité mis en œuvre. L'analyse a montré que la présence de substances inflammables et cryogéniques expose le complexe à des risques significatifs d'incendie et d'explosion. Malgré les mesures de prévention, les systèmes de détection et les moyens de lutte contre l'incendie déployés pour garantir la sécurité des installations et du personnel, ces risques demeurent présents. Dans ce contexte, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation de scénarios d'incendie à l'aide du logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS), afin d'évaluer leurs conséquences potentielles et d'améliorer les stratégies de maîtrise des risques.

CHAPITRE III : MODELISATION SOUS FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

III.1 Introduction

Les incendies de bacs de stockage d'hydrocarbures constituent l'un des risques majeurs dans les installations pétrolières et gazières en raison de leurs conséquences importantes sur les personnes, les équipements et l'environnement. La gazoline, caractérisée par une forte inflammabilité et une grande volatilité, peut engendrer plusieurs phénomènes dangereux tels que les incendies de nappe, les explosions de vapeurs et les effets domino.[3]

Dans ce contexte, la simulation numérique représente un outil essentiel pour analyser le comportement du feu et évaluer ses conséquences thermiques. Le présent chapitre porte sur la description du scénario d'incendie étudié ainsi que sa modélisation à l'aide du logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS). Il présente les caractéristiques de l'installation étudiée, l'identification des dangers potentiels, les hypothèses de modélisation et l'analyse des résultats obtenus afin d'évaluer les niveaux de risque et les mesures de maîtrise adaptées.

Dans ce chapitre notre travail consiste à évaluer, quantifier et maîtriser les risques majeurs liés au stockage de 14 000 m³ de gazoline dans un bac toit flottant, en mettant l'accent sur le scénario crédible d'un incendie consécutif à un déversement important de type pool fire. À travers une approche combinée d'Étude de Dangers Détaillée (EDD) renforcée par une modélisation précise des dynamiques d'incendie sous Fire Dynamics Simulator (FDS), l'étude identifie les dangers intrinsèques (propriétés physico-chimiques inflammables et volatiles de la gazoline), opérationnels (remplissage, maintenance, débordement) et externes (foudre, effets dominos, conditions météo extrêmes).

III.1.2 Méthodologie générale adoptée

La méthodologie adoptée repose sur une approche combinant l'APR, l'étude HAZOP, l'Arbre des Causes et la simulation numérique par FDS. L'APR a permis d'identifier les principaux dangers et scénarios accidentels liés au bac de stockage de gazoline. L'étude HAZOP a ensuite analysé les déviations possibles du fonctionnement normal afin de déterminer leurs causes et conséquences. L'Arbre des Causes a été utilisé pour étudier le scénario d'incendie retenu et identifier les facteurs ayant conduit à son déclenchement. Enfin, le logiciel FDS a permis de simuler l'évolution de l'incendie et d'évaluer ses effets thermiques sur les installations, les personnes et l'environnement. Cette démarche a permis de mieux comprendre les risques et de proposer des mesures adaptées pour améliorer la sécurité de l'installation.

III.2 Description de l'installation et de l'environnement :

III.2.1 Description détaillée du bac de gazoline :

Le complexe GL2Z comprend deux réservoirs de stockage de gazoline identifiés sous les références 2130-FA et 2130-FB. Ces réservoirs servent à recevoir la gazoline produite sur site, à la stocker temporairement et à l'expédier soit par transfert terrestre, soit par chargement maritime.

1.Caractéristiques géométriques et capacités :

Chaque réservoir est un cylindre vertical avec les dimensions suivantes :

- Diamètre intérieur : 36,6 mètres
- Hauteur de la coque : 15,6 mètres

La capacité nominale unitaire indiquée dans les documents de conception varie entre 14 462 m^3 et 14 468 m^3. En opération, le volume maximum utilisé est fixé à 13 800 m^3.

Tableau 5: Conditions normales de stockage

Paramètre	Valeur
Pression	Atmosphérique (environ 1,03 bar)
Température	Ambiante (sans contrôle thermique actif)
Gestion du débit	Bien que le système puisse techniquement accepter un débit d'alimentation allant jusqu'à 1 000 m^3/h, les opérateurs maintiennent généralement le débit à 800 m^3/h

Alarmes de niveau : Le système de contrôle est configuré avec deux seuils critiques :

- Niveau bas (Low level) : Une alarme est réglée *à 1,5 mètre*, ce qui correspond à la hauteur de sécurité maintenue par les béquilles du toit flottant au fond du bac.
- Niveau haut (High level) : Une alarme est réglée à *13,7 mètres* pour prévenir tout risque de débordement



Figure 6: les bacs de gazoline 2130-FA et 2130-FB

2. Origine du produit et circuits d'alimentation : La gazoline arrive dans ces bacs par deux voies principales :

- Production interne du complexe GL2Z : elle provient du soutirage de fond des colonnes de débutanisation X53-E installées sur les six trains de production. Ce soutirage récupère la fraction légère après séparation des butanes et des composants plus lourds dans les colonnes.
- Réception depuis le complexe voisin GL1Z : via des lignes de transfert inter-complexes.

Deux vannes de recyclage, FY 2401et FY 2402, sont installées de chaque côté de l'installation. Elles permettent de renvoyer une partie de la gazoline vers les unités de production ou vers GL1Z pour rééquilibrage, ajustement de qualité ou lors d'arrêts partiels.

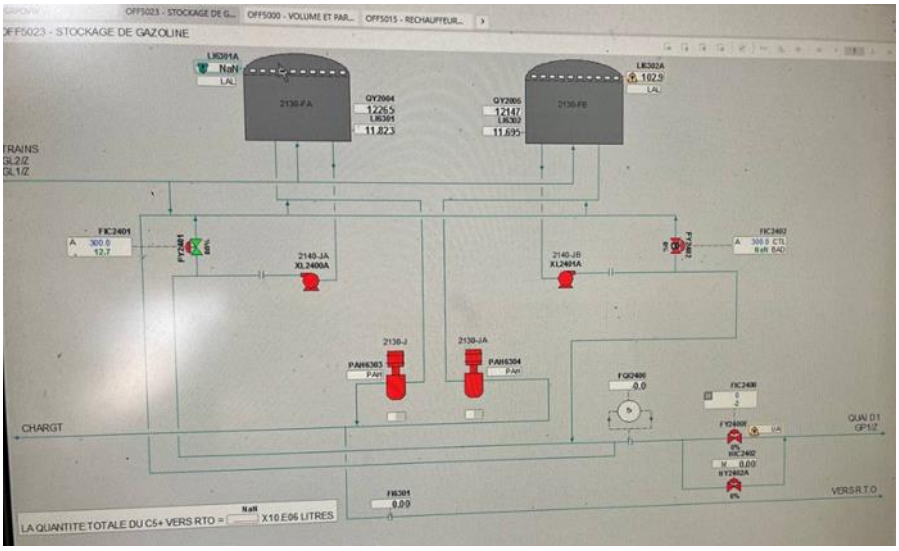


Figure 7 : Légende de la Figure

3. Systèmes de pompage et d'expédition du produit

L'évacuation de la gazoline s'effectue selon deux modes distincts :

- Transfert terrestre : Le produit est pompé vers le complexe GP1Z ou vers l'unité RTO à l'aide de deux pompes principales :
  - 2140-JA (XL2400A)
  - 2140-JB (XL241A)
- Le débit passe ensuite par les vannes montées en parallèle FY2400E et HY2402, qui permettent de sélectionner ou de combiner les chemins de transfert selon les besoins opérationnels.

Chargement maritime : Pour l'expédition vers les navires, deux pompes dédiées sont utilisées :

- 2130-J (PAH6303)
- 2130-JA (PAH6304)

Ces pompes aspirent la gazoline depuis les bacs et la refoulent vers les bras de chargement installés sur le quai. Les opérations incluent des étapes de mise en pression des lignes, de purge d'air et de contrôle des connexions aux manifolds des navires.

4. Conception du réservoir et écran flottant interne

Les deux bacs sont construits selon le type cylindrique vertical à toit fixe externe avec toit flottant interne (Internal Floating Roof – IFR).

Le toit flottant repose directement sur la surface de la gazoline et suit son niveau pendant les phases de remplissage et de vidange. Cette conception minimise l'espace de vapeur entre la surface du liquide et le toit fixe.

III.2.2 Description des installations environnantes :

1. Installations de Stockage et Rétentions :

- Stockage Cryogénique GNL : À proximité immédiate des bacs de gazoline se trouvent 3 bacs aériens de GNL (2101-FA/FB/FC) d'une capacité unitaire de 100 000 m³. Ils maintiennent le gaz liquéfié à -162°C sous pression atmosphérique (1,03 bar).
- Cuvettes de Rétention : Les zones de stockage sont entourées de cuvettes de sécurité dimensionnées pour contenir environ 1,5 fois le volume des réservoirs.

2. Réseau de Pipelines et Transferts :

- Alimentation Gaz Naturel : Le complexe est alimenté par deux gazoducs majeurs de 42 pouces (GZ1 et GZ3) transportant le gaz depuis Hassi R'Mel.
- Lignes de Transfert : Des pipelines relient le GL2Z aux complexes voisins :
- Vers GP1Z : Expédition du propane et du butane pour leur commercialisation.
- Interconnexion GL1Z : Liaison stratégique à l'ouest pour la flexibilité du stockage et du chargement du GNL.
- Collecteurs de Chargement : Un collecteur commun achemine le GNL vers les deux postes de chargement du quai N°2.

3. Systèmes de Pompage et Utilités :

- Pomperie d'Eau de Mer : Une station vitale comprenant 6 pompes de grande puissance (capacité unitaire de 32 000 à 37 000 m³/h) pour le refroidissement des trains de liquéfaction.
- Pomperie Incendie : Le site dispose d'un réseau maillé alimenté par des pompes électriques et diesel de 3 000 m³/h.
- Chargement GNL : Cinq pompes dédiées assurent un débit total de chargement de 10 000 m³/h vers les méthaniers.

4. Circulation et Accès :

- Réseau Routier : Le site est desservi par une route côtière et un réseau interne où la vitesse est strictement limitée à 25 km/h. L'accès aux zones de procédé est régi par des procédures strictes d'autorisation pour les engins.

5. Zones ATEX et Dispositifs de Sécurité

- Classification ATEX : Toutes les zones de procédé et de stockage sont classées comme atmosphères explosives, imposant l'usage d'équipements électriques antidéflagrants (ADF).
- Détection : La surveillance est assurée par un réseau de 180 détecteurs de gaz infrarouges (Zellweger AIT), complété par des détecteurs de flammes, de fumée et de basse température.
- Systèmes de Torches : Quatre types de torches (chaude, froide, BP et Boil-off) gèrent les rejets gazeux en toute sécurité.



Figure 8 : Localisation des bacs de gazoline et des installations environnantes [17]

III.2.3 Description de l'environnement extérieur et conditions naturelles

Le complexe de liquéfaction GL2Z est implanté dans un environnement industriel et naturel spécifique sur la côte nord-ouest de l'Algérie, dont les caractéristiques climatiques et géologiques dictent les contraintes d'exploitation et de sécurité.

Limites et Infrastructures Voisines :

Le site occupe une superficie de *72 hectares* sur un terrain plat à Bethioua, dans la zone industrielle d'Arzew. Il se situe à environ 40 km à l'est d'Oran et à une altitude variante entre 20 et 54 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ses limites sont clairement définies :

- Nord : Bordé par la mer Méditerranée et le port gazier El Djedid.
- Sud : Limité par le village de Béthioua et la route d'accès principale de la zone industrielle.
- Ouest : Mitoyen du complexe GL1Z, avec lequel il est interconnecté.
- Est : Bordé par l'usine de dessalement KAHRAMA et le projet GL3Z



Figure 9 : localisation géographique du site de GL2Z

III.3 Identification des dangers et des risques liés aux bacs de stockage de gazoline :

III.3.1 Propriétés physico-chimiques de gazoline :

La gazoline (essence) est un mélange d'hydrocarbures légers, dont l'hexane, le n-pentane et l'isopentane font partie des composants typiques des fractions légères, influençant ses propriétés inflammables et volatiles. Ces composés partagent des caractéristiques physico-chimiques comme une faible densité, une haute volatilité et une inflammabilité élevée, essentielles en raffinage pétrolier et sécurité industrielle.[18]

Tableau 6: Propriétés physico-chimiques de gazoline [18]

Propriété	Hexène	n-Pentane	Isopentane
Masse molaire (g/mol)	84.16	70.13	72.15
Formule moléculaire	C_6H_{12}	C_5H_{12}	$(CH3)_2CHCH_2CH_3$
État à 20°C	Liquide	Liquide	Liquide
Point d'ébullition (°C)	63.5	29.9	27.8
Point de fusion (°C)	-95.3	-165.2	-159.9
Densité (g/cm³ à 20°C)	0.673	0.641	0.620
Indice d'octane (RON)	~75 (mélange)	~80-90	92-93 (excellent antidétonant)
Énergie de combustion (MJ/kg)	46.3	46.4	47.4
Pression de vapeur (kPa à 38°C)	~50	~120	~140 (très volatil)
Solubilité dans l'eau (mg/L à 25°C)	50	150	40
Teneur en carbone (% masse)	85.7	85.6	83.3

III.3.2 Propriétés Physico-Chimiques du Mélange Hypothétique d'Essence :

Les propriétés présentées ci-dessous ont été estimées pour ce mélange spécifique à partir des fractions massiques. Les valeurs ont été calculées par moyennes pondérées selon la loi de Raoult pour les propriétés additives.[19]

Tableau 7: Propriétés Physico-Chimiques du Mélange Hypothétique d'Essence[19]

Propriété	Valeur Calculée	Méthode de Calcul	Comparaison Essence Standard
Masse molaire moyenne (g/mol)	78.2	Pondérée (41%×84.2 + 33%×72.2 + 26%×70.1)	85-95 g/mol
Densité (g/cm³ à 20°C)	0.652	Pondérée volumique	0.72-0.78 (plus léger)
Point d'ébullition moyen (°C)	42.8	Pondérée	30-180°C (très volatil)
Pression de vapeur (kPa à 38°C)	98	Loi de Raoult	60-90 kPa (très élevé)
Indice d'octane (RON estimée)	86-88	Moyenne pondérée	87-98 (bon)

PCI (MJ/kg)	46.9	Pondérée	44-47 MJ/kg (excellent)
Température de point d'éclair (°C)	-25	Estimée (ASTM D93)	-40 à -10°C (hautement inflammable)

III.4 Présentation de l'outil de simulation Fire Dynamics Simulator (FDS) :

III.4.1 Définition du FDS :

Le Fire Dynamics Simulator (FDS) est un logiciel de mécanique des fluides numérique (CFD) spécifiquement conçu pour simuler les écoulements de fluides induits par les incendies. Il est développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) en collaboration avec le centre de recherche technique VTT de Finlande. C'est un logiciel libre et open-source appartenant au domaine public.

FDS fonctionne de pair avec Smokeview (SMV), un programme de visualisation qui permet d'afficher les résultats des calculs sous forme d'animations 3D (fumée, flammes, vecteurs de vitesse).

III.4.2 Principes Physiques Fondamentaux

FDS repose sur la résolution numérique des équations de Navier-Stokes, adaptées aux écoulements de gaz à faible vitesse et pilotés thermiquement. FDS ne simule pas les ondes acoustiques (ondes sonores). Il utilise une formulation où le nombre de Mach est inférieur à 0,3. Cela permet de simplifier les calculs tout en modélisant avec précision les variations importantes de température et de densité causées par le feu.

Modélisation de la Combustion et du Rayonnement :

- **Combustion :** Pour la plupart des applications, FDS emploie un modèle de fraction de mélange (mixture fraction). La réaction chimique est considérée comme une étape unique, contrôlée par le mélange de l'air et du combustible.
- **Rayonnement Thermique** : Le transfert de chaleur par rayonnement est calculé en résolvant l'équation de transfert radiatif pour un "gaz gris" via la méthode des volumes finis (FVM). Environ 100 angles discrets sont utilisés par défaut pour ce calcul.

III.4.2 Choix du Fire Dynamics Simulator (FDS) pour la modélisation :

Le choix de Fire Dynamics Simulator (FDS) pour modéliser un feu de cuvette de rétention (pool fire) de pentane à grande échelle sur le complexe GL2/Z repose sur plusieurs avantages techniques, physiques et pratiques qui en font un outil particulièrement adapté aux études de risques incendie en milieu industriel. Les raisons principales de ce choix :

1. Une formulation hydrodynamique optimisée : FDS utilise une approximation des équations de Navier-Stokes pour les bas nombres de Mach (Ma < 0,3). Cette méthode filtre les

ondes acoustiques tout en permettant de grandes variations de température et de densité provoquées par le feu. Cela permet au programme de prendre des pas de temps beaucoup plus longs qu'un code de dynamique des fluides classique, rendant les simulations de grands sites industriels techniquement réalisables.

