

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

**Contribution à l'étude du risque et modélisation d'une
explosion dans une installation gazière : cas du centre enfuteur**

GPL CE 191 El-Eulma -Sétif

Saadane ZEMMIT

Sous la direction de :

| | | |
|------------------------------------|------------|-----|
| M ^r . Mohamed BOUBAKEUR | MAA | ENP |
| M ^r . M'hamed BOUSBAL | MAA | ENP |
| M ^r . Bouzid BENKOUSSAS | Professeur | ENP |

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du Jury :

| | | | |
|-------------------------|---|--------------------|------|
| Président : | M ^r . SALAH LARBI | Professeur | ENP |
| Rapporteur /Promoteur : | M ^r . BOUBAKEUR Mohamed | MAA | ENP |
| | M ^r . BOUSBAL M'hamed | MAA | ENP |
| | M ^r . BENKOUSSAS Bouzid | Professeur | ENP |
| Examineur : | M ^r . MOHAMED Tarek Attouchi | MAA | ENP |
| Invités : | M ^r . GHERBI Ali | Lieutenant Colonel | DGPC |
| | M ^r . BERRACHED Tayeb | Commandant | DGPC |

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Filière : QHSE-GRI

Mémoire de post-graduation spécialisée en QHSE-GRI

Contribution à l'étude du risque et modélisation d'une explosion
dans une installation gazière : cas du centre enfuteur GPL
CE 191 El-Eulma -Sétif

Saadane ZEMMIT

Sous la direction de :

| | | |
|------------------------------------|------------|-----|
| M ^r . Mohamed BOUBAKEUR | MAA | ENP |
| M ^r . M'hamed BOUSBAI | MAA | ENP |
| M ^r . Bouzid BENKOUSSAS | Professeur | ENP |

Présenté et soutenu publiquement le 29 avril 2018

Composition du Jury :

| | | | |
|-------------------------|---|--------------------|------|
| Président : | M ^r . SALAH LARBI | Professeur | ENP |
| Rapporteur /Promoteur : | M ^r . BOUBAKEUR Mohamed | MAA | ENP |
| | M ^r . BOUSBAI M'hamed | MAA | ENP |
| | M ^r . BENKOUSSAS Bouzid | Professeur | ENP |
| Examineur : | M ^r . MOHAMED Tarek Attouchi | MAA | ENP |
| Invités : | M ^r . GHERBI Ali | Lieutenant Colonel | DGPC |
| | M ^r . BERRACHED Tayeb | Commandant | DGPC |

ENP 2018

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à ALLAH le tout puissant, pour le courage et la patience qu'il nous a donné pour accomplir ce travail.

Je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et la réussite de cette formation.

Mes profonds remerciements s'adressent à mes encadreurs; M^r BOUZID BENKOUSAS, M^r MOHAMED BOUBAKEUR, M^r M'HAMED BOUSBAI, et qui se sont toujours montrés disponibles et à l'écoute, tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Je dois un remerciement à tous les enseignants de la PGS qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de cette formation. Leur gentillesse, et leurs disponibilités permanentes, sans oublier le très actif technicien du département, M^r REDHA, qui Grâce à son concours, on a été continuellement pris en charge,

Je dois un remerciement à tous mes collègues de la protection civile; à toute l'équipe de service de prévention; le directeur de la wilaya de Sétif, lieutenant colonel A . CHABOR, à Mr le Directeur Général de la Protection Civile le Colonel M. LEHBIRI qui a mis à la disponibilité du personnel de la protection civile toutes les possibilités de formation.

Mes profondes gratitudes et chaleureux remerciements vont vers M^r le Directeur du District GPL Sétif, le chef département HSE au sein de NAFTAL Sétif, pour ses judicieux conseils et sa disponibilité permanence , sans oublier tout le personnel du centre CE191 El-Eulma qui ont su nous orienter à travers leurs conseils tout au long de ce présent travail.

Une pensée particulière est adressée aux collègues du PGS que nous avons côtoyés quotidiennement durant cette formation, avec qui on a pu passer de bon moment.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement, tous mes proches amis et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont toujours soutenu et encouragé dans la réalisation de ce mémoire.,

À toutes ces personnes, je présente mes remerciements, mes respect et ma gratitude.

ملخص:

إن التعامل مع غاز البترول المميع بات ضروريا في الحياة اليومية للأفراد وخاصة في المجال الصناعي ، كما أن فقدان السيطرة عليه وعدم التحكم فيه يؤدي إلى الوقوع في كوارث انسانية و بيئية ، لذا فإنه من الضروري معرفة سلوك هذه المواد ومدى خطورتها وتأثيرها على الانسان و البيئة و كذا اتخاذ إجراءات و تدابير وقائية و ذلك من خلال دراسات و تحاليل دقيقة للأخطار و أسباب وقوعها و نتائجها و كيفية التعامل معها و التقليل من احتمالات وقوعها.

إن من خلال هذا العمل الذي يندرج ضمن دراسة الأخطار الناجمة عن استعمال غاز البترول المميع داخل مركز 191 لتعبئة فارورات الغاز المميع بالعلمة ولاية سطيف ، نحاول إعطاء نظرة عامة عن هذا المركز و الأخطار المتواجدة داخله و أسباب وقوع الحوادث و كذا مدى تأثيرها على الإنسان و البيئة باستعمال التطبيق الآلي (فاست) (PHAST) من جهة و الطرق التحليلية أو الرياضية المتاحة من جهة أخرى ، مع اقتراح حواجز أمنية و كذا طرق للوقاية و الحماية و الحد من خطورة الكوارث الناجمة عن هذا النشاط.

الكلمات الدالة : غاز البترول المميع ، تدابير وقائية ، دراسة الأخطار ، طرق تحليلية ، التطبيق الآلي فاست ، الحواجز الأمنية .

Abstract:

The use of LPG has become indispensable on a daily basis, and in particular in the industrial field; the lack of control over its use leads to dramatic consequences for the human being, the environment and industry; for this, it's necessary to know the behavior of the LPG, the danger , and consequences induced in its uses, it is therefore necessary to take the preventive measures to mitigate these effects, by making studies and detailed analysis of the risks, their causes and consequences and how to deal with them.

Based on this project Which falls within on risk analysis and the modeling of explosions resulting, that may occur in the center 191 El-Eulma ,through analytical models and using the PHAST to highlight the overpressure and thermal effects on the immediate environment , and proposed the appropriate safety barriers to deal with any incidents.

Key Words : liquefied petrol gas , preventive measures , risk analysis , PHAST, safety barriers.

Résumé :

L'utilisation du gaz de pétrole liquéfier GPL est devenue indispensable dans le quotidien, et en particulier dans le domaine industriel. La non maitrise de son utilisation nous induit a des conséquences dramatiques sur l'être humain, l'environnement et l'industrie. Pour cela, il est nécessaire de connaitre le comportement du GPL, et des conséquences induites dans ses utilisations, il faut donc prendre les mesures préventives nécessaires pour pallier a ces effets, en faisant des études des dangers et méthodes analyse détaillées des risques, leurs causes et leurs conséquences et comment en faire face.

Le présent travail a porté sur une analyse des risques et des modélisations portant sur des explosions qui peuvent survenir dans le centre enfuteur 191 El-Eulma Willaya de SETIF, en utilisant des modèles analytiques, confortés par une utilisation du logiciel PHAST, dans le but de faire ressortir les effets de surpression et des effets thermiques sur l'environnement immédiat, et par la suite proposer des barrières de sécurité adéquates pour réduire les probabilités d'occurrence éventuelles des incidents.