2. La supériorité de la Simulation des Grandes Échelles (LES)

FDS repose principalement sur la LES (Large Eddy Simulation) qui résout directement les grandes structures tourbillonnaires. Cela permet de capturer la dynamique intermittente et oscillante des panaches de flamme dans les feux de nappe de grande dimension, offrant une meilleure prédiction du transport de chaleur et de fumée.

3. Des modèles de combustion et de nappe spécifiques : FDS propose des outils dédiés aux hydrocarbures comme le pentane :

- Modèle de fraction de mélange : Pour les simulations à grande échelle où le maillage est trop grossier pour résoudre la zone de flamme (quelques millimètres), FDS utilise un modèle "mixed is burnt". Il suit l'évolution des réactifs et des produits via des tables précalculées, ce qui est très efficace pour les feux industriels massifs.
- Pyrolyse liquide : FDS intègre un modèle de pyrolyse liquide basé sur l'équation de Clausius-Clapeyron, prenant en compte la température d'ébullition et la chaleur de vaporisation du combustible.
- Absorption en profondeur : Contrairement aux modèles simplistes, FDS gère l'absorption thermique radiative à l'intérieur de la nappe liquide via un coefficient d'absorption spécifique, ce qui est essentiel pour simuler le taux de combustion réel d'un déversement dans une cuvette.

4. Gestion avancée du rayonnement thermique : Le rayonnement est souvent le mode de transfert de chaleur dominant dans les grands feux de nappe.

- Méthode des Volumes Finis (FVM) : FDS résout l'équation de transfert radiatif en utilisant environ 100 angles discrets, calculant précisément comment la chaleur frappe les cibles environnantes (effet domino).
- Effet d'écran des fumées : Pour les très grands feux de nappe d'hydrocarbures, FDS est capable de simuler comment les suies (fumée noire) réabsorbent une partie de l'énergie, "protégeant" ainsi les objets distants du rayonnement direct, un phénomène critique pour les études de danger.

5. Performance et Passage à l'échelle (Scalability) : FDS supporte le calcul parallèle (MPI/Open MP) et utilise des maillages rectilignes optimisés. Cela permet de traiter des domaines

de calcul comportant plusieurs millions de mailles nécessaires pour simuler une cuvette de rétention à l'échelle du complexe GL2/Z.

6. Validation et Standard Industriel : Développé par le NIST et open-source, FDS a fait l'objet de nombreuses validations expérimentales. Il est largement utilisé dans le domaine de la sécurité industrielle pour l'analyse des conséquences d'incendies, l'évaluation du risque d'effet domino et l'aide à la décision HSE.

III.4.3 Domaines d'application en sécurité industrielle et HSE :

Analyse des conséquences d'accidents majeurs : Simulation précise des *pool fires*, jet fires, dispersion de vapeurs inflammables et flux thermiques radiants. Il excelle dans les scénarios cryogéniques de GNL où les modèles empiriques classiques (NFPA 59A, Sandia, PHAST) atteignent rapidement leurs limites. FDS modélise notamment l'effet d'écran des fumées (Smoke screening), où la suie réabsorbe l'énergie radiante, permettant d'éviter la surestimation des distances de sécurité dans les grands feux d'hydrocarbures typiques des sites Sonatrach.

Évaluation du risque d'escalade et d'effet domino (Thermal Domino Effect) : Quantification détaillée du flux thermique sur les équipements adjacents (réservoirs, pipelines, structures). Le modèle THIEF intégré permet en outre de prédire la défaillance thermique des câbles électriques, élément critique pour la sécurité fonctionnelle des installations.

Conception et validation des systèmes de protection incendie : Dimensionnement des systèmes de désenfumage, activation des sprinklers et détecteurs, performance des barrières coupe-feu et stratégies d'évacuation dans les installations complexes.

Études de risques quantitatifs (QRA) et études de dangers : Intégration dans les HAZID/HAZOP et QRA pour justifier les scénarios redoutés, en particulier la ruine de réservoirs cryogéniques de grande capacité dans les terminaux GNL tels que le complexe GL2/Z de Sonatrach.

Protection des personnes et évaluation toxicologique : Calcul des indices FED (Fractional Effective Dose) et FIC (Fractional Irritant Concentration) qui quantifient le temps disponible avant incapacitation humaine due aux gaz toxiques (CO, HCN, CO_2) et au manque d'oxygène. FDS est également un outil de référence pour analyser les phénomènes rapides tels que Backdraft et Flashover, améliorant ainsi les protocoles d'intervention des pompiers et la formation HSE.

Applications avancées et risques émergents : Modélisation du transport de fumée via les réseaux HVAC couplés, effet de cheminée (stack effect) dans les structures de grande hauteur, analyse des incendies de batteries lithium-ion (ESS), et évaluation des risques d'interface grâce au modèle de propagation de feu de végétation.

III.5 Définition et développement des scénarios d'accident

III.5.1 Démarche de sélection des scénarios

La sélection des scénarios d'accident retenus dans cette étude a été réalisée de manière structurée, systématique et conservative, conformément aux bonnes pratiques en matière d'analyse de risques incendie/explosion (normes NFPA 30, API 2510, circulaire DREAL, guide INERIS, et méthodologie HAZOP/LOPA).

Dans la prochaine section nous avons réalisés une étude de danger par les méthodes APR, HAZOP et arbre de cause afin de déterminer, identifier et prioriser les scénarios les plus crédibles et les plus pénalisants en termes de conséquences (incendie de nappe, feu de cuvette, effet domino, rayonnement thermique, dispersion de fumées toxiques) tout en restant réalistes vis-à-vis des installations du site (stockage de carburants, GNL, zone de déchets, torchère, etc.).

Méthodologie de sélection : La démarche a suivi les étapes suivantes :

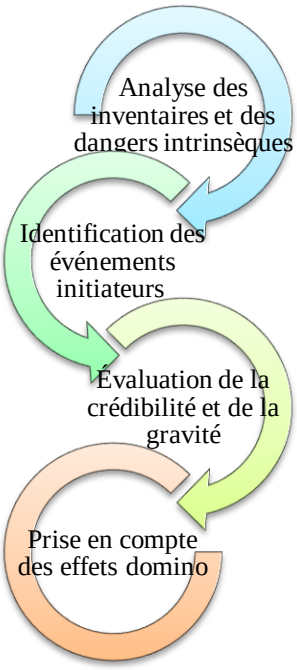


Figure 10 : Etapes de la Démarche de sélection des scénarios

III.7 Analyse et évaluation des risques

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode inductive qui consiste à identifier les dangers potentiels et les scénarios accidentels pouvant survenir sur l'installation. Elle permet d'évaluer la criticité des risques et de proposer des mesures de prévention et de protection adaptées. La criticité résiduelle (C) est déterminée à partir du produit de la gravité (G) et de la probabilité (P) : C = G × P.

Tableau 8: étude par la méthode APR sur les dangers liés à la conception et à la construction du bac

Catégorie	Risque spécifique	Causes	Conséquences	G	P	C résiduelle	Barrières / Mesures de maîtrise
Conception	Choix inadéquat des matériaux	Sélection d'acier non adapté à la gazoline	Corrosion, fuite, pollution, incendie	4	3	12	Revêtement interne, inspection corrosion, API 650
Conception	Fondation sous-dimensionnée	Mauvaise étude géotechnique	Déformation du fond, perte d'étanchéité	4	2	8	Étude de sol, contrôle de construction
Conception	Évents sous-dimensionnés	Mauvais calcul des débits respiration	Surpression, rupture du toit	4	2	8	Soupapes conformes API 2000
Conception	Absence HHLI	Défaut de conception instrumentation	Débordement, pool fire, effet domino	4	3	12	Système HHLI indépendant
Construction	Défauts de soudage	Contrôle CND insuffisant	Fuites, rupture locale	4	2	8	RT, UT, MT, PT des soudures
Conception	Mauvaise conception du toit	Soupapes ou joints défaillants	VCE, incendie, effondrement	4	2	8	Toit flottant conforme API 650
Conception	Absence protection foudre	Mise à terre défaillante	Inflammation directe du bac	4	3	12	Réseau foudre et mise à terre
Construction	Épaisseur insuffisante des viroles	Erreur fabrication	Rupture, perte rapide de contenu	4	2	8	Contrôle épaisseur, API 650

Conception	Tuyauterie d'entrée mal positionnée	Vitesse > 3 m/s	Vortex, débordement	3	2	6	Diffuseur d'entrée, limitation vitesse
Conception	Cuvette sous-dimensionnée	Volume <110%	Épanchement hors digue, domino	4	3	12	Capacité >110%, inspection
Conception	Vannes d'urgence inaccessibles	Mauvais positionnement	Impossibilité d'isolement rapide	4	2	8	Redondance et accessibilité

Tableau 9 : étude par la méthode APR sur les dangers liés aux opérations

Catégorie	Risque spécifique	Causes	Conséquences	G	P	C résiduelle	Barrières / Mesures de maîtrise
Remplissage	Sur-remplissage	Défaillance jauge, erreur opérateur	Déversement, incendie, pollution	4	3	12	HHLI, procédures, alarmes
Remplissage	Électricité statique	Mise à terre insuffisante	Inflammation des vapeurs	4	3	12	Mise à terre et liaison équipotentielle
Remplissage	Déplacement excessif toit flottant	Eau accumulée, pontons bloqués	Explosion pancake	4	2	8	Inspection toit flottant
Remplissage	Mauvaise sélection de bac	Erreur humaine	Débordement, incompatibilité	4	2	8	Double vérification, automatisation
Soutirage	Vidange excessive	Mauvais contrôle niveau	Dommages toit flottant	3	2	6	Limite basse niveau
Soutirage	Fuite joints ou vannes	Vieillissement, corrosion	Pollution, incendie	4	3	12	Maintenance préventive
Soutirage	Aspiration d'air	Niveau trop bas	Atmosphère explosive	4	2	8	Contrôle niveau minimum

Soutirage	Sources d'ignition non ATEX	Non-conformité matériel	Inflammation immédiate	4	3	12	Zonage ATEX, contrôle accès
Maintenance	Travaux à chaud	Permis de feu insuffisant	Incendie majeur	4	3	12	Permis feu, surveillance
Maintenance	Corrosion non détectée	Inspection insuffisante	Fuite brutale	4	3	12	RBI, inspection périodique
Maintenance	Sources d'ignition non contrôlées	Non-respect procédures	Incendie	4	3	12	Procédure HSE stricte
Maintenance	Gaz dans puisards	Ventilation insuffisante	Explosion	4	2	8	Détection gaz, ventilation
Maintenance	Fireproofing absent	Protection passive insuffisante	Effondrement, boilover, domino	4	3	12	Revêtement coupe-feu

Tableau 10: étude par la méthode APR sur les dangers externes

Catégorie	Risque spécifique	Causes	Conséquences	G	P	C résiduelle	Barrières / Mesures de maîtrise
Météorologique	Vents violents / tornades	Conditions climatiques extrêmes	Arrachement toit, pool fire	4	2	8	Ancrage renforcé, surveillance météo
Météorologique	Inondation	Crue, submersion	Pollution, explosion pancake	4	2	8	Digues, drainage
Météorologique	Tempête de grêle	Grêle importante	Déformation toit	3	2	6	Inspection post-événement
Météorologique	Température extrême	Canicule ou gel	Fissures, fuite	3	2	6	Surveillance température

Naturelle	Séisme >0,2 g	Activité sismique	Rupture bac, effet domino	4	2	8	Conception parasismique
Naturelle	Impact de foudre	Décharge atmosphérique	Incendie pleine surface	4	3	12	Paratonnerre et mise à terre
Mécanique	Collision engin	Circulation interne	Perforation et fuite	4	2	8	Barrières physiques
Mécanique	Chute d'objet lourd	Travaux levage	Déformation et fuite	4	2	8	Plan de levage sécurisé
Mécanique	Travaux excavation	Terrassement proche	Affaissement fondation	3	2	6	Autorisation travaux
Mécanique	Vibrations permanentes	Équipements voisins	Fatigue structurelle	3	2	6	Surveillance vibratoire
Malveillance	Sabotage / attaque	Acte volontaire	Explosion majeure	4	2	8	Contrôle d'accès, vidéosurveillance
Malveillance	Intrusion / vandalisme	Ouverture volontaire vannes	Pool fire, fuite	4	2	8	Gardiennage, contrôle accès

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) réalisée sur le bac de stockage de gazoline a permis d'identifier les principaux scénarios accidentels susceptibles d'affecter l'intégrité de l'installation ainsi que la sécurité des personnes et de l'environnement. Les risques les plus critiques concernent principalement le sur-remplissage du bac, l'absence de protection contre la foudre, les fuites liées à la corrosion, les travaux à chaud et les sources d'ignition en zone ATEX. Ces scénarios présentent une criticité résiduelle élevée en raison de leurs conséquences potentielles pouvant conduire à des incendies majeurs, des explosions ou des pollutions importantes[20], [21], [22]

III.7.4 Étude HAZOP du Bac de Stockage de Gazoline

L'étude HAZOP (Hazard and Operability Study) est une méthode structurée et systématique d'analyse des déviations par rapport aux conditions normales de fonctionnement. Elle a été réalisée sur les principaux nœuds du bac de stockage de gazoline.

Tableau 11: Etude HAZOP du bac de stockage de gazoline.

Nœud	Paramètre	Mot-guide	Déviation	Causes possibles	Conséquences potentielles	Sauvegardes existantes	Recommandations / Actions proposées
Bac de gazoline	Niveau	Plus	Niveau trop élevé	"Défaillance jauge / transmetteur, erreur opérateur, vanne d'admission bloquée ouverte"	"Débordement, formation de nappe, Pool Fire, pollution sol/eau"	"Alarme niveau haut (LAH), Interlock pompe"	Installation d'un niveau haut-haut (HH) indépendant (SIL 2) + vanne de blocage automatique
Bac de gazoline	Niveau	Aucun /Moins	Niveau trop bas	"Fuite importante, soutirage excessif, erreur opérateur"	"Aspiration de gaz (risque explosion), cavitation pompe, perte de confinement"	"Alarme niveau bas (LAL), Inspection visuelle"	Contrôle périodique par RBI + surveillance continue par radar niveau (redondance)
Bac de gazoline	Pression	Plus	Surpression	"Obstruction évent, augmentation température, incendie externe"	"Rupture toit, rejet de gazoline, Pool Fire ou Jet Fire"	Soupapes de respiration (PVRV)	Installation de deux PVRV redondants + contrôle périodique des éventes (API 2000)
Bac de gazoline	Pression	Moins	Dépression (vacuum)	"Soutirage rapide sans compensation, condensation rapide"	"Déformation / collapse du bac, perte d'intégrité"	Évents vacuum, soupapes respiration	Vérification annuelle des soupapes + installation de brise-vide si nécessaire
Bac de gazoline	Température	Plus	Température élevée	"Incendie adjacent (effet domino), exposition solaire, réaction exothermique"	"Augmentation pression, dégradation produit, risque BLEVE"	Réseau incendie, rideau d'eau	Mise en place d'un système automatique de refroidissement par eau (deluge) sur bacs adjacents
Ligne de remplissage	Débit	Plus	Débit excessif	"Erreur opérateur, défaillance régulation, bypass ouvert"	"Sur-remplissage rapide, débordement"	Procédures, supervision DCS	Automatisation complète du remplissage avec interlock haut niveau + débitmètre redondant

Ligne de remplissage	Débit	Aucun	Absence de débit	"Pompe arrêtée, vanne fermée, obstruction ligne"	"Arrêt production, perte de disponibilité"	Supervision DCS, alarme basse débit	Maintenance prédictive (vibration, thermographie) + procédure de redémarrage sécurisée
Bac de stockage	Étanchéité	Autre que	Fuite / Perte de	"Corrosion interne/externe, joint dégradé, impact mécanique, sur-remplissage"	"Pool Fire, pollution sol/eau, risque d'explosion vapeur"	Inspection RBI, revêtement anticorrosion	Mise en œuvre d'un programme RBI (Risk Based Inspection) renforcé + revêtement interne adapté
Atmosphère du bac / Zone	Composition	Plus	Concentration vapeurs	"Ventilation insuffisante, température élevée, remplissage"	"Formation d'atmosphère explosive (ATEX), explosion"	Détecteurs gaz (LEL), ventilation naturelle	Installation de détecteurs gaz redondants (LEL + HH) + système de ventilation forcée en cas besoin
Bac de gazoline	Niveau /	Reverse	Remplissage inversé	"Erreur de vannes, mauvaise configuration ligne"	"Contamination produit, surpression"	Procédures verrouillage, étiquetage	Renforcement des LOTO et utilisation de vannes à verrouillage mécanique

L'étude HAZOP a mis en évidence plusieurs déviations critiques susceptibles d'affecter le fonctionnement sûr du bac de stockage de gazoline. Les déviations les plus préoccupantes concernent le niveau élevé, la surpression, l'augmentation de la température et la perte de confinement. Ces situations peuvent engendrer des phénomènes dangereux tels que le débordement du bac, la formation de nappes inflammables, les incendies de type Pool Fire ou encore les explosions de vapeurs inflammables.

Les résultats obtenus confirment que les risques majeurs sont principalement associés aux pertes de confinement et aux sources potentielles d'inflammation. Une gestion rigoureuse de l'intégrité mécanique ainsi qu'un respect strict des procédures d'exploitation et de maintenance sont donc essentiels pour maintenir le risque à un niveau acceptable.

III.7.5Arbre des causes de l'incendie de nappe dans le bac de gazoline

L'arbre des causes est un outil graphique qui permet d'analyser les causes racines d'un scénario accidentel choisi. Il a été réalisé pour le scénario d'incendie de nappe dans la cuvette de rétention.

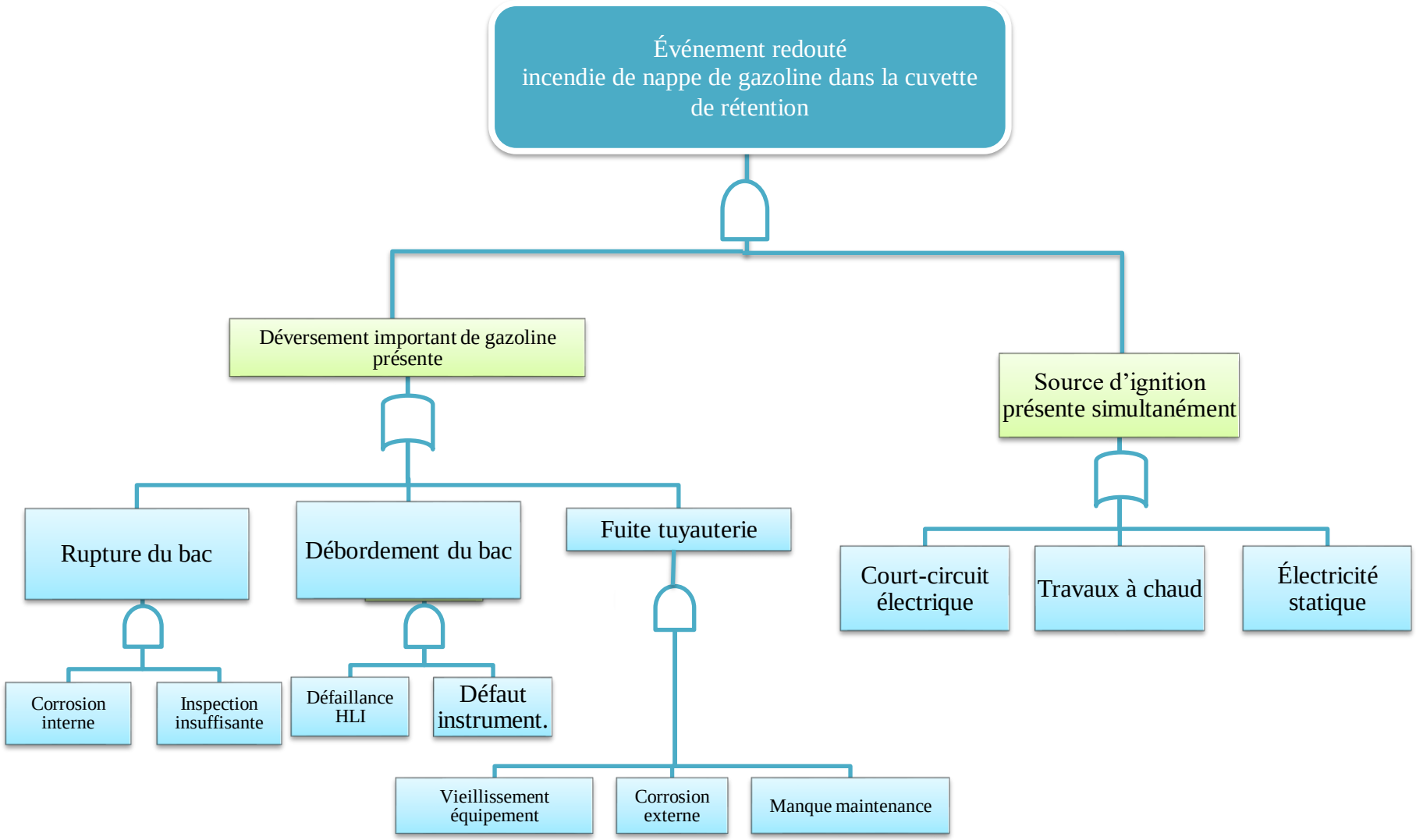


Figure 11 : arbre des défaillances

L'arbre des causes élaboré pour le scénario d'incendie de nappe dans la cuvette de rétention met en évidence la combinaison de deux conditions nécessaires et suffisantes à la survenue de l'accident *: la présence d'une fuite ou d'un déversement de gazoline* (perte de confinement) et *l'existence d'une source d'inflammation efficace.* Ces événements résultent de plusieurs causes intermédiaires et élémentaires détaillées dans la figure.

- **Événement indésirable (Top Event)** : Incendie de nappe de gazoline dans la cuvette de rétention
- **Branche 1 : Perte de confinement**
  - Sur-remplissage du bac
  - Corrosion / perforation du bac ou tuyauteries
  - Défaillance des équipements (vannes, joints, brides)
  - Erreur humaine / mauvaise manœuvre
  - Surpression interne (défaillance soupape)
- **Branche 2 : Source d'inflammation**
  - Électricité statique (mise à la terre défaillante)
  - Impact de foudre (protection insuffisante)
  - Travaux à chaud à proximité
  - Équipements non conformes ATEX
  - Étincelles mécaniques ou véhicules

Porte logique : ET (AND) entre les deux branches principales

Cette analyse démontre que la prévention du risque repose simultanément sur la maîtrise des pertes de confinement et sur l'élimination ou le contrôle des sources d'ignition. Le renforcement des inspections périodiques, la maintenance préventive, le contrôle strict des travaux à chaud, la mise à la terre systématique et le respect rigoureux des exigences ATEX constituent des mesures essentielles et complémentaires pour prévenir ce scénario accidentel.

III.7 analyses de l'incendie par le FDS software

III.7.2 Description de Scénario

Dans cette étude et à partir des résultats de l'étude par APR, HAZOP et arbre des causes, nous avons retenu le scénario de *Déversement majeur de gazoline dans la cuvette* avec incendie de nappe important et risque domino

- Description : Rupture ou débordement important conduisant à la formation d'une nappe de gazoline dans la cuvette de rétention (environ 100 m × 65 m), suivie d'un allumage rapide.
- Surface de feu : ≈ 6 000 à 7 000 m².
- Effets étudiés :

- Puissance thermique dégagée (HRR).
- Rayonnement sur les bacs voisins (TOP_Tank et BOTTOM_Tank gazoline + bac GNL).
- Températures des parois.
- Visibilité et toxicité (CO + suies).
- FED (Fractional Effective Dose) pour le personnel.

Ce scénario est considéré comme représentatif et enveloppant pour l'ensemble des risques incendie majeurs du site. Il permet d'évaluer à la fois les conséquences directes et les effets domino potentiels.

III.5.3 Choix de scénario :

Ce scénario combine une probabilité non négligeable (défaillance de bac ou erreur opérationnelle) avec des conséquences sévères potentielles (pertes humaines, dommages matériels importants, impact environnemental). Il est donc adapté pour dimensionner les mesures de prévention et de protection (déluge, écrans thermiques, plans d'urgence, etc.).

III.5.4 Incendie /Feu suite à un déversement important dans le bac de gazoline

Le scénario étudié dans cette simulation correspond à un accident majeur de type Pool Fire résultant d'un déversement massif de gazoline au sein de la cuvette de rétention associée à un bac atmosphérique de stockage d'une capacité de 14 000 m³. Ce scénario représente l'un des événements les plus critiques pouvant survenir dans une installation de stockage d'hydrocarbures légers en raison de la forte inflammabilité de la gasoline, de la rapidité de propagation des flammes ainsi que des risques importants d'effets domino sur les équipements voisins.

La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS) afin d'évaluer le comportement thermique de l'incendie, la dispersion des fumées, les flux radiatifs ainsi que les conséquences potentielles sur les installations industrielles voisines et les opérateurs présents sur le site.

III.6 Paramètres d'entrée du modèle FDS pour le scénario principal

Tableau 12: Caractéristiques du bac et du déversement

Bac concerné	Bac atmosphérique à toit flottant d'une capacité nominale de 14 000 m³.
Diamètre du bac	36,6 m (rayon = 18,3 m).
Produit	Gasoline
Déversement	-Libération totale ou très importante du contenu du bac dans la cuvette de rétention (surface approximative : 100 m × 63 m environ). -La nappe de liquide se forme sur une épaisseur initiale faible (de l'ordre

	de quelques centimètres) sur l'ensemble de la surface de la cuvette

Tableau 13: Conditions environnementales du site

Vent	Vitesse = 5 m/s, direction = 315° (Nord-Ouest).
Température ambiante	Non spécifiée explicitement (valeur par défaut FDS ≈ 20°C).
Domaine de simulation	Grande dimension (environ 508 m × 208 m × 72 m), découpé en 6 maillages (meshes) pour optimiser le calcul parallèle.

Tableau 14: Caractéristiques du déversement de gazoline

Produit : Gazoline modélisée par un mélange ternaire :	Hexène (HEXENE) : 41 %
	Isopentène (ISOPENTENE) : 33 %
	N-Pentène (N-PENTENE) : 26 %
Espèce globale	TOTAL_FUEL
Pouvoir calorifique	HEAT_OF_COMBUSTION = 44 400 kJ/kg
Rendement en suie	SOOT_YIELD = 0,06
Rendement en CO	CO_YIELD = 0,02
Réaction :	Réaction à une étape (REAC_GASOLINE)
Surface de combustion :	&VENT ID='TOP_BUND_FIRE'
Coordonnées :	XB=95.0, 191.0, 76.0, 139.0, 0.0, 0.0 (Surface ≈ 96 m × 63 m ≈ 6 048 m²)

Tableau 15: Caractéristique de la surface de la cuvette

Surface de la nappe	Zone de la cuvette de rétention couvrant approximativement 96 m × 63 m (délimitée par XB = 95.0 à 191.0 ; YB = 76.0 à 139.0).
Épaisseur de la nappe	Modélisée par THICKNESS = 0.01 m sur la surface POOL_FIRE_TOP.
Comportement de combustion	Taux de propagation de flamme fixé à SPREAD_RATE = 0.03 m/s.
Ignition	Source localisée (&SURF ID='IGNITOR' associée à l'obstacle IGNITION_SOURCE_TOP) positionnée au centre de la nappe (environ X=140 m, Y=110 m), simulant une inflammation rapide par étincelle ou source chaude.

Tableau 16: Éléments structuraux a modélisés

Deux bacs gasoline	A toit flottant (diamètre 36,6 m).
Un bac GNL	(Diamètre 67,64 m) en acier 9% Ni + perlite, situé à proximité.
Cuvettes de rétention	(Bunds) en béton pour les deux zones.
Zone déchets	Importante au Nord-Est avec divers obstacles (palettes, conteneurs, ferrailles, tambours, pipes, etc.) pouvant influencer la propagation du panache et le rayonnement.
Torchère (Flare)	Active en permanence.
Durée de simulation	Temps final (T_END) = 180 secondes (3 minutes), durée suffisante pour observer la phase de développement et la phase établie de l'incendie

Tableau 17: Paramètres géométriques et matériaux des installations modélisées

Bacs à gazoline (TOP_Tank et BOTTOM_Tank)	Modélisés en géométrie cylindrique (GEOM) avec un rayon de 18,3 m et une hauteur de 15,6 m, en acier carbone (CARBON_STEEL, épaisseur 15 mm)
Bac GNL (Tank_LNG_GL2Z)	Modélisé en géométrie cylindrique avec un rayon de 33,82 m et une hauteur de 28 m, paroi multicouche (acier 9% Ni / perlite / acier 9% Ni, épaisseurs 20 mm / 150 mm / 15 mm).
Toit flottant	Représenté par un obstacle cylindrique indépendant (OBST) en acier carbone d'épaisseur 10 mm
Cuvettes de rétention	Modélisées par des obstacles (OBST) en béton (CONCRETE) d'épaisseur 20 cm pour les parois et le fond.
Zone de déchets	Ensemble d'obstacles représentant des palettes, conteneurs, ferrailles, tambours, tuyauteries et débris divers avec des hauteurs variant de 1,5 m à 4,2 m.
Torchère (Flare)	Modélisée avec une tour principale de 55 m de hauteur et une flamme permanente (VENT avec HRRPUA = 4000 kW/m²).

Tableau 18: Dispositifs de mesure (Devices) et sorties

Puissance thermique	HRR_TOTAL (intégrale volumique sur la zone de feu)
Températures	Cœur de flamme, panache à 10 m, et températures de paroi des bacs
Flux thermiques	Flux radiatifs et totaux sur les bacs adjacents
Impacts humains et environnementaux	FED, visibilité, concentration de suie et de CO
Sorties visualisées	Coupes (SLCF) en température, vitesse et HRRPUV ; nuages de suie (SM3D)

6.2 Résultats des simulations

6.2.1 Évolution temporelle du feu (HRR, température, panache de fumée)

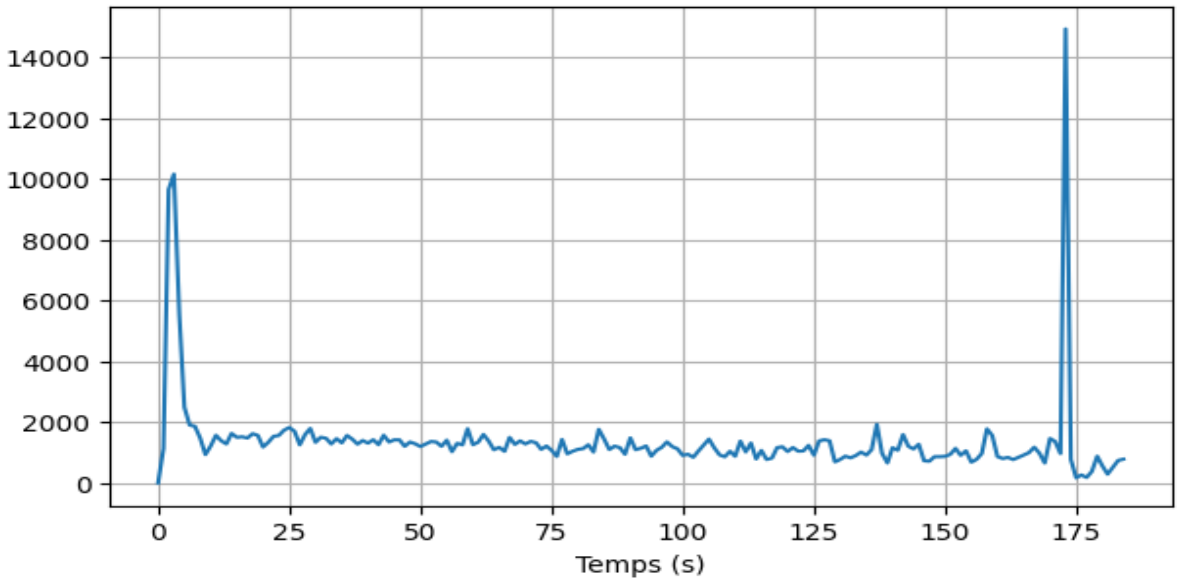


Figure 12: évolution du HRR

Le taux de dégagement calorifique (HRR) présente une phase de croissance très rapide après l'allumage. Le HRR atteint un maximum d'environ ***14,934 MW*** à ***t = 173.0 s.*** La montée initiale est caractéristique d'un feu de nappe fortement ventilé. Après le pic, des fluctuations importantes apparaissent, traduisant les interactions entre la combustion, le vent imposé (5 m/s) et les phénomènes turbulents du panache.