Mots clés : gaz de pétrole liquéfier, mesures préventives , études des dangers , méthodes analyse , modèles analytiques

Sommaire

Résumé

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 12

I.1.Chapitre I Accidentologie liée aux explosions dan l'industrie gazières 16

I.1.1. Introduction..... 16

I.1.2. Quelques explosions dans des sites industriels [1] 16

I.1.3. les conclusions utiles du retour d'expérience : 18

I.2. Aspect réglementaire..... 19

I.3. Présentation de l'entreprise (Centre emplisseur 191 El-Eulma SETIF) 22

I.3.1. Emplacement géographique..... 22

I.3.2. L'organisation interne du centre..... 24

I.3.3.L'organigramme du centre 24

I.3.4. Description des réservoirs de stockage de propane et de butane 24

I.3.5. Pomperie GPL..... 25

I.3.6. Zone de dépotage..... 26

I.3.7. Aire de stockage des bouteilles 26

I.3.8. Le Hall d'emplissage..... 27

I.3.9. Bâtiment utilités 28

I.3.10. Pomperie incendie 28

I.3.11. Moyens de Transport : 28

I.3.12. La structure HSE..... 28

I.4. Le gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) 31

I.4. 2. Limite d'inflammabilité 32

I.4.3. Influence des gaz GPL sur certaines matières 32

I.4.4. Conclusion..... 32

Chapitre II : Analyse des risques 34

II.1. introduction..... 34

II.2. Approche déductive / inductive..... 34

II.3. domaines d'application : 35

II.4. constitution d'un groupe de travail : 35

II.5. choix des méthodes d'analyse des risques 36

II.6. Principes de quelques méthodes d'analyse de risques..... 37

II.6.1. Arbre des défaillances 37

II.6.2. APR (Analyse Préliminaire des Risques)..... 37

II.6.3. Arbre des conséquences 38

II.6.4. AMDE et AMDEC..... 38

| | |
|--|-----------|
| II.6.5. Méthode HAZOP (HAZard and OPerability study) | 38 |
| II.7. l'analyse préliminaire de risques (APR) | 38 |
| II.7.1. Définition : | 38 |
| II.7.2. historique et domaine d'application : | 39 |
| II.7.3. But de la méthode | 40 |
| II.7.4. Principe | 40 |
| II.7.5. Déroulement : | 40 |
| II.7.6. limites et avantages : | 41 |
| II.8. application de la l'analyse préliminaire de risques (APR) : | 42 |
| Chapitre III. Modélisation des effets des explosions | 56 |
| III. 1.Introduction..... | 56 |
| III.2. Description des phénomènes d'explosion | 56 |
| III.2.1. définition..... | 56 |
| III.2.2. Hexagone d'explosion | 56 |
| III.2.3. Types d'explosions..... | 57 |
| III.2.4. Description du phénomène d'un BLEVE | 59 |
| 2.4.1. Définition: | 59 |
| 2.4.2. Causes possibles d'un BLEVE : | 59 |
| 2.4.3. Produits concernés par le BLEVE : | 59 |
| 2.4.4. Equipements concernés par le BLEVE : | 60 |
| 2.4.5. Les types des BLEVEs : | 60 |
| III .3 .Modélisation des effets de surpression : | 62 |
| III.3. 1. Application du Modèle de l'équivalent TNT..... | 64 |
| III. 3. 2. Application du modèle multi-énergie (Modèle TNO)..... | 67 |
| III. 3. 3. Application du modèle Strehlow-Baker | 71 |
| III. 4. Simulation et modélisation à l'aide du logiciel PHAST | 74 |
| III. 4. 1. Avantages de l'utilisation du logiciel PHAST: | 75 |
| III. 4. 2. Résultats de la simulation en utilisant le logiciel PHAST | 75 |
| III. 4.3. Résultats obtenus à l'aide du logiciel PHAST | 76 |
| III.5. Modélisation des effets thermiques | 79 |
| III.5.1. Boule de feu | 79 |
| III.5.2. Choix du modèle..... | 80 |
| III.5.3. Dimensions et durée de la boule de feu..... | 80 |
| Chapitre IV : les Barrières de sécurité | 87 |
| IV .1. Le concept de barrières de sécurité | 87 |
| IV. 2. Les actions préventives dans les sites industriels..... | 89 |
| IV.4. Mesures de prévention et de protection contre les risques liés activités de stockage GPL | 92 |
| 4.1. Généralités..... | 92 |
| 4.2. Prévention contre les fuites des produits inflammables: | 92 |

| | |
|--|----|
| 4.3. Prévention contre l'inflammation d'une atmosphère explosive : | 93 |
| IV.5. Conduite à tenir en cas d'un sinistre | 93 |

conclusion générale

bibliographie

Liste d'abréviations

| | |
|---------------|--|
| ADD | Arbre Des Défaillances |
| ADE | Arbre d'Evènements |
| ALARP | As Low As Reasonably Practicable |
| ARI | Appareil de Respiration Isolants |
| APG | Appareils à Pression Gaz |
| APV | Appareils à Pression Vapeur |
| AMDEC | Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité |
| APR | Analyse Preliminarie des Risques |
| BLEVE | Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion |
| CE 191 | Centre Emplisseur 191 El-eulma SETIF |
| EI | Événement Indésirable |
| E P I | Equipements de Protection Individuels |
| ER | Événement Redouté |
| HAZOP | HAZard and OPerability |
| HSE | Hygiène Sécurité Environnement |
| GPL | Gaz de Pétrole Liquéfier |
| INERIS | Institut National ... |
| IPCE | Installations Classées pour la Protection de l'Environnement |
| ISO | International Standard Organization |
| LIE | Limite Inférieure d'Explosivité |
| NAFTAL | NAFT Algérie |
| RBF | Rayon de la boule de Feu |
| TLS | Limite Supérieur de Température (Tmperature Limit Superior) |
| TNT | Tri-Nitrite de Toluène |
| TNO | The Organisation Néerlandaise pour la Recherche Appliquée |
| TBF | Temps de la boule de Feu |
| OHSAS | Occupatioanal Health en Safety Assessment Series |
| REX | Retour d'Expérience |
| PII | Plan d'Intervention Interne |
| PC | Protection Civile |
| PPRT | Plan de prévention des Risques Technologiques |
| POI | Plan d'Organisation Interne |
| PPI | Plan Particulier d'Intervention |
| UVCE | Unconfined Vapour Cloud Explosion |

LISTE DES TABLEAUX :

- Tableau 1:** Caractéristiques des pompes du Pomperie GPL.
- Tableau 2:** Caractéristiques des pompes de la pomperie incendie
- Tableau 3:** les moyens matériels fixes de securite
- Tableau 4:** les moyens matériels mobiles de sécurité
- Tableau 5 :** Résumé général des caractéristiques des GPL commerciaux
- Tableau 6 :** Critères de choix pour les principales méthodes d'analyse des risques
- Tableau 7 :** exemple d'un tableau APR
- Tableau 8 :** échelles de cotation des risques (probabilité)
- Tableau 9 :** échelles de cotation des risques (gravité)
- Tableau 10 :** matrice de criticité
- Tableau 11 :** application APR
- Tableau 12 :** temps l'évaluation des risques sans prendre en compte les barrières de sécurité
- Tableau 13 :** réévaluation des risques avec prendre en considération les éventuelles barrières de prévention et/ou de protection
- Tableau 14 :** Comparaison des BLEVE "froids" et "chauds" :
- Tableau 15 :** variation des Ps en fonction des distances x (extrais de l'abaque)
- Tableau 16 :** variation des Ps en fonction des distances x(résultats analytiques)
- Tableau 17 :** Comparaisant entre les deux méthodes de calcule (modèle TNT)
- Tableau 18 :** variation des puissances de pression Ps en fonction des distances x (à l'aide du modèle multi énergie TNO)
- Tableau 19 :** Vitesse de la flamme, en nombre de Mach
- Tableau 20 :** représentation des résultats de Ps (puissance de pression) en fonction de la distance x à l'aide de l'abaque de baker-strehlow (conformément à l'arrêté français du 29/09/05)
- Tableau 21 :** seuils des effets de surpression sur l'homme et sur les structures par à porte au distances x de centre de l'explosion *
- Tableau 22 :** variation de densité de flux thermique reçus par une cible à une distance x par à port au centre de la boule de feu
- Tableau 23 :** seuils des thermiques sur l'homme et sur les structures par à porte au distances x de centre de l'explosion *m* conformément à l'arrêté français du 29/09/05

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Prise de vue aérienne du CE 191 El-Eulma

Figure 2: Plan de masse de CE 191 El-Eulma - image Google

Figure 3: Plan de masse de CE 191 El-Eulma

Figure 4: L'organigramme de centre

Figure 5: Sphère butane et cigares propane

Figure 6: exemple sur l'opération dépotage

Figure 7: types des bouteilles et les casiers

Figure 8: le hall d'emplissage

Figure 9 : Typologie des types de méthode d'analyse

Figure 10 : schéma de Démarche générale de l'APR

Figure 11 : décomposition de système étudié en sous systèmes

Figure 12 a : Répartition des ENS en fonction de la criticité de leurs risques pour l'ensemble de system (sans barrières de sécurité)

Figure 12 b : Répartition des ENS en fonction de la criticité de leurs risques pour l'ensemble de system (avec barrières de sécurité).

Figure 13 : scénario d'un accident major (BLEV).

Figure 14 : schéma générale d'un scénario conduite à un accident majeure.

Figure 15 : Hexagone d'explosion.

Figure 16 : scénario d'un UVCE.

Figure 17 : - Chronologie d'un BLEVE froid

Figure 18 : Le mécanisme de formation de BLEVE chaud dû à un feu externe
(Réf : Daniel A. Crowl "Understanding explosions", CCPS Publication, 2003)

Figure 19 : Abaque du modèle de l'équivalent TNT

Figure 20 : variation des puissances de pression P_s en fonction des distances x (modèle de l'équivalent TNT).

Figure 21 : Photo réelle des équipements de stockage GPL du centre 191.

Figure 22 : Distribution des équipement considérés comme obstacles par à port au nuage Explosif.

Figure 23 : Surpression adimensionnelle en fonction de la distance adimensionnelle, avec un paramètre (valeurs de 1 à 10) représentant le coefficient de la puissance de l'explosion

Figure 24 : variation des puissances de pression P_s en fonction des distances x (modèle

multi- énergie - TNO)

Figure 25 : Diagramme donnant la surpression en fonction de la distance à l'échelle (méthode Baker-Strehlow)

Figure 26 : variation des puissances de pression P_s en fonction des distances x (modèle baker- strehlow).

Figure 27 : comparaisant entre les trois modèles..

Figure 28 : Distances des effets de surpression d'une explosion sur la sphère – PHAST..

Figure 29 : périmètres des effets des surpressions d'une explosion de la sphère du butane au Niveau de C119 El-Eulma.

Figure 30 : positionnement des différents cibles par à port au centre d'explosion.

Figure 31 : Boule de feu image réelle

Figure 32 : Comparaison des méthodes de Roberts et de TNO. pour calculer le D_{max} et le t_{max} (m) de la boule de feu.

Figure 33 : schéma d'une Boule de feu..

Figure 34 : variation de densité de flux thermique reçus par une cible à une distance x par à port au centre de la boule de feu...

Figure 35 : système d'alerte générale..

Figure 36 : Protection contre l'incendie : Rampe de pulvérisation d'eau

Introduction générale

Introduction générale

Les accidents industriels majeurs tels que les explosions et les incendies présentent des comportements très variés qui dépendent principalement de la nature et la composition du combustible, l'air ambiant (météorologie), la topographie ainsi que de la ventilation de l'enceinte. Ce comportement présente un très grand risque, non seulement pour les vies des personnes et du matériel, mais également il a d'importants impacts sur l'environnement. Une fois l'explosion produite, il va y avoir toute une série de conséquences et il convient de retenir, en général, les grandes classes des effets suivantes :

Les effets de surpression : les explosions génèrent des ondes de choc, ayant des effets sur les personnes et sur les structures.

Les effets thermiques: dans le cas d'une explosion physique à travers la rupture de l'enceinte qui produit un nuage de gaz conduisant à la constitution d'une boule de feu.

Effets missiles ou projectiles: projection de fragments à des distances parfois très importantes.

Le dégagement des suies et des gaz de combustion: Ces dégagements peuvent à la fois être toxiques (présence éventuelle des produits toxiques dans les fumées de combustion), réduisent la visibilité (la présence des fumées diminue fortement la visibilité dans l'entrepôt et éventuellement dans l'environnement proche du site), et produisent de la pollution.

Pour faire face aux effets des accidents majeurs qui peuvent apparaître à la fois à court et à long terme, le risque explosion a reçu une attention particulière auprès des industriels, notamment après les récents explosions industriels qui ont causé des pertes humaines et matériels importantes. La prise de conscience collective de l'importance de ces risques, en termes d'effets sur l'humain, le matériel et l'environnement, a permis d'élaborer un contexte législatif dans le but d'améliorer la performance et la disponibilité des différents équipements de sécurité.

La prise en compte de ce risque dans les études de sécurité se heurte à un problème récurrent, à savoir la difficulté, voire l'impossibilité de réaliser des essais d'explosion en vraie grandeur. En effet, les essais sont relativement difficiles à mettre en œuvre et peuvent s'avérer très coûteux à travers la fabrication, et l'utilisation d'un ou plusieurs prototypes qui seront non réutilisables (dans le cas d'une simulation pour avoir plusieurs cas de scénarios dangereux),

La gestion des risques se base sur un ensemble d'outils et des techniques qui permettent d'estimer et d'évaluer la criticité des risques, ceci nécessite au préalable la mise en

œuvre de scénarios de danger. Ces derniers exigent une bonne compréhension de l'existant par la multiplication des visites, des consultations des experts et recueillir des divers départements de l'entreprise les informations afin de reproduire le plus fidèlement la situation réelle de l'installation.

La finalité de la gestion des risques est la maîtrise des risques inacceptables par la mise en place de moyens et de mesures techniques et organisationnelles, afin de réduire leurs criticités à un niveau acceptable.

Dans ce document, la problématique traite de la maîtrise des risques majeurs appliquée au Centre 119 El-Eulma NAFTAL en évaluant les conditions de stockage et d'utilisation de quantité en croissance continue de produits dangereux, entraînant forcément la survenue des accidents majeurs. Même si la conception et l'édification de l'installation ont été menées selon les standards internationaux requis et en conformité avec la législation et la réglementation en vigueur, ils restent néanmoins soumis à des aléas car le fonctionnement de toute installation industrielle comporte toujours des éléments de risque d'exploitation.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Le Chapitre I : Consiste à :

- réaliser un recueil des accidents industriels survenus dans le monde dans le domaine des activités gazières. En faisant ressortir les causes et les effets.
- Présenter quelques références législatives liées au domaine de la sécurité industrielle.
- Présenter l'entreprise le centre emplissage de GPL C191 El-Eulma (situation, équipements et organigramme personnels) ainsi que description de la matière dangereuse utilisée (caractéristiques physico-chimique...), à savoir le GPL

Le Chapitre II : est destiné à introduire brièvement les méthodes d'analyse les plus utilisées, en faisant ressortir les critères du choix de la méthode d'analyse adoptée, à savoir l'APR et son application sur l'installation, pour nous permettre de situer et de maîtriser les risques.

Le Chapitre III : est dédié à la modélisation analytique des phénomènes d'explosions à l'aide de trois modèles : le modèle TNT, le modèle TNO et le modèle de Baker Stehlow, en faisant ressortir les critères de choix de ces modèles, confronté à une simulation par le logiciel PHAST. Le niveau de gravité auquel est soumise l'installation, est évalué à travers un calcul

les distances atteintes par les seuils des effets de surpression et des effets thermiques sur l'homme et les structures

Le Chapitre IV : est dédié en premier lieu à la maîtrise des risques par la proposition des barrières de sécurité de prévention, de protection, et d'intervention sur le site ; en proposant une démarche sur la conduite à tenir en cas d'un sinistre dans des sites similaires.

Chapitre I : Retour d'expérience et cadre réglementaire

Chapitre I : Retour d'expérience et cadre réglementaire

I.1. Accidentologie liée aux explosions dans l'industrie gazières

I.1.1. Introduction

Durant les dernières décennies, plusieurs accidents industriels graves et actes de malveillances liés à des explosions notamment dans le domaine du stockage des matériaux dangereux tel que le GPL, ont amené la communauté internationale à prendre des mesures adéquates afin de limiter les effets de ce type de risques.