- Phase de croissance : augmentation rapide du HRR après l'allumage.
- Pic de HRR : valeur maximale atteinte vers 173 s.
- Plateau : régime quasi-stationnaire avec fluctuations turbulentes.

- Décroissance : diminution progressive liée à la réduction du taux de vaporisation du combustible.
- Comparaison HRR imposé / simulé : le HRR simulé varie autour de la valeur théorique attendue et reflète les effets aérodynamiques et thermiques du scénario.

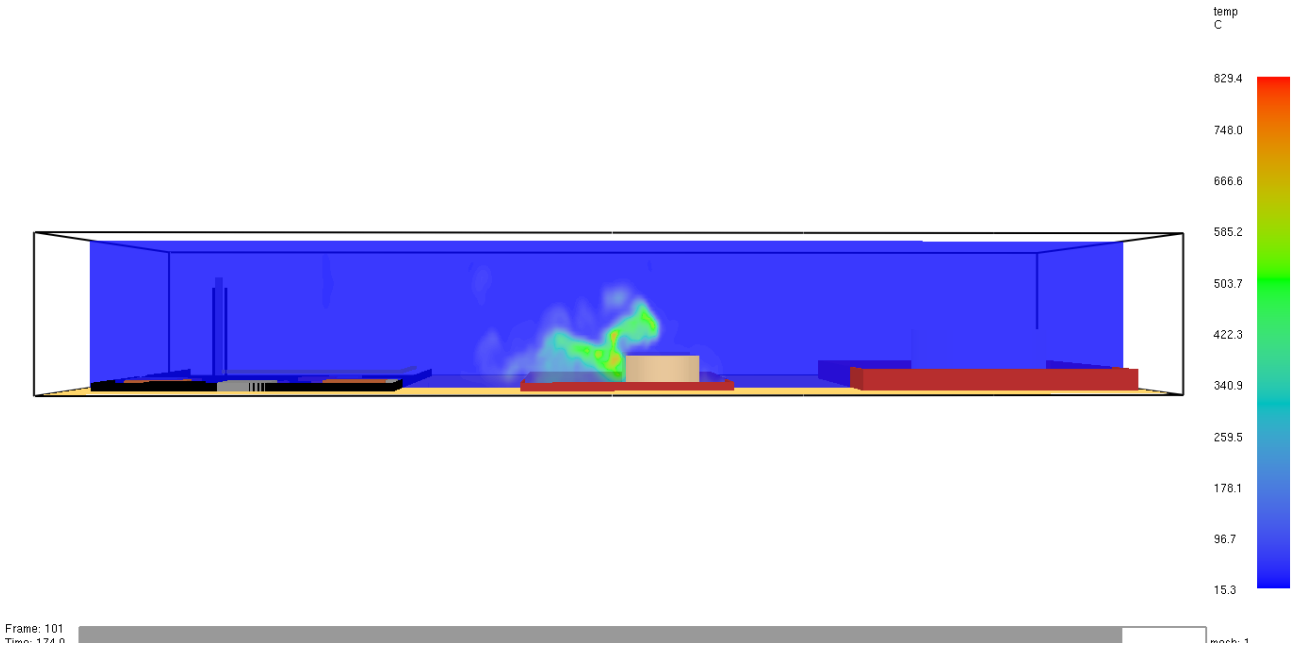


Figure 13: Distribution spatiale de la température et développement du panache de fumée à t = 174 s (simulation FDS – Smokeview)

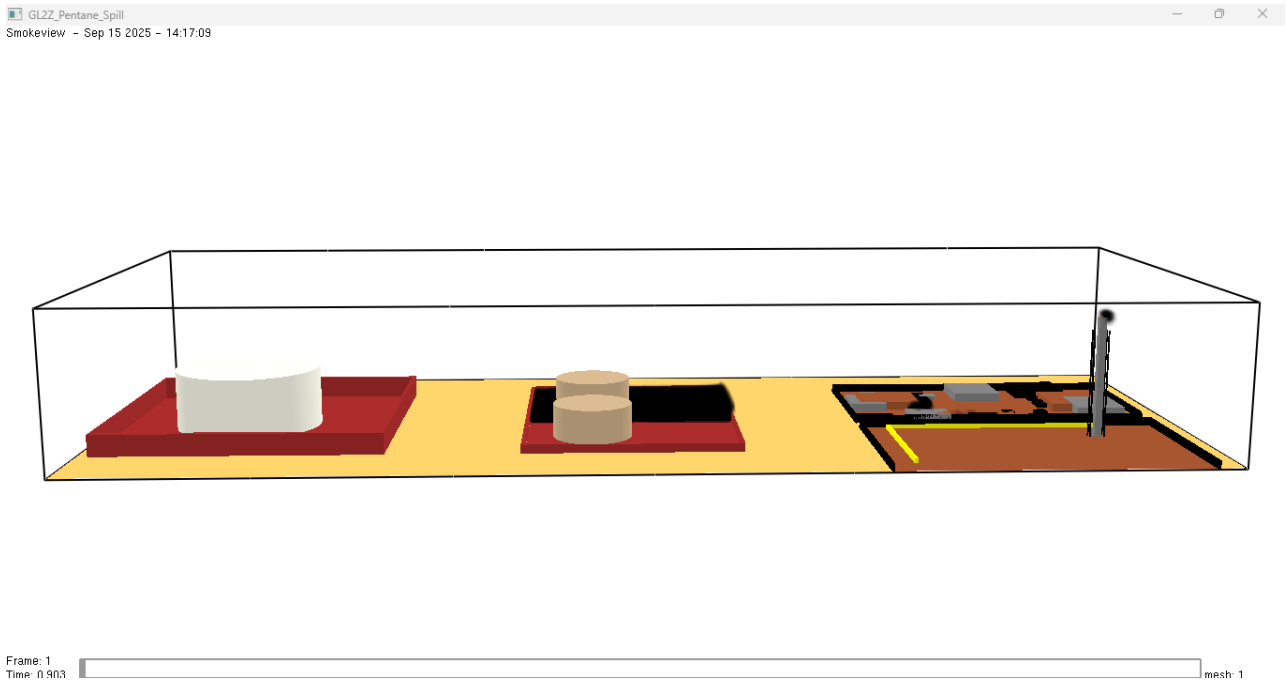


Figure 14: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈ 0.9s (simulation FDS)

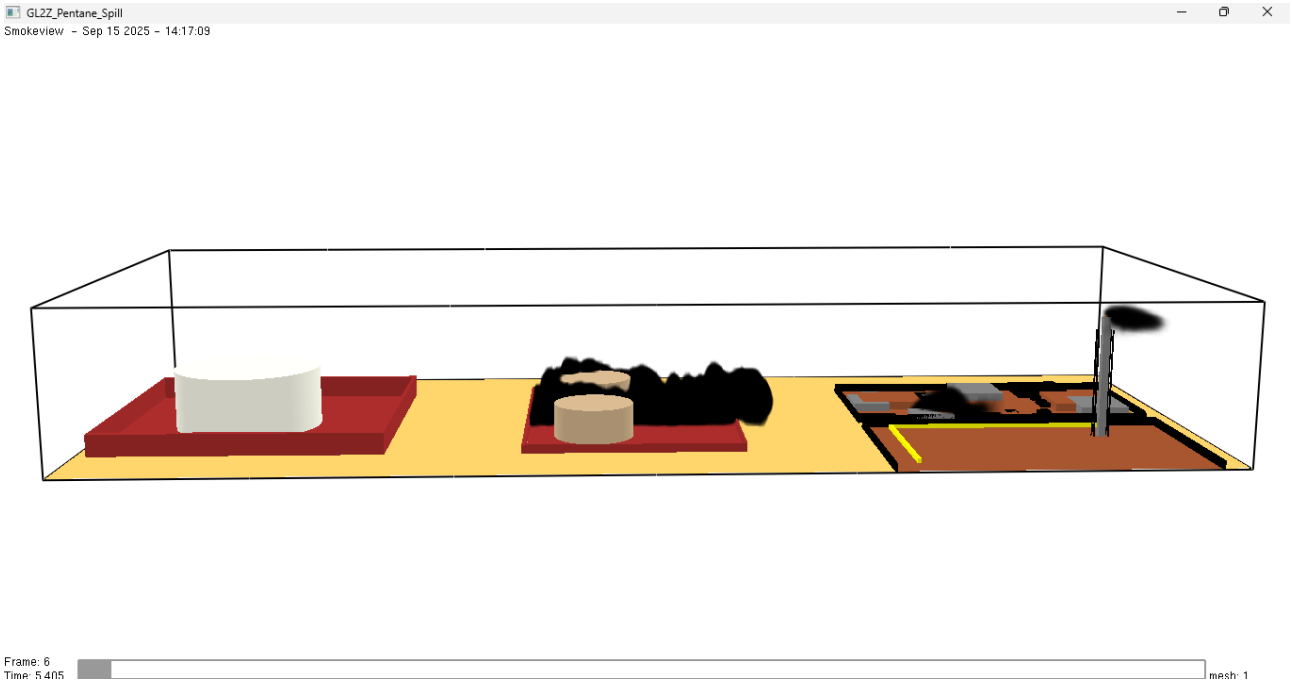


Figure 15: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈ 5,4s (simulation FDS)

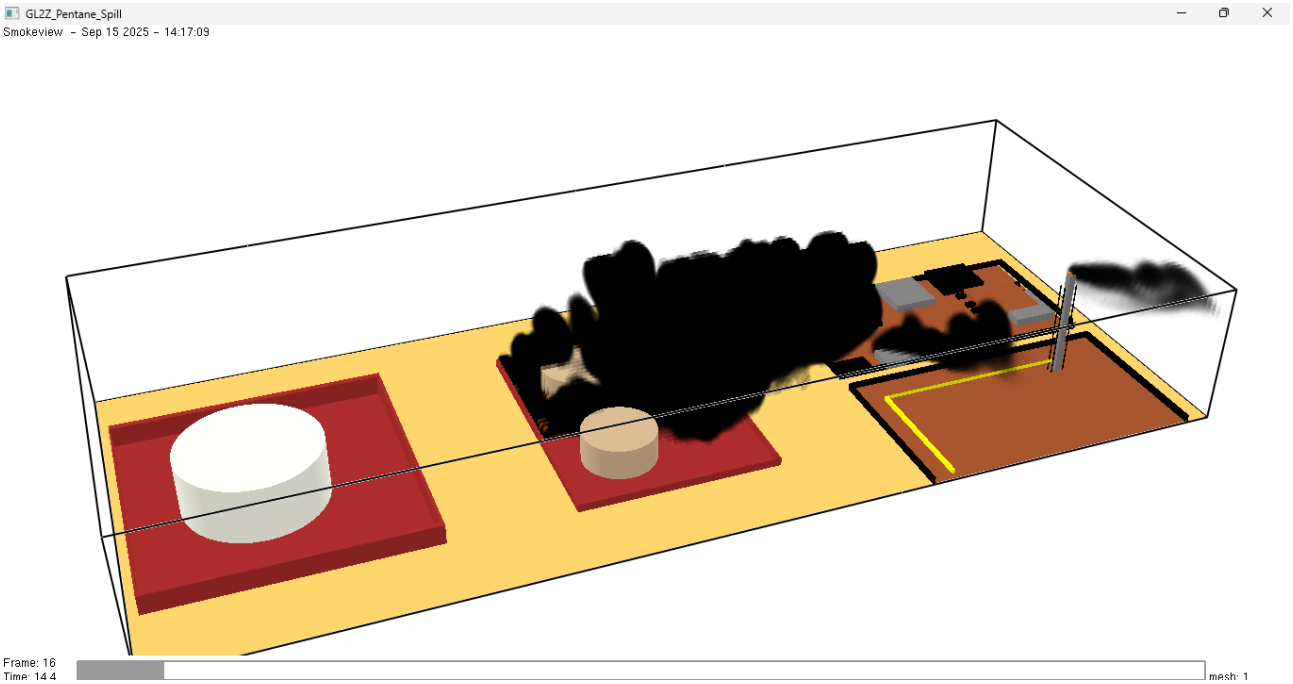


Figure 16: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈14,4s (simulation FDS)

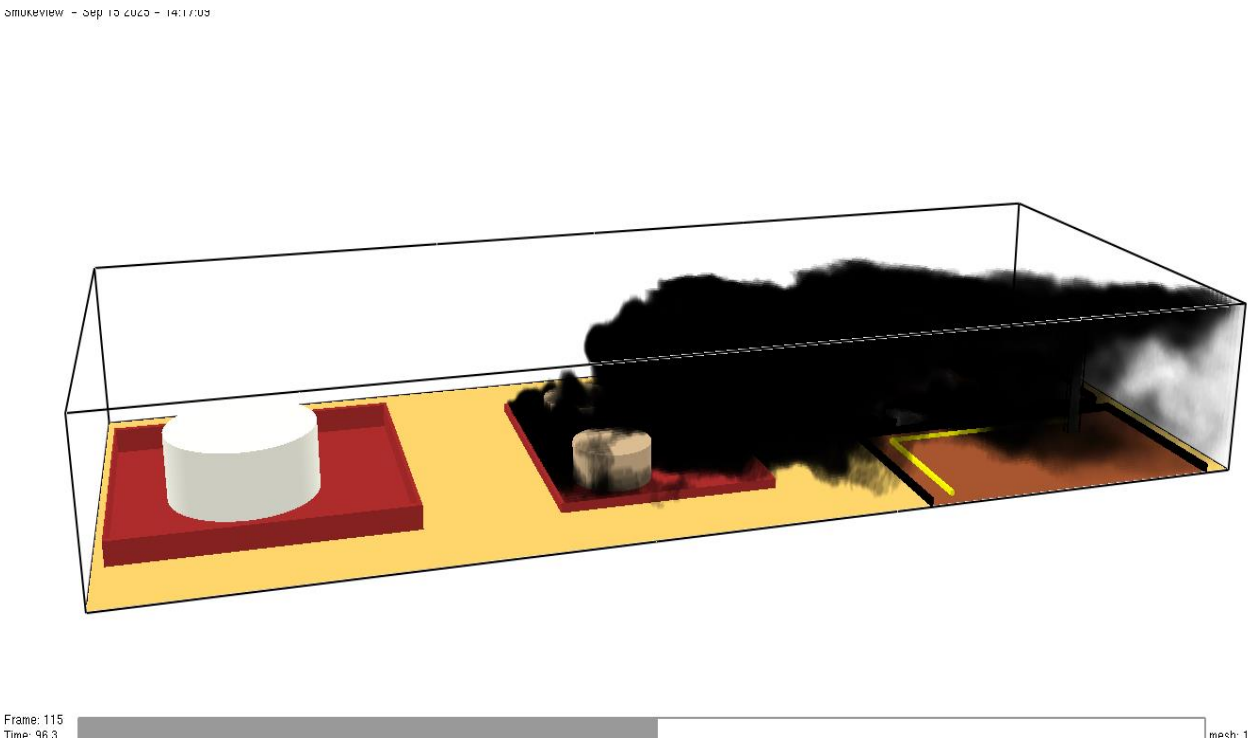


Figure 17: Développement du panache de fumée et propagation des gaz de combustion à t ≈96,3s (simulation FDS)

II.6.2 Flux thermiques (radiatifs et convectifs) et distances d'effets

Cette section analyse les flux thermiques générés par l'incendie de nappe à partir des résultats des capteurs HF_TOP_TANK, HF_BOTTOM_TANK, RAD_FLUX_15M et RAD_FLUX_30M.