Plusieurs exemples relatifs à des explosions dans les établissements ayant une activité de manipulation, de stockage et du transport des gaz inflammables comme le GPL et le GNL ...etc, ont occasionné des dégâts énormes et très graves sur l'homme, le matériel et l'environnement.

I.1.2. Quelques explosions dans des sites industriels [1]

La rupture d'une tuyauterie dans une unité de stockage de propane au port Newark, au Etats-Unis a provoqué un incendie (07/07/1951) [1.1]. Cet incident est causé par un défaut de fonctionnement de la vanne d'isolement interne du réservoir reliée à la canalisation du réservoir, ce qui a conduit à son explosion 15 minutes plus tard. Les 69 autres cuves présentes sur le site ont explosé (BLEVE) dans les 100 minutes suivantes (effet domino). Cette catastrophe était tellement importante, qu'elle a rendu l'intervention des pompiers très délicate. Le système de fourniture d'eau ayant été mis hors service par un projectile. Onze personnes ont été blessées.

Un BLEVE a détruit un réservoir de stockage de GPL dans une unité de craquage catalytique, dans une raffinerie à Cottage Grove au Etats-Unis (22/10/1956) [1.2]. Douze personnes ont été tuées et 40 blessées. L'installation a été totalement détruite.

Une fuite de propane dans une raffinerie à Feyzin en France (04/01/1966), [1.3], a généré un nuage inflammable, qui a dérivé jusqu'à l'autoroute mitoyenne, une voiture arrêtée à 100 m du point de fuite longeant l'autoroute a été suffisante pour déclencher la mise à feu, un feu de nappe a apparu sous la sphère, les secours de la raffinerie, ont essayé de refroidir les sphères voisines et d'éteindre la torchère géante qui a pris une nouvelle ampleur après l'ouverture des soupapes de sécurité sur le haut de la sphère, cette dernière a explosé

brutalement vers 8h45 (1er BLEVE), la boule de feu s'est développée à 400 m de hauteur et a atteint 250 m de diamètre, une sphère voisine de propane a explosé à son tour à 9h40 (2ème BLEVE), le bilan humain était lourd : Dix-huit morts dont 11 sapeurs pompiers et 84 blessés sur 158 personnes présentes. D'importants dommages matériels ont été observés, à travers l'inflammation des réservoirs voisins, l'ouverture des soupapes de sécurité de plusieurs sphères de stockage, et l'apparition de phénomène de projection de missiles due aux BLEVES, retrouvés à plus de 700 m, un des projectile pesait 48 tonne et a été retrouvé à 325 m, 8 000 m³ (1 500 t) de produits pétroliers ont été perdus. Le souffle de l'explosion a été ressenti jusqu'à Vienne (16 km au sud) et 1475 habitations ont été atteintes.

Suite a un déraillement d'un train de marchandise, à Boynton Beach au Etats-Unis le (06/02/1977) [1.4], un wagon de propane a enfoncé le muret de rétention d'un stockage de quatre réservoirs de GPL, la citerne a explosé, s'est brisé et la plus grosse partie a été projetée à 130 m. Un incendie s'est déclaré. Une heure et demi plus tard, un BLEVE a détruit une citerne d'isobutane, il s'est formé une boule de feu de 100 m de diamètre visible à plus de 40 km, deux personnes ont été brûlés vives, l'incendie a été finalement maîtrisé 2 jours plus tard.

Un incendie s'est déclaré dans un centre emplisseur de GPL à Sydney en Australie (01/04/1990) [1.6], A 22h 05 le réservoir contenait 160 m³ de gaz a explosé et s'est trouvé projeté à 300 m dans la rivière voisine, détruisant au passage un bâtiment industriel non occupé. L'explosion a provoqué le déplacement du réservoir voisin de 50 cm sur son socle sans le renverser. L'ensemble du site était en feu. A 22h33, un camion-citerne de 40 tonne a explosé à son tour. A 23h00, les autorités ont décidé d'évacuer les riverains dans un rayon de 2km. Les secours ont évacué 10 000 personnes ; 300 sauveteurs ont été mobilisés. L'incendie a perduré jusqu'à 5 h du matin, De nombreux BLEVES de petites bouteilles (une centaine) ont explosé, mais les autres gros réservoirs n'ont pas subit de BLEVE. Le coût des dommages a été évalué au alentour de 3,5 Millions d'euro. Le sinistre a causé d'importants dégâts par onde de choc et effets thermiques dans un rayon de 200 m. L'onde de choc s'est ressentie à 3 km. La formation d'un nuage explosible à partir d'une fuite sur une tuyauterie serait à l'origine de l'incendie. La source d'ignition pourrait être due au passage d'une voiture ou à une étincelle d'origine électrique.

Une fuite de propane a été survenue durant le dépotage d'une citerne routière de 35 m³ vers un réservoir fixe, à TREVISE (Treviso) en Italie (15/03/1996) [1.7], dans un établissement

de stockage et d'embouteillage de GPL , une explosion a détruit les bureaux, la partie supérieure de la citerne a provoqué la formation d'une petite boule de feu, la chaleur dégagée a provoqué l'explosion d'une citerne routière de 12 m³ et a fait détruire du matériel appartenant aux pompiers. Un fragment de la citerne a endommagé, le toit d'un bâtiment et a atterri à 500 m du lieu de l'explosion. Trois employés et 10 pompiers ont été blessés, l'un des employés est décédé 4 jours plus tard, 250 personnes du voisinage ont été évacuées durant les 24h.

Une importante fuite dans une canalisation de transfert vers une unité de stockage et de remplissage de bouteilles de gaz (GPL), A Birtley Au Royaume-Uni (25/04/2000) [1.9] ,Une explosion s'est produite, les murs de l'installation ont été soufflés, un employé est décédé, 2 autres ont été brûlés légèrement.

I.1.3. les conclusions utiles du retour d'expérience :

L'analyse de ces accidents nous a permis d'extraire les points essentiels suivants :

- Les dégâts accidentels liés aux activités de stockage du GPL, sont très graves et catastrophiques,
- Généralement la cause principale de ces accidents catastrophiques, est la fuite ou la dispersion du produit inflammable (perte de confinement) dans l'air.
- La plus part des incidents conduisent à des explosions (phénomènes de BLEVE ou d'un UVCE qui sera expliqués ultérieurement), qui sont amplifié par des effets dominos qui aggravent la situation.
- La lutte contres ces types d'accidents est très difficile et parfois très longue, dans la plus part des cas, il y a des blessures graves et mortelles dans la population, les travailleurs, et les groupes d'intervention.

A ce fait, et de nos jours, la capacité d'assurer la sécurité des biens et des personnes grâce à des moyens de prévention et de protection contre les risques liés aux explosions, est une préoccupation mondiale. Les lieux où ce type d'explosion se produisent peuvent être industriels (bâtiment, réservoir de stockage...), militaires (stockage de munitions, véhicules, bâtiments), civils (lieux publics, transport). Il est donc nécessaire, de protéger les biens et les personnes travaillant sur ces sites. Pour cela l'état veuille à organiser et mettre en place des exigences et des lois ayant une orientation rigoureuse vis à vis des installations, des dispositifs de prévention, de protection et d'intervention au niveau des sites industrielles afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens, ainsi que l'environnement .

I.2. Aspect réglementaire

I.2.1. Réglementation algérienne

La réglementation algérienne dans le domaine de l'environnement, des risques, de l'hygiène et de la sécurité du travail, est très pourvue, elle se rapproche d'une façon significative de la réglementation internationale, notamment européenne dans ces domaines. Dans ce qui suit, nous rapportons la réglementation applicable aux installations classées, notamment dans le cadre de la protection de l'environnement et de la sécurité industrielle.

- **Circulaire n° 006 du 30/11/83** Sur le contrôle des prescriptions de sécurité. Exercices d'intervention au sein des unités répertoriées.

- **Loi n° 88-07 du 26 janvier 1988** : relative à l'hygiène, la sécurité et la médecine au travail. Cette loi a pour objet les voies et moyens ayant pour but d'assurer au travailleur les meilleures conditions en matière d'hygiène de sécurité et de médecine au travail, et de désigner les personnes responsables et les organismes employeurs chargés de l'exécution des mesures prescrites.

- **Le Décret n° 98-339 du 03 Novembre 1998** : relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), définissant la réglementation applicable aux installations classées et fixant leur nomenclature.

- **La loi N°03-10 du 19 juillet 2003** : relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. La présente loi a pour objet de définir les règles de protection de l'environnement, dans le cadre du développement durable. Elle est fondée sur les principes généraux suivants :

- Le principe de la préservation de la diversité biologique.
- Le principe de la non dégradation des ressources naturelles.
- Le principe de substitution.
- Le principe d'intégration.
- Le principe d'action préventive et de correction, par priorité de la source, des atteintes à l'environnement.
- Le principe de précaution.
- Le principe du pollueur payeur.
- Le principe d'information et de participation.

- **La circulaire R1 du 22 septembre 2003**, qui identifie les installations soumises à déclaration, en conséquence assujettie à l'élaboration d'une étude d'impact avant exploitation

et d'une étude de danger et d'impact, elle prévoit également, l'obligation par l'exploitant d'établir un plan d'organisation interne POI réalisé sur la base d'une étude de danger, et l'élaboration d'un plan particulier d'intervention PPI, qui se sera fait sur la base du POI par l'autorité territoriale compétente.

- **La loi N° 04-20 du 25 décembre 2004** relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
- **Décret exécutif n° 05-08 du 8 janvier 2005** relatif aux prescriptions particulières applicables aux substances, produits ou préparations dangereuses en milieu du travail .
- **Décret exécutif n° 05-09 du 8 janvier 2005** relatif aux commissions paritaires et aux préposés à l'hygiène et à la sécurité.
- **Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006** définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.
- **Décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006** définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.
- **Décret exécutif n° 07-144 du 19 mai 2007** fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
- **Décret exécutif n° 07-145 du 19 mai 2007** déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement.
- **Décret exécutif n° 09-159 du 2 mai 2009** fixant les modalités des inspections de vérification nationales et internationales des installations déclarées au sens de la convention sur l'interdiction de la mise au point, de la fabrication, du stockage et de l'emploi des armes chimiques et sur leur destruction

I.2.2. Réglementation étrangère

- **la directive n° 89/391/ CEE** du conseil des communautés européennes du 12 juin 1989, dite « directive cadre », définissant les principes fondamentaux de la protection des travailleurs. Elle a placé l'évaluation des risques professionnels au sommet de la hiérarchie des principes généraux de prévention, lorsque les risques n'ont pas pu être évités à la source. Depuis 1991 tout chef d'entreprise est tenu de procéder à une évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs. Les bases réglementaires sont les lois et décret propres à chaque pays européen.
- **La directive n°96/82/CEE** (Directive SEVESO II) du 9 décembre 1996 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Cette

directive a pour objet la prévention des accidents majeurs impliquant des substances dangereuses et la limitation de leurs conséquences, pour l'homme, et l'environnement, afin d'assurer de façon cohérente, et efficace, des niveaux de protection élevés.

- **Arrêté du 29/09/05 (CEE):** relatif à l'évaluation et à la prise de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels, dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

I.2.3. Normes internationales

Les normes internationales ont évolués dans un autre sens, car elles étaient préoccupées de la certification, et ont plutôt progressé pas à pas. Le système ISO 9000 (qui existe depuis 1994) a donc servi de base à un système de gestion de l'environnement (ISO 14001, 1996), maintenant universellement reconnu comme la norme unique de la gestion de l'environnement.

L'ISO 14001 traite des pollutions accidentelles et continues, mais est peu orienté vers la gestion du risque.

La gestion de la santé et de la sécurité n'a été codifiée que plus tard (2000) et a suivi le modèle ISO 14001 pour aboutir à la spécification OHSAS 18001 . Les "normes" ISO 14001 et OHSAS 18001 sont construites sur le même plan, ce qui permet de rapprocher facilement les deux systèmes et de vérifier l'absence de zones grises ou d'omissions. Puisque le système de gestion est une méthode d'organisation de la pensée, des actions et des documents, le parallélisme strict des deux systèmes est un élément essentiel qui permet de gérer l'ensemble des questions HSE avec seulement ces deux systèmes, l'un plutôt orienté vers les effets accidentels, l'autre vers des effets continus. La santé au travail et l'hygiène industrielle se trouvent donc intégrées de façon logique dans le système de gestion de la sécurité.

A cet effet la gestion des risques dans les dernières années devient un volet très important dans la phase d'étude, au cours de la réalisation des projets, et dans la phase d'exploitation, ce qui permet de reconnaître les causes Séquentielles conduisant à des incidents et des accidents, qui peuvent entraîner à des conséquences désastreuses, et permet également d'estimer et d'évaluer les effets de tels accidents dans des scénarios quasi-réels mettant en jeu des environnements variés et complexes.

Le centre 191 El-Eulma de district GPL Sétif (cas de la présente étude) fait partie des sites industriels en Algérie, ayant des dangers particuliers qui peuvent engendrer des conséquences catastrophiques, donc avant de commencer l'analyse des risques et les dangers existants dans ce site, la modélisation des effets des phénomènes dangereux liés à cette activité sur l'homme, les structures et l'environnement, il est nécessaire d'avoir un aperçu sur tous les équipements qui compose l'unité , le processus et les propriétés de la matière dangereuse manipulée.

I.3. Présentation de l'entreprise (Centre emplisseur 191 El-Eulma SETIF)

Ce centre emplisseur à pour mission :

- L'approvisionnement en produits vrac (Butane et Propane).
- Le stockage du G.P.L en vrac.
- La commercialisation et la distribution du GPL.
- Le conditionnement en bouteilles de 13 kg pour le Butane, en bouteilles de 11 kg, 35 kg et en citerne de 01 tonne et 1750 kg pour le Propane.

I.3.1. Emplacement géographique

Le centre emplisseur est d'une superficie de six (06) hectares, est entré en production en décembre 1981 et a été rénové en 2007, il est implanté dans une zone industrielle qui s'étend au Sud-est du centre ville d'El Eulma. Il est délimité par :

- La route nationale N° 77, qui relie la ville d'El-Eulma à Batna, et un terrain vague au nord.
- Un terrain vague au sud.
- Un terrain vague à l'Est.
- Une entreprise des installations intégrées de distribution à l'Ouest.
- Un centre de distribution CLP appartenant à NAFTAL au Nord-Nord-ouest.



Figure 9: Prise de vue aérienne de la ville EL-EULMA



Figure 10 - Plan de masse de CE

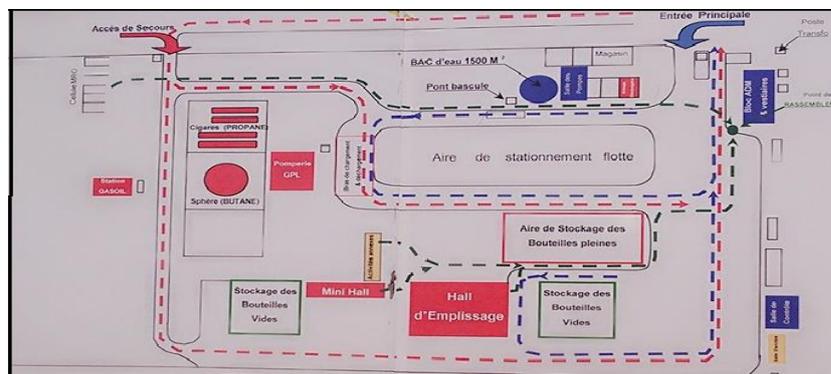


Figure 3 - Plan de masse de CE 191

I.3.2. L'organisation interne du centre

Le centre emplisseur 191 El-Eulma compte 157 employés, en 3 équipes, à raison de 17 heures par jour et 6 jours par semaine, le gardiennage par contre, est assuré par le personnel de la sûreté interne selon le système quart (07j /07 - 24h/24).