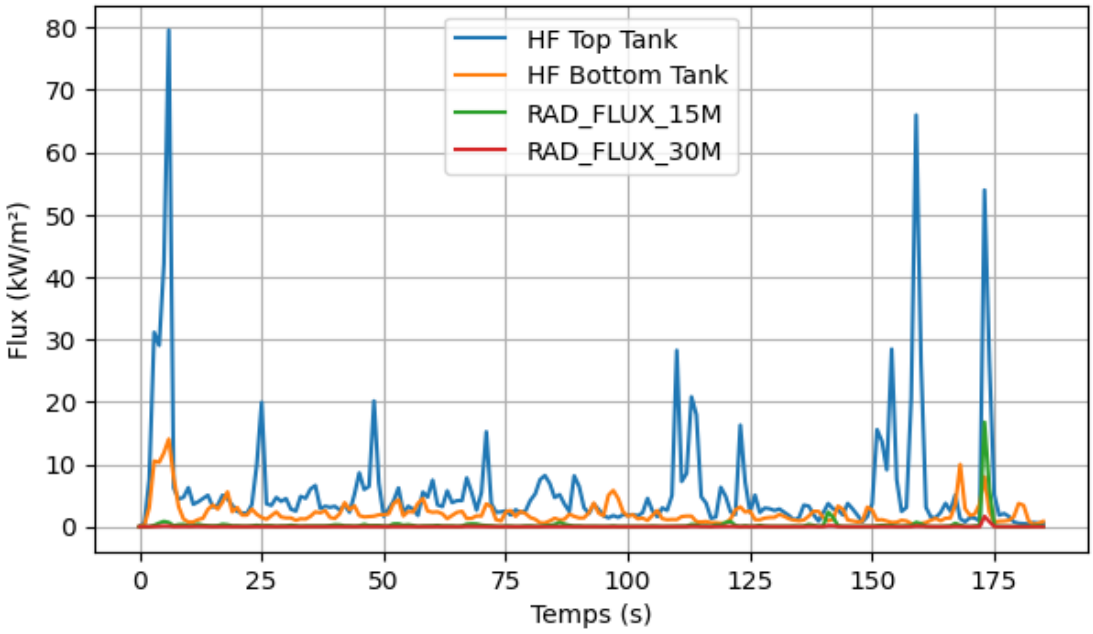


Figure 18: évolution du flux thermique

Le flux thermique maximal atteint 79,57 kW/m² sur le réservoir supérieur au cours des premières secondes de développement de l'incendie. Ce pic extrêmement élevé est suivi de plusieurs pics secondaires (jusqu'à 66 kW/m²), caractéristiques d'un régime de combustion turbulent avec des phénomènes de pulsation du panache.

Le réservoir inférieur enregistre un flux maximal de ***13,8 kW/m².*** Le flux radiatif à 15 mètres présente un pic à environ ***16,7–17 kW/m²,*** confirmant que l'intensité thermique diminue rapidement avec la distance.

Ces résultats indiquent un risque élevé d'effets dominos thermiques. Le réservoir supérieur est soumis à des flux très largement supérieurs aux critères habituels de défaillance des structures métalliques (généralement compris entre 20 et 50 kW/m² selon la durée d'exposition). Cependant, le dépassement répété du seuil de 25 kW/m² n'est observé que jusqu'à environ 12–13 mètres (et non 27 m), ce qui implique un risque d'ignition des matériaux combustibles dans le voisinage immédiat.

Tableau 19: Distances d'effets thermiques selon les seuils critiques[23]

Seuil (kW/m²)	Distance estimée (m)	Effets attendus
12,5	37,8	Douleurs cutanées, effets irréversibles légers sur les personnes
25	26,8	Inflammation du bois et matériaux combustibles après quelques minutes
35 – 50	18,9	Effets létaux rapides sur les personnes, dégradation sévère des équipements non protégés
> 50	< 18,9	Risque majeur d'effets dominos (défaillance thermique rapide des structures)

Distinction Flux Radiatif vs Convectif

- Flux radiatif : transfert de chaleur par rayonnement infrarouge (ne nécessite pas de contact direct).
- Flux convectif : transfert de chaleur par les gaz chauds en mouvement (panache de fumée/flamme).

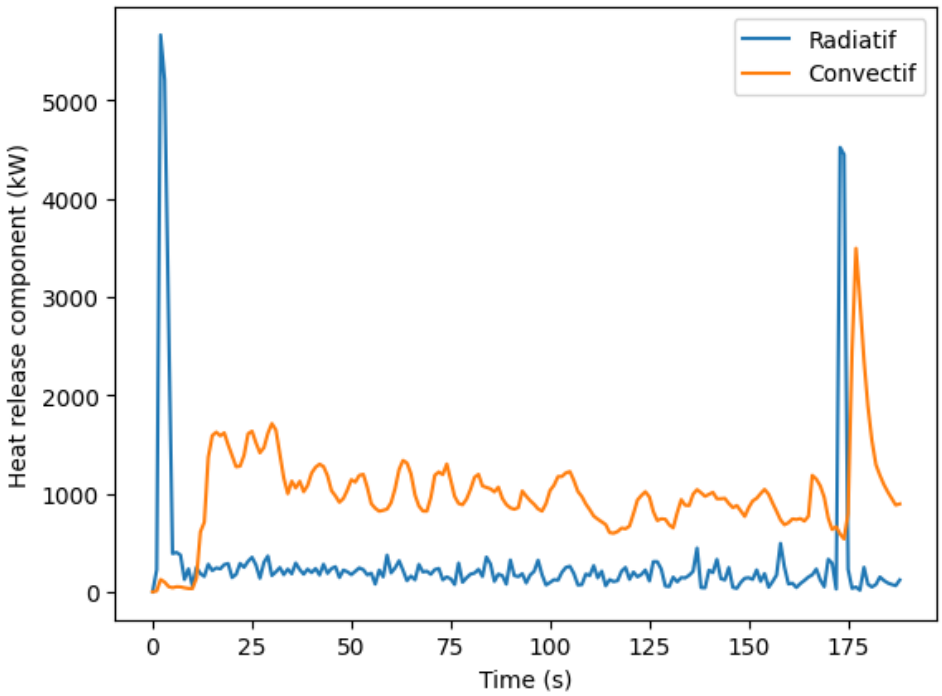


Figure 19: Évolution des puissances radiative et convective

III.6.3 Effets sur les équipements environnants

Les résultats montrent que le flux thermique diminue rapidement avec l'augmentation de la distance au foyer. Le niveau maximal enregistré à 15 m atteint environ 16,74 kW/m², alors qu'à 30 m il ne dépasse pas 1,65 kW/m².

Tableau 20: critères couramment utilisés en sécurité industrielle :

Flux thermique (kW/m²)	Effet attendu
4	Douleur après exposition prolongée
12,5	Dommages possibles aux équipements
37,5	Risque élevé d'effet domino et défaillance structurelle

Selon les critères couramment utilisés en sécurité industrielle : Le flux maximal obtenu à 15 m dépasse le seuil de 12,5 kW/m², ce qui indique que certains équipements proches peuvent subir un échauffement significatif susceptible d'altérer leur fonctionnement ou leur intégrité en cas d'exposition prolongée.

En revanche, le seuil critique de 37,5 kW/m² n'est pas atteint, ce qui réduit fortement la probabilité d'un effet domino immédiat sur les installations environnantes.

Le bac supérieur est de loin l'équipement le plus sollicité, recevant un flux thermique très important (près de 80 kW/m²). Bien que la température critique de 300 °C ne soit pas atteinte dans le scénario étudié, le niveau d'exposition reste préoccupant et classe cet équipement comme le plus vulnérable à une escalade thermique.

Le bac inférieur et le réservoir GNL sont significativement moins impactés grâce à leur positionnement et, pour le réservoir GNL, à son isolation thermique. Leurs températures de paroi restent très basses, bien en deçà des seuils critiques.

Tableau 21: Hiérarchisation de la vulnérabilité des équipements

Équipement	Effet
Bac supérieur	Premier équipement susceptible de subir une dégradation critique en cas d'exposition prolongée.
Bac inférieur	Risque intermédiaire
Réservoir GNL	Risque le plus faible

Une exposition prolongée à la chaleur pourrait entraîner une diminution de la résistance mécanique ainsi qu'une déformation de la structure métallique du réservoir. Dans des conditions plus sévères, ces effets pourraient favoriser la propagation de l'incendie vers les équipements voisins et accroître le risque d'apparition d'un effet domino.

III.6.4 Impact sur les populations avoisinantes

La carte de visibilité issue de la simulation FDS présente la répartition spatiale de la visibilité à hauteur d'homme dans la zone étudiée (Z = 1,6 m) autour du bac de gazoline en feu, à t = 30 secondes. L'échelle de couleurs varie de 0 m (visibilité nulle, zones rouges) à plus de 30 m (visibilité excellente, zones bleues).

Les zones bleues correspondent à une visibilité élevée (> 24–30 m), indiquant une présence négligeable de fumée.

Les zones vertes, jaunes et rouges traduisent une dégradation progressive de la visibilité due à l'accumulation des produits de combustion et des particules de suie.

Les valeurs les plus faibles de visibilité sont observées à proximité immédiate de la source d'incendie et le long de la trajectoire du panache de fumée.

La réduction de visibilité reste globalement localisée autour de la zone de combustion. La majorité du site industriel conserve une visibilité supérieure à 20 m, niveau généralement considéré comme acceptable pour les environnements industriels extérieurs, permettant une identification claire des voies d'évacuation et des équipements de sécurité.

Cependant, les opérateurs présents à proximité immédiate du feu peuvent être confrontés à une visibilité temporairement réduite en raison du panache de fumée. Ces conditions pourraient compliquer les opérations d'intervention d'urgence et l'évacuation si l'exposition se prolonge ou si l'intensité de l'incendie augmente.

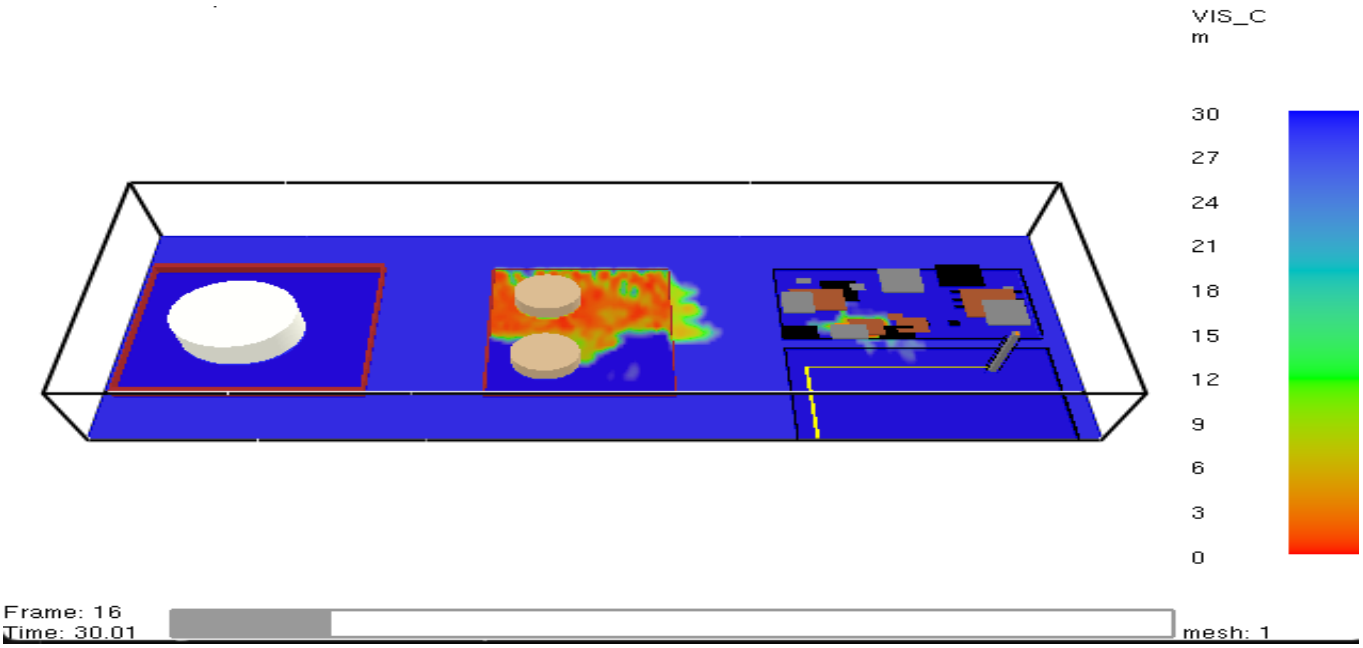


Figure 20: Répartition spatiale de la visibilité dans le panache de fumée t ≈30,1s (simulation FDS)

Outre la dégradation de la visibilité, l'évolution de la concentration en monoxyde de carbone a été suivie à l'aide du capteur CO_PLUME_2M, installé à la périphérie de la zone sinistrée, à environ 25 m du centre de l'incendie et à une hauteur représentative de la zone respiratoire humaine (1,7 m). Les variations enregistrées reflètent l'influence du transport du panache de fumée sous l'action du vent ainsi que les fluctuations du processus de combustion.

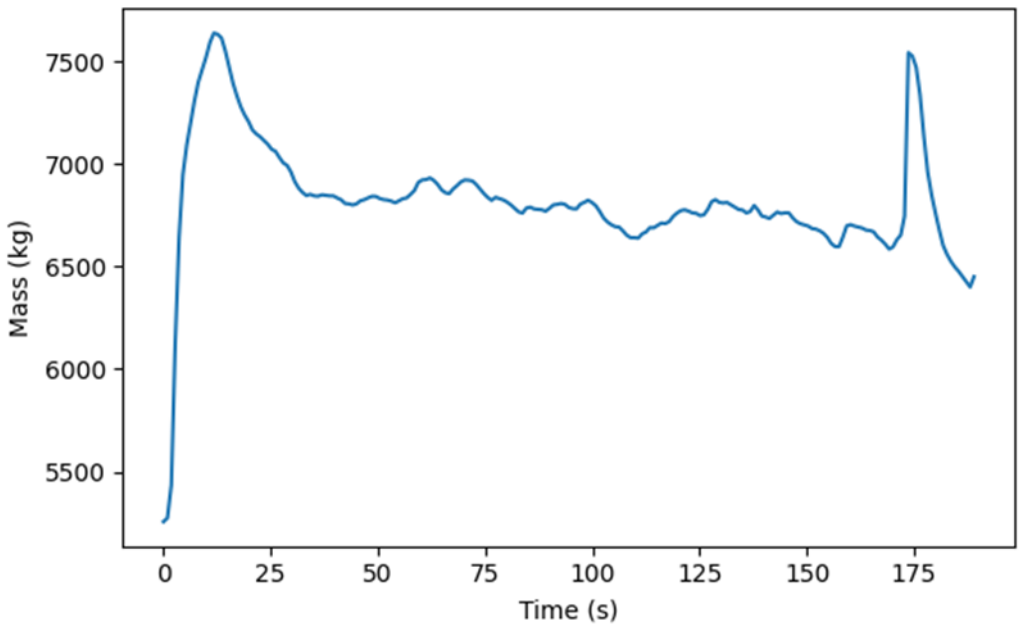


Figure 21: Évolution de la concentration de monoxyde de carbone (CO)

III.6.5 Impact environnemental et qualité de l'atmosphère

L'analyse des espèces produites lors de la combustion de la gazoline permet d'évaluer les impacts environnementaux associés au scénario d'incendie étudié. Les résultats issus de la simulation FDS montrent une modification significative de la composition de l'atmosphère à proximité du foyer.

Comme indiqué précédemment, la concentration de monoxyde (CO) et dioxyde de carbone (CO_2) augmente progressivement au cours de la combustion. Le CO_2 constitue le principal produit issu de la combustion complète des hydrocarbures et représente l'un des principaux gaz à effet de serre. Les niveaux élevés mesurés à proximité du foyer mettent en évidence l'importance des émissions atmosphériques engendrées par l'incendie.

De plus la concentration en oxygène (O2) diminue progressivement au cours de l'incendie en raison de sa consommation par les réactions de combustion. Cette diminution traduit l'intensité du feu et peut créer localement des conditions dangereuses pour les personnes intervenant à proximité du sinistre.

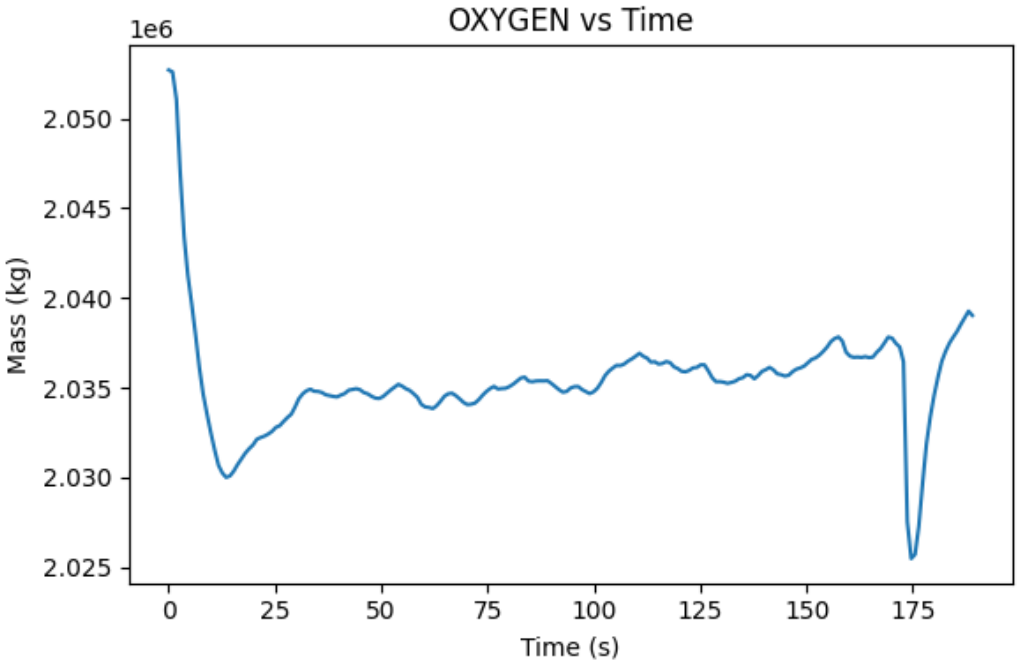


Figure 22: évolution de la concentration en oxygène (O2)

La vapeur d'eau (H2O) présente également une augmentation notable, résultant de l'oxydation de l'hydrogène contenu dans le carburant. Bien qu'elle soit moins préoccupante du point de vue toxicologique, elle participe à la formation du panache de fumée et modifie localement les conditions thermiques et hygrométriques.

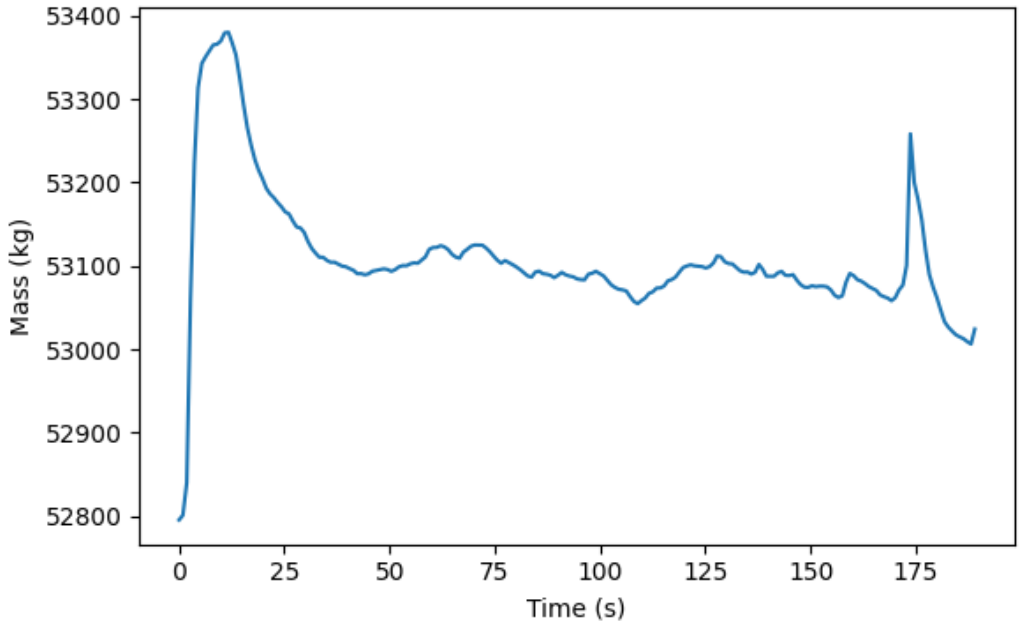


Figure 23: Évolution temporelle de la concentration en vapeur d'eau (H2O)

La production de suies (Soot) est également mise en évidence par les résultats de simulation. Les particules de suie contribuent à l'opacité du panache de fumée, réduisent la visibilité et participent à

la pollution atmosphérique. Leur dépôt sur les équipements et les sols peut également engendrer des impacts environnementaux secondaires nécessitant des opérations de nettoyage et de dépollution.

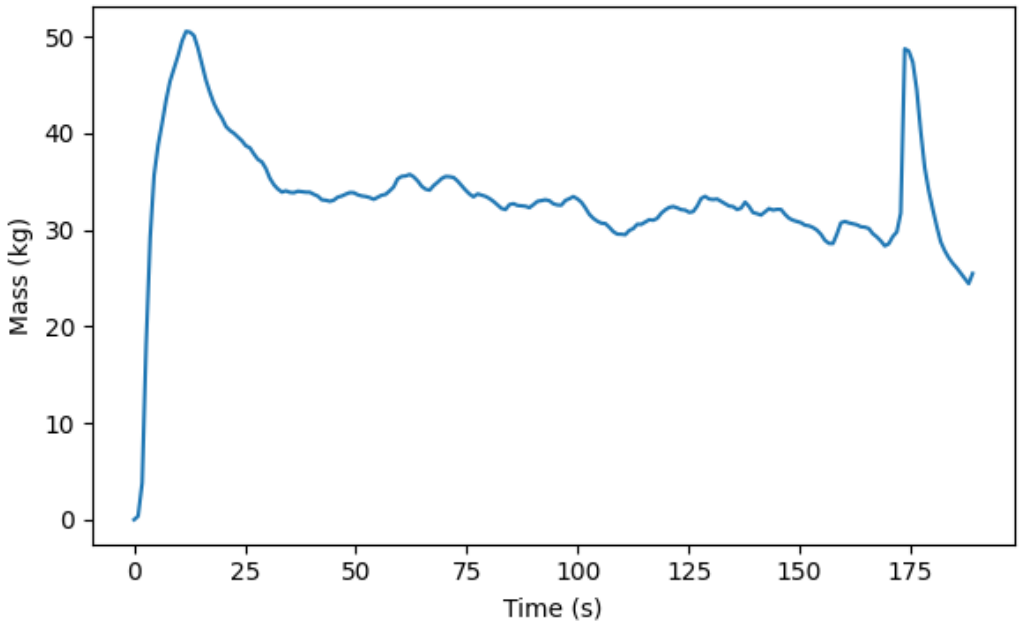


Figure 24: Évolution temporelle de la fraction massique de suies (Soot)

Globalement, les résultats montrent que le scénario d'incendie étudié génère des émissions significatives de gaz de combustion et de particules susceptibles d'affecter la qualité de l'air, la visibilité et l'environnement immédiat du site. Ces observations confirment l'importance des mesures de prévention, de détection précoce et de maîtrise des incendies afin de limiter les conséquences environnementales d'un tel événement.

III.6.6Analyse de sensibilité

Influence des conditions de vent Les visualisations Smokeview montrent un panache de fumée prononcé transporté longitudinalement dans le domaine de calcul. Cela met en évidence le rôle majeur des conditions de vent sur :

- L’inclinaison de la flamme ;
- La dispersion de la fumée ;
- La distribution des zones d’exposition au rayonnement thermique ;
- La réduction de visibilité.

Des vitesses de vent plus élevées augmenteraient le déplacement du panache et pourraient exposer davantage les équipements adjacents à des charges thermiques importantes.

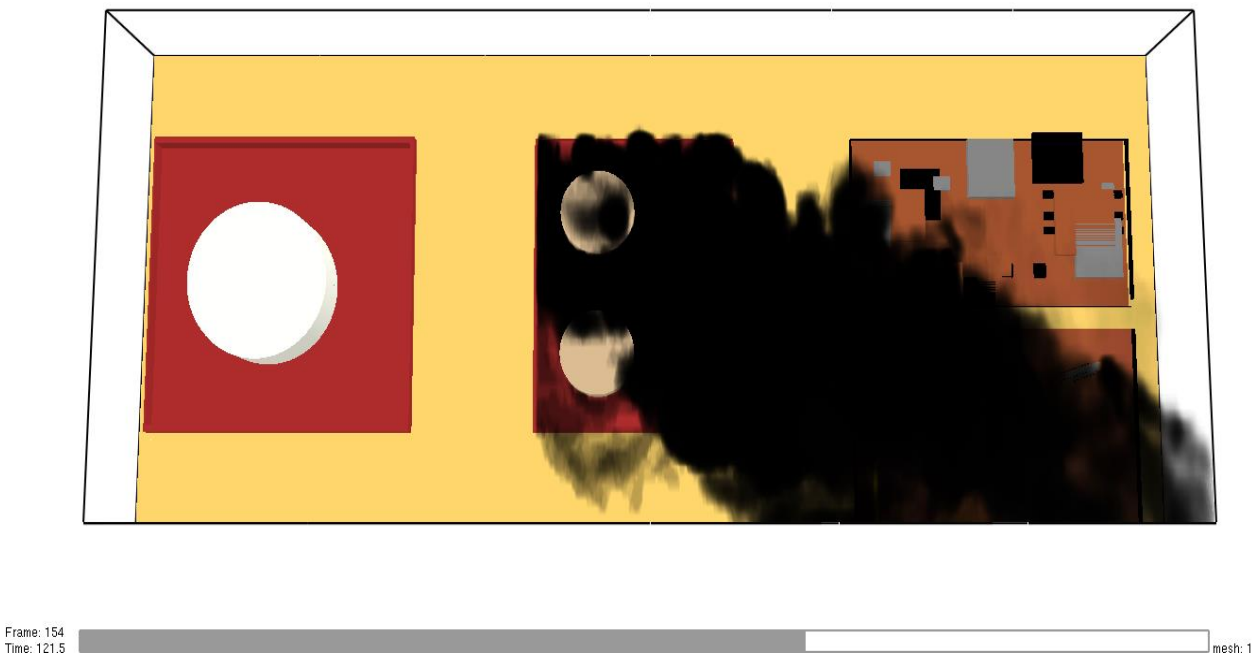


Figure 25: Propagation du panache de fumée (Smokeview)

On observe une propagation préférentielle des fumées dans la direction de l'écoulement d'air, ce qui influence directement la visibilité, l'exposition des équipements environnants et les conditions d'évacuation. La forte concentration de fumées noires est liée à la production importante de suies lors de la combustion du pentane.

Influence de la surface de déversement et le diamètre de la nappe affecte directement :

La hauteur de flamme ;

La surface de combustion ;

La puissance radiative totale.

Une nappe plus étendue génère un rayonnement thermique plus important, des dimensions de flamme accrues et un risque d'escalade plus élevé sur les équipements voisins. La géométrie de la nappe observée dans la simulation confirme son rôle déterminant sur l'étendue des zones de danger.

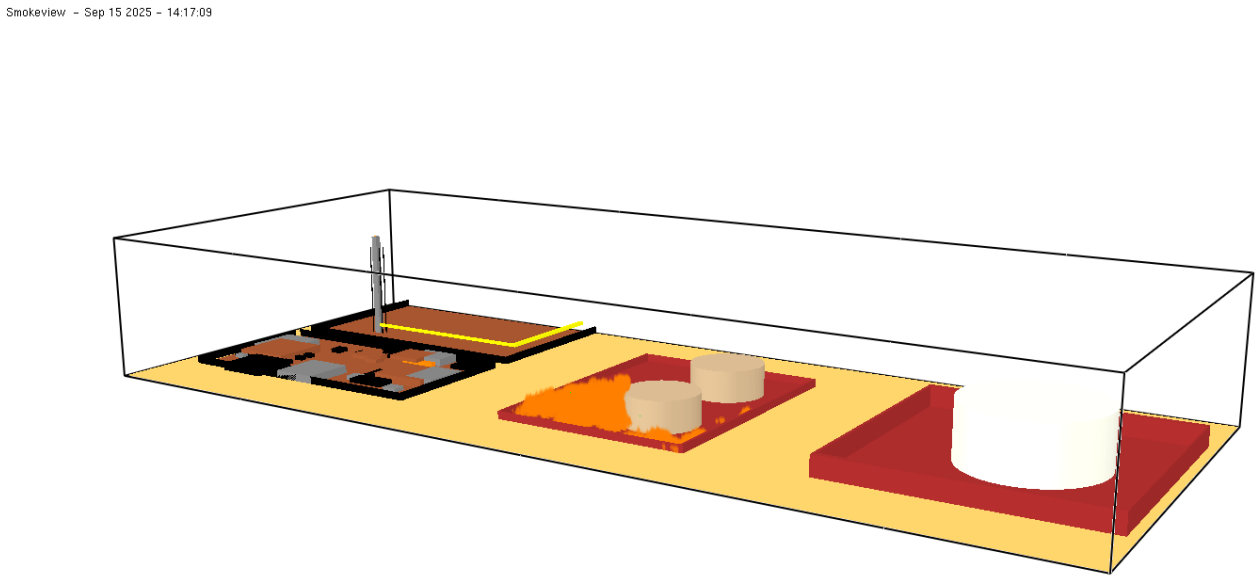


Figure 26: Développement de l'incendie et géométrie des flammes au-dessus de la zone de déversement

La Figure 26 présente le développement du feu de nappe au cours de la phase de combustion. La flamme se développe au-dessus de la surface enflammée et génère un rayonnement thermique susceptible d'affecter les équipements situés à proximité. Cette visualisation permet d'évaluer l'étendue de la zone impactée par les effets thermiques de l'incendie.

III.8 Synthèse et maîtrise des risques

III.8.1 Synthèse des résultats des simulations et de l'analyse des risques

L'analyse réalisée dans ce chapitre, basée sur l'identification des dangers, la simulation numérique sous Fire Dynamics Simulator (FDS), l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'étude HAZOP et l'arbre des causes, a permis de mettre en évidence que le scénario d'incendie de nappe (Pool Fire) consécutif à un déversement massif de gazoline constitue l'un des risques majeurs associés au stockage de la gazoline au complexe GL2/Z. Ce scénario a été retenu en raison de sa gravité potentielle, de sa capacité à générer des effets thermiques importants et de son potentiel de propagation vers les installations voisines par effet domino.

Les principales causes susceptibles de conduire à cet événement sont :

- Les défaillances de conception ou de construction du bac (corrosion, défauts de soudure, défaillance du système de ventilation ou de protection contre le débordement).

- Les erreurs opérationnelles lors des phases de remplissage, de maintenance ou de transfert de produit.
- Les agressions externes telles que la foudre, les travaux par points chauds, les impacts mécaniques ou les conditions météorologiques extrêmes.
- L'existence simultanée d'une perte de confinement et d'une source d'inflammation efficace, identifiées comme conditions nécessaires à l'apparition de l'incendie.

Les résultats des simulations FDS ont mis en évidence des niveaux élevés de flux thermiques et de températures pouvant affecter les équipements voisins, compromettre l'intégrité des structures métalliques, exposer le personnel à des effets thermiques critiques et favoriser l'apparition d'effets domino. Ces résultats confirment la nécessité de renforcer les mesures de maîtrise des risques conformément au principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

III.8.2 Analyse des barrières de sécurité existantes

1. Systèmes de protection incendie

- Refroidissement de la coque : Une couronne de déluge (ring pipe) de 6 pouces entoure chaque bac et délivre un débit total de 660 m^3/h d'eau sur la surface extérieure de la coque. Huit lances monitors à balayage automatique (quatre par bac) complètent le dispositif, permettant un arrosage dirigé et mobile en cas d'échauffement localisé de la paroi.
- Extinction par mousse : Le système inclut 4 déversoirs à mousse bas foisonnement par bac et des skids à poudre (deux réservoirs de 1000 kg par bac) sont positionnés en partie haute du bac. Ils injectent une mousse à bas foisonnement dans l'espace annulaire entre le toit fixe et l'écran flottant. La mousse se répand sur la surface du liquide grâce au barrage à mousse installé sur l'écran.
- Soupapes de sécurité : Des soupapes de surpression et de dépression (Pressure/Vacuum Relief Valves) sont montées sur le toit fixe. Elles rejettent directement à l'atmosphère et sont équipées de flame arrestors pour empêcher la propagation d'une flamme vers l'intérieur du réservoir.

2. La cuvette de rétention des bacs de gazoline

- Conception commune : Contrairement aux bacs de GNL, les deux bacs de stockage de gazoline partagent une cuvette de rétention commune d'une surface d'environ 11 660 m^2.
- Capacité de rétention : La capacité de cette cuvette est dimensionnée pour être environ 1,5 fois supérieure à la capacité de stockage des réservoirs, afin de garantir le confinement total du produit en cas de rupture ou de perte de confinement.

- Étanchéité et sol : Pour éviter toute pollution du sol ou de la nappe phréatique, la zone de stockage est située sur un sol imperméable et résistant aux produits chimiques. Le sol présente généralement une légère pente vers un caniveau d'évacuation relié à une fosse de récupération ou un puisard.
- Dispositifs de sécurité à proximité :

  Les vannes d'actionnement du système de refroidissement (déluge) sont protégées par des bunkers situés au sud de la cuvette des bacs de gazoline.