I.3.3.L'organigramme du centre

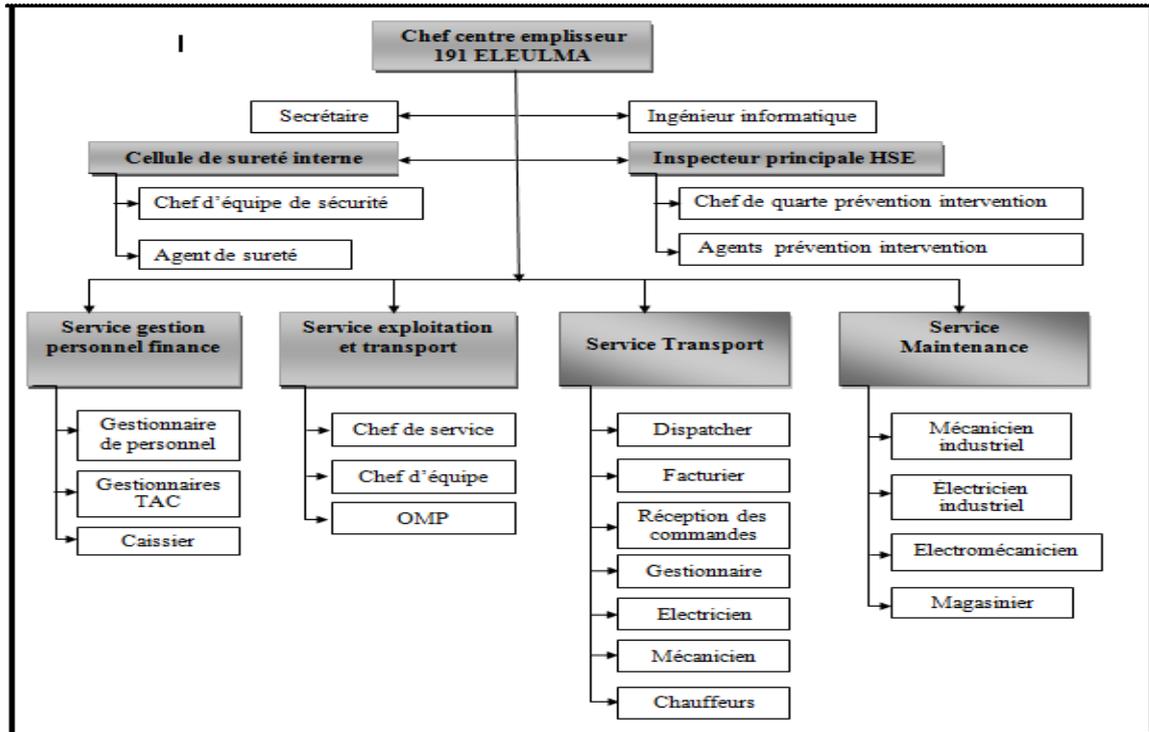


Figure 11: L'organigramme du centre

I.3.4. Description des réservoirs de stockage de propane et de butane

Le butane est stocké dans une sphère d'une capacité de 2000 m^3 , cependant, le propane est stocké dans quatre (04) cigares, deux d'une capacité unitaire de 150 m^3 , et deux d'une capacité unitaire de 200 m^3 . Les stockages sont sous rétention. Un dispositif d'arrosage fixe permet d'arroser les réservoirs en cas de nécessité pour les refroidir lorsqu'ils sont soumis à un feu ou au rayonnement thermique solaire ou d'un feu voisin. Les disposent des éléments de sécurité suivants :

- Un indicateur de pression.
- Un indicateur de température en zone supérieure.
- Un système de jaugeage.

- Une soupape de sécurité de type à ressort pour la sphère et quatre (4) soupapes pour chaque cigare.



Figure 12: photo de la Sphère du butane et les cigares du propane

I.3.5. Pomperie GPL

Cette station comprend six (06) groupes dont les caractéristiques sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau 5: Caractéristiques des pompes de la Pomperie GPL

| N° | Type et nature de produit | Débit |
|---------|---|----------------------|
| 01 | Deux (2) groupes électropompes (Alimentation des halls d'emplissage en butane et en propane) | 30 m ³ /h |
| 02 | | 30 m ³ /h |
| 03 | Un (1) groupe électropompe de secours | 30 m ³ /h |
| 04 | Un (1) groupe électropompe (chargement des citernes en propane vrac) | 14 m ³ /h |
| 05 & 06 | Deux (2) compresseurs mixtes pouvant travailler simultanément sur l'un ou l'autre (propane et butane) | 14 m ³ /h |

I.3.6. Zone de dépotage

Le CE 191 El Eulma est doté de deux (02) postes de chargement en propane et butane, équipé de bras de marque EMCO. Ce poste de dépotage est situé à proximité de la pomperie GPL.



Figure 13: exemple sur l'opération dépotage

I.3.7. Aire de stockage des bouteilles

Le CE 191 El Eulma dispose de plusieurs aires de stockage des bouteilles de propane et de butane qui sont :

- Une aire dédiée pour le stockage des bouteilles vides en retour de clientèle.
- Une aire dédiée pour le stockage des bouteilles pleines en attente d'expédition.

Les bouteilles de GPL sont réceptionnées, stockées et expédiées dans des casiers métalliques. Ces casiers sont déchargés et chargés dans des camions de livraison par le personnel du site et à l'aide de chariots élévateurs, tandis que les bouteilles réformées seront expédiées vers un centre d'écrasement NAFTAL. La capacité de stockage par jour est de :

- Butane B13kg (20000 bouteilles).
- Butane B03kg (5000 bouteilles).
- Propane P35kg (200 tubes).



Figure 14: types des bouteilles et les casiers

I.3.8. Le Hall d'emplissage

Le conditionnement des bouteilles s'effectue au niveau d'un atelier dit hall d'emplissage dont lequel les bouteilles vides vont être entrainés sur une chaine de convoyeur jusqu'au carrousel d'emplissage, qui contient 24 bascules d'emplissage. Une fois les bouteilles remplis à 13 kg, un contrôle de poids est automatiquement effectué par une balance qui fait sortir de la ligne les bouteilles ne respectant pas les tolérances de remplissage fixées, et les bouteilles mises de côté sont re-contrôlées par un opérateur.

L'opération de conditionnement des bouteilles est assurée par des agents d'exécution tel que : les Tireurs, OS-chaines, OMP, manutentionnaires et caristes qui sont constamment sensibilisés pour le respect des consignes d'exploitation et de sécurité.

Une fois le produit butane et propane conditionné selon les critères de qualité et de sécurité, les bouteilles seront mis dans un convoyeur, et transféré vers la zone de palettisation où ils seront injectées dans des palettes de 35 bouteilles et de 13kgs, un chariot élévateur conduit par un cariste est utilisé pour la manutention de levage sur un camion de livraison B13 Kg, une fois le camion chargé, le chauffeur cariste prend sa destination au niveau des points de vente, des dépôts NAFTAL ou des stations GD pour la commercialisation et la vente.



Figure 15: hall d'emplissage

I.3.9. Bâtiment utilités

Il comprend :

- Deux compresseurs à vis ATLAS COPCO : produit de l'air comprimé pour assurer le fonctionnement des équipements pneumatiques.
- Installation électriques : Le site est alimenté par le réseau électrique de Sonelgaz.

Le CE est équipé des installations électriques suivantes :

- ✓ Un Transformateur de puissance 630 KVA.
- ✓ Un Groupe électrogène de puissance 525 KVA

I.3.10. Pomperie incendie

Tableau 6: Caractéristiques des pompes de la pomperie incendie

| | Nombre | Débit unitaire nominal (m ³ /h) |
|--------------|--------|--|
| Electropompe | 03 | 150 m ³ /h |
| Motopompe | 01 | 450 m ³ /h |

I.3.11. Moyens de Transport :

Les moyens de transport dont dispose le CE 191 Eulma sont :

- 02 Bus pour le transport du personnel.
- 16 tracteurs routiers.
- 02 remorques de transport des palettes de gaz.
- 16 citernes routières GPL.
- 03 Camions citernes rigides (petit vrac).
- 11 camions rigides portes palettes.
- 04 Chariots élévateurs de 04 à 06 tonnes.

L'alimentation de ces moyens de transport s'effectue par un appareil interne de gasoil (cuve de gasoil 50 m³). La distribution des produits s'effectue par camions rigides porte-palettes pour les bouteilles et par les camions citernes GPL.

I.3.12. La structure HSE

12.1. L'intérêt de la structure HSE

La structure HSE au niveau du centre emplisseur El-Eulma est chapoté par un inspecteur HSE, travaillant en 3 x 8, répartie en quatre équipes, chaque équipe composée d'un

chef de quart prévention - intervention et trois agents prévention - intervention, la structure, HSE fournit des efforts importantes en matière de :

- Sensibilisation des chauffeurs, convoyeurs et mécaniciens.
- Sensibilisation du personnel d'exploitation et maintenance.
- Simulations anti - incendie une fois par mois.
- Assistance et surveillance des différents travaux de maintenance par la délivrance de permis de travail.
- Le suivi de la gestion des déchets spéciaux dangereux.
- La répartition des tâches des agents de la structure HSE établie par l'inspecteur selon un programme bien définie et affiché au niveau du poste de contrôle HSE.
- Application et suivi du processus HSE dans le cadre ISO 9001 notamment les documents et enregistrement en étroite collaboration avec le responsable de la sécurité industrielle du district.

12.2. Les moyens de sécurité existants

A - Les moyens humains

- Un (01) inspecteur de sécurité. - Quatre (4) chefs de quart de la sécurité.
- Dix (10) agents. - Un (01) infirmier.

B - Les moyens matériels

- Les moyens matériels fixes

Tableau 7: les moyens matériels fixes de la sécurité

| Les moyens fixes | Types |
|-----------------------------------|--|
| Moyens d'alerte | <ul style="list-style-type: none"> - La salle de contrôle - Une sirène d'alarme - Une ligne spécialisée avec la protection civile |
| Moyens de détection | <ul style="list-style-type: none"> - 23 détecteurs de gaz - 03 détecteurs thermiques - 17 détecteurs des flammes - 10 brises de glace |
| Moyens de lutte contre l'incendie | <ul style="list-style-type: none"> - 01 Bac d'eau d'incendie de 1500 m³ - 01 Une motopompe de 450m³/h - 01 Une motopompe de 200m³/h - 03 électropompe de 150m³/h - 01 réseau maillé - 10 couronnes et rampes |

- **Les moyens matériels mobile**

Tableau 8: les moyens matériels mobiles de sécurité

| Les moyens mobiles | Type |
|---------------------------------|--|
| Véhicule de secours (ambulance) | 01 |
| Extincteurs | <ul style="list-style-type: none"> - 12 Extincteurs à poudre 50 kgs - 35 Extincteurs à poudre de 6 et 9 kgs - 13 Extincteurs à CO₂ de 2 à 6 kgs - 03 Extincteurs à eau 09 litres |
| Matériels d'extinction | <ul style="list-style-type: none"> - 02 tuyaux souples diam.100 - 17 tuyaux souples diam.70 - 12 tuyaux souples diam.45 - 10 lances à eau 70 - 10 lances à eau 45 - 06 divisions |
| Annexes Matériels d'extinction | <ul style="list-style-type: none"> - 01 Étrangleur - 03 réductions - 06 clés tricoises - 04 clés barrage - 02 harnais |
| Matériels de sauvetage | <ul style="list-style-type: none"> - 02 appareils respiratoires - 01 appareil de réanimation - 02 tenues d'approche - 02 explosimètres - 03 couvertures anti - feu - 01 civière (brancard) |

Le produit utilisé (commercialisé) soit comme entrée ou sortie est le Gaz de Pétrole Liquéfier (GPL), et en raison du caractère explosif de cette matière, nous devons connaître et retrouver ses propriétés chimiques et physiques, les conditions de stockage et le mode de traitement, dans le but de donner une suite à l'apparition des phénomènes dangereux pouvant survenir d'une mauvaise manipulation ou d'un accident, ce qui va être présenté dans la partie suivante.

I.4. Le gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL)

La prévention des explosions vise à empêcher, ou à prévenir des conséquences néfastes d'un phénomène dangereux et de limiter ses effets grâce à des mesures ciblées, de telle sorte à préserver la sécurité des personnes, et à limiter les dégâts matériels. L'usage du GPL est aujourd'hui largement répandu en raison de sa facilité de stockage, de transport, et de distribution [3]

Le GPL étant plus lourd que l'air, contrairement au gaz naturel, il risque, en cas de fuite, de s'accumuler au niveau du sol et dans les parties basses, Cela entraîne un danger d'explosion lorsque l'accumulation forme un mélange GPL/air adéquat et qu'il y a une source d'inflammation. Cela entraînera également un danger d'asphyxie, puisque le GPL prend une expansion sur l'air et fait diminuer par conséquent la concentration en oxygène.

Le butane et le propane, définissent sous le terme général de Gaz de Pétrole Liquéfiés, sont extraits soit du pétrole brut au cours des opérations de raffinage, soit du gaz naturel et des gaz associés dans les gisements de pétrole. A titre indicatif, le raffinage de 100T de pétrole brut fournit environ 4T de gaz de pétrole liquéfiés.

I.4.1. quelque propriétés physico-chimiques

Tableau 5 : Résumé général des caractéristiques des GPL commerciaux

| Caractéristiques | Butane commercial | Propane commercial |
|--|---|---|
| Nom chimique | Butane | Propane |
| Formule empirique | C ₄ H ₁₀ | C ₃ H ₈ |
| Masse volumique moyenne : - A l'état liquide à 15°C - A l'état gazeux de 15°C et 1013 mbar | 580 Kg/m ³ 2,44 Kg/m ³ | 510 Kg/m ³ 1,87 Kg/m ³ |
| Densité par rapport à l'air | 2,07 | 1,56 |
| Température d'ébullition à 1013 mbar | -0,5 °C | -42 °C |
| Chaleur latente de vaporisation à 15 °C/Kg | 362 kJ/ 100,5 Wh/ 86,5kcal | 356 KJ / 98,8 Wh/ 85 kcal |
| Limite d'inflammabilité dans l'air - Inférieure - Supérieure | 1,8% 8,8 % | 2,4% 9,3% |
| Température d'auto-inflammation | 510 °C | 490 °C |
| Vitesse de combustion | 30 cm/sec | 30 cm/sec |
| Température de décomposition | 400 - 435 °C | 425 - 460 °C |

I.4. 2. Limite d'inflammabilité

Les gaz GPL sont inflammables dans des limites faibles, la combustion n'est possible que si le mélange (air + carburant) est réalisé suivant certaines proportions comprises entre ces limites. Les vapeurs des GPL constituent donc avec l'air un mélange inflammable et dangereux. Leur domaine d'inflammabilité dans l'air à 20°C et sous 1 atm varie de 2 à 10 % , Ce mélange est détonnant au contact d'une source de chaleur (flamme ou étincelle). Une fourchette plus restreinte que les autres gaz. a titre de comparaison, la plage d'inflammabilité dans l'air intervient entre :

- 4 et 75 % dans le cas de l'hydrogène ;
- 2,5 et 80 % dans le cas de l'acétylène ;
- 5 et 15 % dans le cas du gaz naturel.

I.4.3. Influence des gaz GPL sur certaines matières

Les gaz GPL n'ont aucune action corrosive sur les métaux, ils n'attaquent donc pas les récipients qui les contiennent, par contre ils dissolvent certaines substances comme l'huile, la graisse, les vernis et provoquent un gonflement important du caoutchouc naturel. Dans une installation fonctionnant au GPL, les joints, les membranes et les conduites souples doivent être fabriquées en caoutchouc synthétique. D'autre part il faut éviter de mettre les GPL en présence des huiles et des graisses

I.4.4. Conclusion

Le but de cette présentation de l'unité est de définir la position géographique du site, sa mission ainsi que les équipements et les installations existants, les différentes manipulations du GPL, les moyens matériel et humains, les caractéristiques du produits utilisées, les différents zone de traitement, ... etc)

Ces informations nous permettre de bien établir une analyse adéquate des risques, objet du prochain chapitre.