  La cuvette permet également de contenir la solution moussante lors de l'activation des déversoirs à mousse.

En cas d'incident, comme une fuite lors d'opérations de maintenance, la cuvette joue un rôle crucial pour limiter l'épandage du produit (hexane, pentane) et prévenir la formation d'une nappe inflammable trop étendue.

3. Instrumentation et détection :

Les bacs sont équipés des instruments suivants :

- Mesure de niveau continu et Alarmes de niveau haut et bas.
- Détecteurs de gaz inflammables (AIT) positionnés autour et au-dessus des bacs.
- Détecteurs de flamme orientés vers la zone des réservoirs.

III.8.3 Recommandations et mesures de maîtrise des risques

Les mesures de prévention ont pour objectif de réduire la probabilité d'occurrence des scénarios accidentels (perte de confinement, débordement, incendie, explosion) sur les bacs de stockage de gazoline.

- Mise en œuvre d'un programme rigoureux d'inspection et de maintenance préventive (API 653 / EEMUA 159) des bacs, tuyauteries, vannes, flotteurs et équipements associés.
- Contrôle périodique de l'épaisseur des parois, soudures et efficacité des systèmes anticorrosion (peintures, anodes, revêtements internes).
- Vérification régulière du bon fonctionnement des jauges de niveau (radar ou servo), alarmes haut niveau (High-High), et systèmes anti-débordement (overflow + interlocks).
- Renforcement de la mise à la terre des bacs, écrans flottants et équipements, ainsi que des protections contre la foudre.
- Gestion stricte des permis de travail (PTW) avec autorisation spécifique pour les travaux à chaud (soudage, meulage) et isolement LOTO.

- Formation continue et recyclage du personnel sur les risques spécifiques aux hydrocarbures inflammables (classe IA), les procédures d'exploitation et les interventions d'urgence.
- Réalisation périodique d'études HAZOP, APR (Analyse Préliminaire des Risques), analyses de risques quantitatives (QRA) et retours d'expérience (RETEX) pour actualiser l'évaluation des risques.
- Instaurer un programme de maintenance prédictive (vibrations, thermographie infrarouge, ultrasons, inspection par drone pour les toits et parois externes).
- Ajouter des alarmes indépendantes de niveau haut-haut avec action automatique sur les vannes d'entrée (SIS – Safety Instrumented System, SIL 2 minimum).
- Renforcer le contrôle de la qualité du produit stocké (température, point d'éclair, teneur en eau) pour limiter les risques de formation de gaz.
- Audits annuels externes des procédures de maintenance et de l'application effective des PTW.

Les mesures de protection visent à limiter les conséquences en cas de perte de confinement ou d'incendie sur les bacs de gazoline.

- Vérifier et optimiser la densité d'application d'eau (minimum 10-12 L/min/m² sur la coque exposée selon NFPA 15 / API 2030).
- Ajouter une détection automatique d'activation du déluge et de la mousse (interlock avec détection incendie/gaz).
- Prévoir des réserves d'eau et de mousse dimensionnées pour au moins 60 minutes d'intervention simultanée sur les deux bacs + marge.
- Tester annuellement l'ensemble du système en conditions réelles (flow test + tests de mousse).
- Installer un système de détection de niveau et d'alarme dans la cuvette (détecteurs d'hydrocarbures + niveau haut).
- Contrôle périodique de l'étanchéité de la cuvette (géomembrane ou béton revêtu) et maintenance du drainage.
- Ajouter des barrages flottants ou pompes flottantes pour récupérer rapidement le produit en surface.
- Ajouter des détecteurs de gaz en zone annulaire (sous le toit fixe) et sur l'écran flottant.
- Couvrir l'ensemble de la cuvette avec une détection gaz/flamme performante (IR3 ou UV/IR).

- Intégrer l'ensemble des détecteurs dans un système de contrôle et d'arrêt d'urgence (ESD) avec logique 2oo3 pour les actions critiques.
- Caméras thermiques infrarouges pour détection précoce d'échauffement des parois.[22], [24]'

III.9 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer le risque d'incendie associé au stockage de la gazoline au complexe GL2/Z à travers les analyses APR et HAZOP et la simulation FDS. Les résultats ont mis en évidence les principaux dangers, leurs conséquences potentielles et les mesures de maîtrise nécessaires pour renforcer la sécurité des installations et réduire le niveau de risque.

Les résultats obtenus par la simulation FDS du scénario de pool Fire consécutif à un déversement majeur de gazoline dans la cuvette de rétention confirment la criticité de cet événement et apportent des éléments quantitatifs précieux pour l'évaluation des risques et la définition des mesures de maîtrise.

CONCLUSION GENERALE

Les incendies industriels représentent une menace majeure pour les installations de stockage et de traitement des hydrocarbures, en raison de leurs conséquences potentiellement catastrophiques sur les personnes, les biens, l'environnement et la continuité des opérations. Dans ce contexte, ce mémoire avait pour objectif principal d'analyser les risques d'incendie associés à un bac de stockage de gazoline au sein du complexe GL2/Z de SONATRACH, tout en évaluant l'apport décisif de la simulation numérique dans la compréhension et la maîtrise de ces risques. L'étude a combiné une approche classique d'analyse des risques avec une modélisation avancée réalisée à l'aide du logiciel Fire Dynamics Simulator (FDS).

Le premier chapitre a posé les fondements théoriques en explorant les mécanismes physiques et chimiques de la combustion, les phénomènes d'inflammation, les limites d'explosivité, les modes de propagation du feu et les transferts thermiques. L'analyse des retours d'expérience d'accidents industriels majeurs a révélé que ces sinistres résultent le plus souvent d'une conjonction de défaillances techniques, humaines et organisationnelles. Elle a ainsi souligné la nécessité d'une démarche préventive structurée, fondée sur l'identification rigoureuse des dangers, le contrôle des sources d'inflammation et le renforcement des barrières de sécurité.

Le deuxième chapitre a présenté le contexte spécifique du complexe GL2/Z, en détaillant les caractéristiques des installations de stockage de gazoline et les principaux facteurs de risque incendies. L'examen des systèmes existants de prévention, de détection et de lutte contre l'incendie a montré que, malgré leur conformité aux normes et bonnes pratiques, les installations restent vulnérables face à des scénarios accidentels graves, en raison de la nature hautement inflammable et volatile des produits manipulés.

Le troisième chapitre a constitué le partie pratique de ce travail. En intégrant les méthodes d'analyse des risques (APR, HAZOP et Arbre des Causes) à la simulation numérique sous FDS, l'étude a permis d'identifier les dangers majeurs, les défaillances critiques et les scénarios les plus redoutables. Un scénario représentatif d'incendie consécutif à un déversement important de gazoline a été modélisé. Les résultats ont offert une visualisation et une quantification précises de l'évolution de l'incendie : taux de dégagement de chaleur (HRR), températures, flux thermiques radiatifs, propagation du panache de fumée et concentrations des produits de combustion. Ces simulations ont notamment mis en évidence l'importance des effets domino potentiels sur les équipements adjacents et les risques liés à la dispersion rapide des fumées toxiques.

L'un des principaux apports de ce mémoire réside dans la démonstration de la complémentarité puissante entre les méthodes qualitatives traditionnelles et la simulation

numérique. Tandis que l'APR, le HAZOP et l'Arbre des Causes excellent dans l'identification des scénarios et de leurs causes, FDS permet une représentation dynamique, quantitative et spatialisée du comportement de l'incendie. Cette approche hybride renforce considérablement la pertinence des évaluations de risques et fournit une aide à la décision plus robuste pour l'optimisation des mesures de prévention et de protection.

Les résultats confirment pleinement l'hypothèse initiale : l'intégration de la simulation numérique constitue un complément essentiel aux méthodes classiques. Elle améliore l'évaluation des conséquences, permet d'identifier les zones les plus vulnérables et offre des pistes concrètes d'optimisation des dispositifs de sécurité. Parmi les recommandations formulées figurent le renforcement de la détection précoce, l'amélioration des moyens de lutte (notamment les systèmes à mousse et rideaux d'eau), l'optimisation des distances de sécurité et le développement continu des compétences du personnel face aux situations d'urgence.

Perspectives

Les travaux réalisés dans ce mémoire ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Ils permettent d'envisager l'extension de la modélisation à d'autres scénarios critiques tels que les feux de réservoir complets, les feux de jet, les explosions de vapeurs inflammables (VCE) et les phénomènes de BLEVE, ainsi que l'analyse des effets domino entre les réservoirs à l'échelle de l'ensemble du parc de stockage. Il est également recommandé de coupler FDS avec d'autres outils spécialisés tels que PHAST ou FLACS, de réaliser des études de sensibilité approfondies sur les conditions météorologiques, les propriétés du combustible et les performances des systèmes de protection, et d'évaluer l'efficacité des différentes solutions de protection active (rideaux d'eau, systèmes à mousse et extinction automatique).

Par ailleurs, l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0, notamment les capteurs intelligents, l'Internet des Objets (IoT) et l'intelligence artificielle, ainsi que le développement d'un jumeau numérique du site industriel, offriront des capacités avancées de détection précoce, de simulation en temps réel et d'aide à la décision en matière de sécurité.

Le couplage entre les méthodes traditionnelles d'analyse des risques et les outils de simulation numérique de pointe constitue une voie stratégique majeure pour renforcer la résilience des installations industrielles et minimiser les conséquences des incendies dans le secteur pétrolier et gazier.

BIBLIOGRAPHIE

[1] « Incendie et lieu de travail - Brochure - INRS ». Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20990

[2] « Incendie et explosion sur le lieu de travail - Brochure - INRS ». Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204702

[3] « Omega 2 - Modélisations de feux industriels | Ineris ». Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ineris.fr/fr/omega-2-modelisations-feux-industriels

[4] « Omega 36 - Guide pratique, prévention du risque ATEX “ATMosphère EXplosive” | Ineris ». Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ineris.fr/fr/omega-36-guide-pratique-prevention-risque-atex-atmosphere-explosive

[5] « Brochure du 15ème séminaire IMPEL “Retour d’expérience tiré d’accidents industriels” (2023) », La référence du retour d’expérience sur accidents technologiques. Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/synthese/brochure-du-15eme-seminaire-impel-retour-dexperience-tire-daccidents-industriels-2023/

[6] « Liste des principaux incendies industriels 1950-2020 ». Consulté le: 7 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: http://www.atlas-mag.net/fr/articles/liste-des-principaux-incendies-industriels-1950-2020

[7] S. Selamet et C. Bolukbas, « Fire resilience of shear connections in a composite floor: Numerical investigation », *Fire Saf. J.*, vol. 81, p. 97-108, avr. 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.02.003.

[8] « COMPLEX GL2Z - SONATRACH ». Consulté le: 13 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://sonatrach.com/en/complex-gl2z/

[9] « Rapports – SONATRACH ». Consulté le: 20 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://sonatrach.com/fr/pdf-category/rapports-fr/

[10] « ARH ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.arh.gov.dz/category/decrets.

[11] « LIQUEFACTION & SEPARATION - SONATRACH ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://sonatrach.com/en/liquefaction-separation/

[12] « Ministry of Energy and Renewable Energies ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.energy.gov.dz/en

[13] *https://www.arh.gov.dz/category/decrets*.

[14] « SGG Algérie ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.joradp.dz/HAR/Index.htm

[15] F. Z. BENALI OUENZAR, « Rapport de stage dans GL2Z-sonatrach », avr. 2025.

[16] « OUR HUMAN RESOURCES - SONATRACH ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://sonatrach.com/en/our-human-resources/

[17] « Google Earth ». Consulté le: 23 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://earth.google.com/web/search/gl2z/@35.8100873,-0.2600884,6.34002474a,669.91763944d,35y,0h,0t,0r/data=CnIaRBI-CiQweGQ3ZTBjNjE5OGY1YWQwZDoweDRlYjViM2Y5NzcwYmFlZTIZ1TPO8LDnQUAh8mkE0Uml0L8qBGdsMnoYAiABIiYKJAk458hQ8KczQBEz58hQ8KczwBl1lUwK-RRJQCGKwEufAlhJwEICCAE6AwoBMEICCABKDQj_____8BEAA

[18] « Fiche complète - CNESST ». Consulté le: 8 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=3525

[19] « Bienvenue sur le WebBook de Chimie NIST ». Consulté le: 8 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://webbook.nist.gov/

[20] « Construction de réservoirs selon la norme API 650 », SteelTech srl. Consulté le: 11 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://steeltechitalia.com/fr/construction-de-reservoirs-selon-la-norme-api-650/
[21] « Incendie et lieu de travail - Brochure - INRS ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20990
[22] « ISO - Organisation internationale de normalisation », ISO. Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/fr/home.html
[23] Le ministre de l'écologie et du développement, « Arrêté du 22/10/04 relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées ». 22 octobre 2004.
[24] « NFPA | The National Fire Protection Association ». Consulté le: 20 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.nfpa.org/?utm_source=chatgpt.com

Annexes

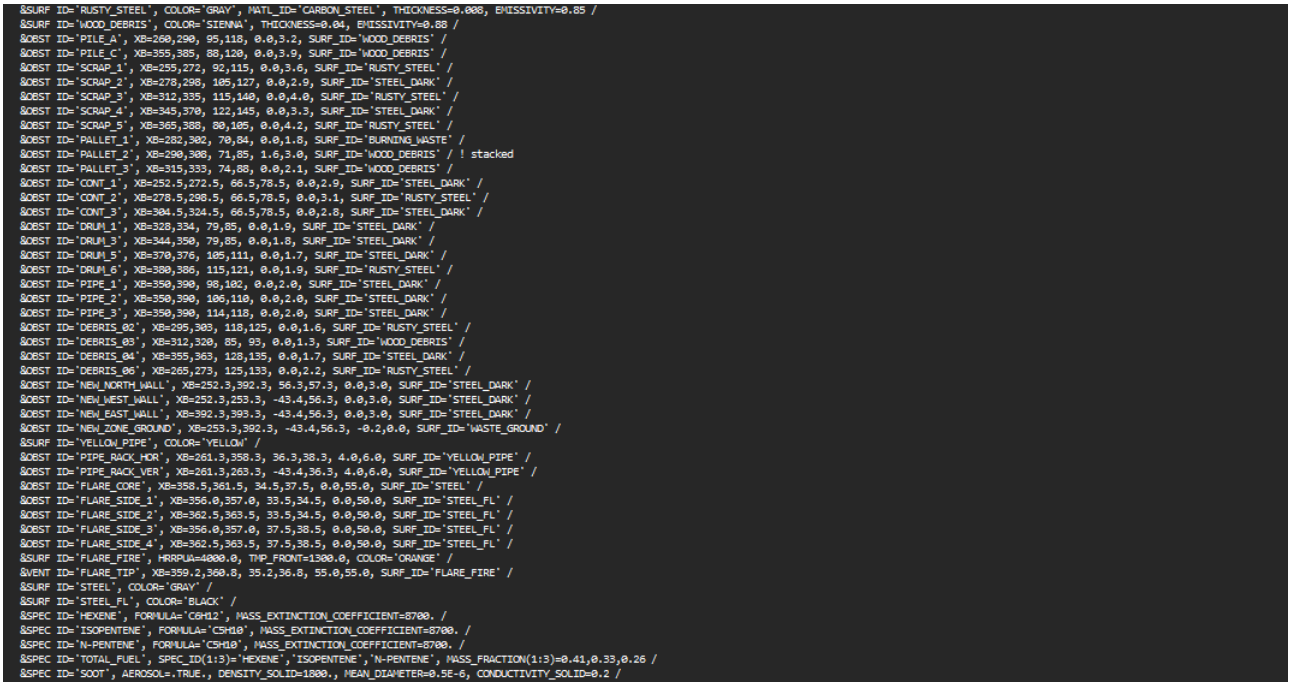
1. Annex A : Fichier d’entrée FDS

```
&HEAD CHID='GL2Z_Pentane_Spill', TITLE='Déversement important GAZOLINE - Incendie majeur' /
&TIME T_END=300.0 /
&MESH ID='MESH_1', IJK=102,64,36, XB=-103.0,-18.333, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&MESH ID='MESH_2', IJK=102,64,36, XB=-18.333,66.334, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&MESH ID='MESH_3', IJK=102,64,36, XB=66.334,151.001, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&MESH ID='MESH_4', IJK=102,64,36, XB=151.001,235.668, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&MESH ID='MESH_5', IJK=102,64,36, XB=235.668,320.335, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&MESH ID='MESH_6', IJK=102,64,36, XB=320.335,405.0, -28.02,180.62, 0.0,72.0 /
&PRES SOLVER='ULMAT HYPRE' /
&WIND SPEED=5.0, DIRECTION=315.0 /
&DUMP DT_DEVC=5.0, DT_SLCF=2.0, DT_RESTART=5.0 /
&MISC RESTART=TRUE , MPI_TIMEOUT=1200 /
&VENT DB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT DB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT DB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT DB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT DB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&MATL ID='CARBON_STEEL', DENSITY=7850., CONDUCTIVITY=45., SPECIFIC_HEAT=0.46 /
&MATL ID='ACIER_9NI', DENSITY=7850., CONDUCTIVITY=45.0, SPECIFIC_HEAT=0.46 /
&MATL ID='PERLITE', DENSITY=120., CONDUCTIVITY=0.04, SPECIFIC_HEAT=0.8 /
&MATL ID='CONCRETE', DENSITY=2200., CONDUCTIVITY=1.4, SPECIFIC_HEAT=0.88 /
&SPEC ID='METHANE' / ! Espèce prédéfinie dans FDS
&MATL ID='LNG_LIQUID', SPEC_ID='METHANE', NU_SPEC=1.0, DENSITY=422., CONDUCTIVITY=0.15, SPECIFIC_HEAT=3.48, BOILING_TEMPERATURE=-161.5, HEAT_OF_REACTION=510. /
&SURF ID='TANK_WALL', COLOR='TAN', MATL_ID='CARBON_STEEL', THICKNESS=0.015, BACKING='EXPOSED', EMISSIVITY=0.90 /
&SURF ID='TANK_GNL_WALL', MATL_ID(1:3,1)='ACIER_9NI','PERLITE','ACIER_9NI', THICKNESS(1:3)=0.020, 0.150, 0.015, COLOR='IVORY', EMISSIVITY=0.80, BACKING='EXPOSED' /
&SURF ID='WALL_BETWEEN_TANKS', COLOR='BROWN', MATL_ID='CONCRETE', THICKNESS=0.20, BACKING='INSULATED' /
&SURF ID='GROUND', COLOR='BROWN', MATL_ID='CONCRETE', THICKNESS=0.20, BACKING='INSULATED' /
&SURF ID='FLOATING_ROOF', COLOR='LIGHT BLUE', MATL_ID='CARBON_STEEL', THICKNESS=0.010 /
&GEOM ID='TOP_Tank', SURF_ID='TANK_WALL', CYLINDER_RADIUS=18.3, CYLINDER_LENGTH=15.6, CYLINDER_ORIGIN=125.0, 106.6, 7.8, CYLINDER_AXIS=0.0, 0.0, 1.0, CYLINDER_NSEG_THETA=120 /
&GEOM ID='BOTTOM_Tank', SURF_ID='TANK_WALL', CYLINDER_RADIUS=18.3, CYLINDER_LENGTH=15.6, CYLINDER_ORIGIN=125.0, 45.0, 7.8, CYLINDER_AXIS=0.0, 0.0, 1.0, CYLINDER_NSEG_THETA=120 /
&GEOM ID='Tank_LNG_GL2Z', SURF_ID='TANK_GNL_WALL', CYLINDER_RADIUS=33.82, CYLINDER_LENGTH=28.0, CYLINDER_ORIGIN=-40.0, 75.0, 14.0, CYLINDER_AXIS=0.0, 0.0, 1.0, CYLINDER_NSEG_THETA=120 /
&OBST ID='Floating_Roof_BOTTOM', SURF_ID='FLOATING_ROOF', SHAPE='CYLINDER', RADIUS=18.2, HEIGHT=0.5, XYZ=125.0, 45.0, 15.6 /
&OBST ID='INNER_BUND', XB= 93.3,193.3, 74.8, 75.8, 0.0, 0.7, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='NORTH_WALL', XB= 93.3,193.3,140.3,141.3, 0.0, 3.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='SOUTH_WALL', XB= 93.3,193.3, 10.3, 11.3, 0.0, 3.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='WEST_WALL', XB= 93.3, 94.3, 10.3,141.3, 0.0, 3.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='EAST_WALL', XB=192.3,193.3, 10.3,141.3, 0.0, 3.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='GROUND_GASO', XB= 93.3,193.3, 10.3,141.3, -0.2, 0.0, SURF_ID='GROUND' /
&OBST ID='LNG_NORTH_WALL', XB=-98.0, 32.0, 139.62,140.62, 0.0, 9.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='LNG_SOUTH_WALL', XB=-98.0, 32.0, 11.98, 12.98, 0.0, 9.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='LNG_WEST_WALL', XB=-98.0, -97.0, 11.98,140.62, 0.0, 9.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='LNG_EAST_WALL', XB= 31.0, 32.0, 11.98,140.62, 0.0, 9.0, SURF_ID='WALL_BETWEEN_TANKS' /
&OBST ID='LNG_GROUND', XB=-98.0, 32.0, 11.98,140.62, -0.2, 0.0, SURF_ID='GROUND' /
&OBST ID='NORTH_WALL', XB=252.3,392.3, 141.3,142.3, 0.0,3.5, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='EAST_WALL', XB=392.3,393.3, 71.3,141.3, 0.0,3.5, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='SOUTH_WALL', XB=252.3,392.3, 66.3,67.3, 0.0,3.5, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='WEST_WALL', XB=252.3,253.3, 71.3,141.3, 0.0,3.5, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='WASTE_GROUND', XB=253.0,392.0, 67.0,141.0, -0.25,0.0, SURF_ID='WASTE_GROUND' /
&SURF ID='BURNING_WASTE', HRRPUA=450., COLOR='ORANGE', TMP_FRONT=400. /
&SURF ID='WASTE_GROUND', COLOR='SIENNA ' /
&SURF ID='STEEL_DARK', COLOR='BLACK', MATL_ID='CARBON_STEEL', THICKNESS=0.01, EMISSIVITY=0.92 /
```

Figure 27 : Configuration géométrique et matérielle du scénario FDS.

```
&REAC ID='REAC_GASOLINE', FUEL='TOTAL_FUEL', SOOT_YIELD=0.06, CO_YIELD=0.02, HEAT_OF_COMBUSTION=44400., AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=-273. / !
&MATL ID='HEXENE_LIQ', DENSITY=674., CONDUCTIVITY=0.12, SPECIFIC_HEAT=2.26, BOILING_TEMPERATURE=63.5, HEAT_OF_REACTION=358., MW=84.16, NU_SPEC=1.0 /
&MATL ID='ISOPENTENE_LIQ', DENSITY=612., CONDUCTIVITY=0.12, SPECIFIC_HEAT=2.30, BOILING_TEMPERATURE=31.0, HEAT_OF_REACTION=358., MW=70.13,NU_SPEC=1.0 /
&MATL ID='N_PENTENE_LIQ', DENSITY=640., CONDUCTIVITY=0.12, SPECIFIC_HEAT=2.30, BOILING_TEMPERATURE=30.0, HEAT_OF_REACTION=358., MW=70.13, !NU_SPEC=1.0 /
&SURF ID='POOL_FIRE_TOP', COLOR='ORANGE', MATL_ID(1,1:3)='HEXENE_LIQ','ISOPENTENE_LIQ','N_PENTENE_LIQ', MATL_MASS_FRACTION(1,1:3)=0.41, 0.33, 0.26, THICKNESS=0.01, XYZ=140.0,110.0,0.0,
SPREAD_RATE=0.03 /
! ===================== VENT (Pool) ====================
&VENT ID='TOP_BUND_FIRE', XB=95.0,191.0,76.0,139.0,0.0,0.0, SURF_ID='POOL_FIRE_TOP', IOR=3 /
! ===================== IGNITION ======================
&SURF ID='IGNITOR', HRRPUA=1000., COLOR='RED' /
&OBST ID='IGNITION_SOURCE_TOP', XB=139.0,141.0,109.0,111.0,0.1,0.8, ! Surélevé pour ne pas bloquer l'évaporation SURF_ID='IGNITOR' /
! ===================== FIRE EVOLUTION OUTPUTS ====================
&DEVC ID='HRR_TOTAL', XB=95.0,191.0,76.0,139.0,0.0,10.0, QUANTITY='HRRPUV', SPATIAL_STATISTIC='VOLUME INTEGRAL' /
&DEVC ID='TEMP_FLAME_CORE', XYZ=143.0, 107.5, 2.0,   /
&DEVC ID='TEMP_PLUME_10M', XYZ=143.0, 107.5, 10.0,   /
&DEVC ID='SMOKE_VISIBILITY', XYZ=143.0, 107.5, 2.0,  QUANTITY='VISIBILITY' /
&SLCF PBY=107.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=107.5, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=107.5, QUANTITY='HRRPUV' /
&SM3D QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /
! ===================== THERMAL RADIATION & HEAT FLUX ====================
&DEVC ID='HF_BUND_NORTH', XYZ=143.0, 139.0, 1.6, IOR=2, QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
&DEVC ID='HF_BUND_WEST', XYZ=94.4, 107.5, 1.6, IOR=1, QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /
&DEVC ID='RAD_FLUX_BUND_EDGE', XYZ=192.0, 107.5, 2.0, ORIENTATION=1,0,0, QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS' /
&DEVC ID='RAD_FLUX_INNER', XYZ=143.0, 76.0, 2.0, ORIENTATION=0,-1,0, QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS' /
! ===================== DOMINO EFFECTS (On nearby equipment) ====================
&DEVC ID='TEMP_BUND_WALL_N', XYZ=143.0, 140.3, 1.5, IOR=-2, QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TEMP_BUND_WALL_S', XYZ=143.0, 11.0, 1.5, IOR=2, QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
&DEVC ID='TEMP_LNG_WALL_PROX', XYZ=-6.1, 75.0, 10.0, IOR=1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /
! ===================== HUMAN & ENVIRONMENTAL IMPACT ====================
&PROP ID='LIGHT_ACTIVITY', FED_ACTIVITY=2 /
&DEVC ID='FED_EDGE_EAST', XYZ=125.0,125.0,1.7, QUANTITY='FED', PROP_ID='LIGHT_ACTIVITY' /
&DEVC ID='FED_EDGE_SOUTH', XYZ=125.0,55.0,1.7, QUANTITY='FED', PROP_ID='LIGHT_ACTIVITY' /
&DEVC ID='THERMAL_DOSE_EDGE', XYZ=125.0,125.0,1.7, ORIENTATION=0,-1,0, QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX GAS' /
&DEVC ID='SOOT_PLUME_15M', XYZ=125.0,125.0,1.7, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /
&DEVC ID='CO_PLUME_2M', XYZ=125.0,125.0,1.7, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /
&SLCF PBZ=1.6, QUANTITY='VISIBILITY' /
&SLCF PBZ=1.6, QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='SOOT' /
&DUMP DT_HRR=1.0, DT_DEVC=1.0, DT_SLCF=2.0, DT_BNDF=5.0, SMOKE3D=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE. /
&TAIL /
```

Figure 28 : Configuration de la zone de déchets, de la torchère et des espèces combustibles.



```
&SURF ID='RUSTY_STEEL', COLOR='GRAY', MATL_ID='CARBON_STEEL', THICKNESS=0.008, EMISSIVITY=0.85 /
&SURF ID='WOOD_DEBRIS', COLOR='SIENNA', THICKNESS=0.04, EMISSIVITY=0.88 /
&OBST ID='PILE_A', XB=260,290, 95,118, 0.0,3.2, SURF_ID='WOOD_DEBRIS' /
&OBST ID='PILE_C', XB=355,385, 88,120, 0.0,3.9, SURF_ID='WOOD_DEBRIS' /
&OBST ID='SCRAP_1', XB=255,272, 92,115, 0.0,3.6, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='SCRAP_2', XB=278,298, 105,127, 0.0,2.9, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='SCRAP_3', XB=312,335, 115,140, 0.0,4.0, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='SCRAP_4', XB=345,370, 122,145, 0.0,3.3, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='SCRAP_5', XB=365,388, 80,105, 0.0,4.2, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='PALLET_1', XB=282,302, 70,84, 0.0,1.8, SURF_ID='BURNING_WASTE' /
&OBST ID='PALLET_2', XB=290,308, 71,85, 1.6,3.0, SURF_ID='WOOD_DEBRIS' / ! stacked
&OBST ID='PALLET_3', XB=315,333, 74,88, 0.0,2.1, SURF_ID='WOOD_DEBRIS' /
&OBST ID='CONT_1', XB=252.5,272.5, 66.5,78.5, 0.0,2.9, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='CONT_2', XB=278.5,298.5, 66.5,78.5, 0.0,3.1, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='CONT_3', XB=304.5,324.5, 66.5,78.5, 0.0,2.8, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DRUM_1', XB=328,334, 79,85, 0.0,1.9, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DRUM_3', XB=344,350, 79,85, 0.0,1.8, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DRUM_5', XB=370,376, 105,111, 0.0,1.7, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DRUM_6', XB=380,386, 115,121, 0.0,1.9, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='PIPE_1', XB=350,390, 98,102, 0.0,2.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='PIPE_2', XB=350,390, 106,110, 0.0,2.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='PIPE_3', XB=350,390, 114,118, 0.0,2.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DEBRIS_02', XB=295,303, 118,125, 0.0,1.6, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='DEBRIS_03', XB=312,320, 85, 93, 0.0,1.3, SURF_ID='WOOD_DEBRIS' /
&OBST ID='DEBRIS_04', XB=355,363, 128,135, 0.0,1.7, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='DEBRIS_06', XB=265,273, 125,133, 0.0,2.2, SURF_ID='RUSTY_STEEL' /
&OBST ID='NEW_NORTH_WALL', XB=252.3,392.3, 56.3,57.3, 0.0,3.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='NEW_WEST_WALL', XB=252.3,253.3, -43.4,56.3, 0.0,3.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='NEW_EAST_WALL', XB=392.3,393.3, -43.4,56.3, 0.0,3.0, SURF_ID='STEEL_DARK' /
&OBST ID='NEW_ZONE_GROUND', XB=253.3,392.3, -43.4,56.3, -0.2,0.0, SURF_ID='WASTE_GROUND' /
&SURF ID='YELLOW_PIPE', COLOR='YELLOW' /
&OBST ID='PIPE_RACK_HOR', XB=261.3,358.3, 36.3,38.3, 4.0,6.0, SURF_ID='YELLOW_PIPE' /
&OBST ID='PIPE_RACK_VER', XB=261.3,263.3, -43.4,36.3, 4.0,6.0, SURF_ID='YELLOW_PIPE' /
&OBST ID='FLARE_CORE', XB=358.5,361.5, 34.5,37.5, 0.0,55.0, SURF_ID='STEEL' /
&OBST ID='FLARE_SIDE_1', XB=356.0,357.0, 33.5,34.5, 0.0,50.0, SURF_ID='STEEL_FL' /
&OBST ID='FLARE_SIDE_2', XB=362.5,363.5, 33.5,34.5, 0.0,50.0, SURF_ID='STEEL_FL' /
&OBST ID='FLARE_SIDE_3', XB=356.0,357.0, 37.5,38.5, 0.0,50.0, SURF_ID='STEEL_FL' /
&OBST ID='FLARE_SIDE_4', XB=362.5,363.5, 37.5,38.5, 0.0,50.0, SURF_ID='STEEL_FL' /
&SURF ID='FLARE_FIRE', HRRPUA=4000.0, TMP_FRONT=1300.0, COLOR='ORANGE' /
&VENT ID='FLARE_TIP', XB=359.2,360.8, 35.2,36.8, 55.0,55.0, SURF_ID='FLARE_FIRE' /
&SURF ID='STEEL', COLOR='GRAY' /
&SURF ID='STEEL_FL', COLOR='BLACK' /
&SPEC ID='HEXENE', FORMULA='C6H12', MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT=8700. /
&SPEC ID='ISOPENTENE', FORMULA='C5H10', MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT=8700. /
&SPEC ID='N-PENTENE', FORMULA='C5H10', MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT=8700. /
&SPEC ID='TOTAL_FUEL', SPEC_ID(1:3)='HEXENE','ISOPENTENE','N-PENTENE', MASS_FRACTION(1:3)=0.41,0.33,0.26 /
&SPEC ID='SOOT', AEROSOL=.TRUE., DENSITY_SOLID=1800., MEAN_DIAMETER=0.5E-6, CONDUCTIVITY_SOLID=0.2 /
```

Figure 29 : Configuration de la combustion, des capteurs et des paramètres de sortie.