Chapitre II : Analyse des risques

Chapitre II : Analyse des risques

II.1. introduction

L'analyse des risques est un travail qui peut s'avérer complexe et doit mobiliser des ressources importantes, Dès lors, il est indispensable d'identifier clairement le système à étudier et de déterminer sans ambiguïtés les limites de l'étude.

Il peut, par exemple, s'agir d'étudier les risques associés à une nouvelle installation devant être implantée, d'identifier les risques associés à la modification d'un procédé existant ou de passer en revue les risques à l'échelle d'un site industriel complet .

II.2. Approche déductive / inductive

Il existe deux grands types de démarches en vue d'analyser les risques, la démarche inductive et la démarche déductive.

Dans une approche inductive, une défaillance ou une combinaison de défaillances est à l'origine de l'analyse. Il s'agit alors d'identifier les conséquences de cette ou ces défaillances sur le système ou son environnement. On dit généralement que l'on part des causes pour identifier les effets. Les principales méthodes inductives utilisées dans le domaine des risques accidentels sont : l'Analyse Préliminaire des Risques, l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC), l'HAZOP, l'analyse par arbre d'évènements.

A l'inverse, dans une approche déductive, le système est supposé défaillant et l'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état. On parle alors des effets pour remonter aux causes. L'analyse par arbre des défaillances constitue une des principales méthodes déductives.

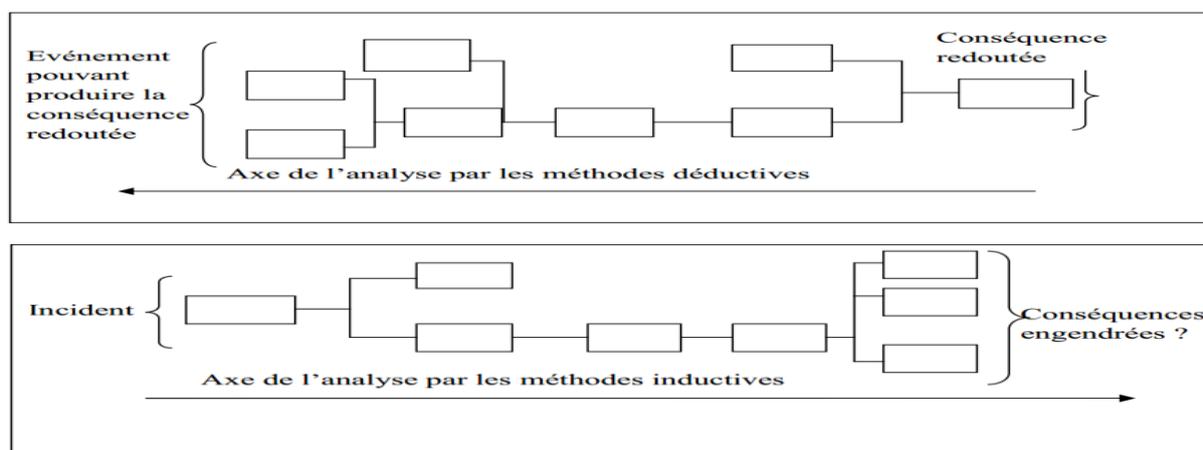


Figure 9 : Typologie des types de méthode d'analyse

II.3. domaines d'application :

Les outils d'analyse des risques doivent être choisis en fonction des caractéristiques des installations à étudier et du niveau de détail recherché.

Ainsi, il est possible de différencier les méthodes telles que l'APR réservée à une analyse « en surface » des risques ou à des installations peu complexes, et les méthodes dédiées à une analyse plus détaillée et généralement centrée sur des sous-systèmes bien définis, comme l'AMDEC, par exemple.

Bien entendu, le domaine d'application et le niveau de détail sont également fonction des compétences et de l'expérience des personnes qui mèneront ce travail. En d'autres termes, certains outils peuvent être adaptés afin d'être utilisés dans un domaine d'application sensiblement différent de leur domaine d'origine.

Ces différentes informations sont synthétisées dans le *Tableau 06*, pour les principales méthodes d'analyse des risques dans le domaine des risques accidentels.

En définitive, il n'y a pas de « bonne » ou de « mauvaise » méthode d'analyse des risques. Ces méthodes ne sont que des aides guidant à la réflexion et il convient donc de retenir celles qui sont les mieux adaptées au cas à traiter.

D'ailleurs, ces méthodes peuvent être tout à fait complémentaires. En effet, une phase préliminaire d'analyse des risques menée grâce à une APR, par exemple, permet d'identifier les parties d'une installation pour lesquelles l'utilisation de méthodes plus détaillées comme l'AMDEC ou l'HAZOP s'avère pertinente. De la même façon, la mise en œuvre d'une AMDEC par exemple est souvent utile, en vue de construire un arbre des défaillances.

Enfin, signalons que, pour des installations particulièrement simples, une démarche systématique d'identification des risques peut tout à fait convenir, même si elle n'est pas référenciée de manière formelle dans la littérature. Pour ces systèmes simples, l'usage de listes de contrôle (check-lists) permet en général de répondre de façon satisfaisante aux objectifs de l'analyse des risques. [4]

II.4. constitution d'un groupe de travail :

De manière générale, les méthodes d'analyse des risques sont destinées à être mises en œuvre dans le cadre d'un groupe de travail. Si leur utilisation par une personne seule n'est pas impossible, les résultats obtenus risquent néanmoins de perdre de leur pertinence. son intérêt réside en majeure partie dans la confrontation d'avis et de remarques de personnes ayant des

expériences et des connaissances complémentaires. Cette richesse de points de vue permet généralement de tendre vers un examen le plus exhaustif possible des situations de dangers.

Au sein de l'équipe, il convient de distinguer les personnes assurant un rôle d'encadrement et d'orientation (animateur, secrétaire...) des autres membres du groupe de travail apportant une contribution uniquement technique. [4]

II.4.1. Contribution Technique

L'équipe doit être pluridisciplinaire. Pour cela, elle doit être composée des personnes travaillant au quotidien sur les installations étudiées ou ayant une connaissance approfondie des installations (cas des projets). La composition habituelle des participants contribuant sur les aspects techniques peut être, à titre d'exemple, la suivante :

- responsable du projet,
- personne chargée de la sécurité,
- personne spécialiste du procédé, ingénieur procédé,
- personne chargée de la maintenance,
- spécialiste de l'automation et des systèmes, instrumentistes, automaticiens.
- personne travaillant en production, exploitant.

La composition du groupe de travail est souvent fonction de l'installation étudiée. A ce titre, on peut faire appel à des personnes travaillant dans le domaine électrique ou le génie civil. Néanmoins, il faut garder à l'esprit qu'une équipe ne doit pas comporter plus de sept ou huit personnes au total pour être efficace. [4]

II.5. choix des méthodes d'analyse des risques

Il existe un grand nombre d'outils ou de méthodes dédiés à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou d'une installation. En 1990, M.Monteau et M.Favaro en avaient identifié une quinzaine particulièrement adaptés à l'analyse des risques professionnels, Tixier et al. en ont recensé 67 en 2002, en étendant le champ de l'analyse des risques à différentes situations et types de dangers.

Quelques-unes des méthodes les plus fréquemment utilisées:

- l'Analyse Préliminaire des Risques (APR),
- l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)
- l'Analyse des risques sur schémas type HAZOP,
- la méthode « What-if ? » qui est une adaptation de la méthode HAZOP,
- l'Analyse par arbre des défaillances (ADD),

- l'Analyse par arbre d'évènements, (ADE),
- l'Analyse par Nœud Papillon.

Le tableau affiché ci-dessous nous donne une approche de niveau de détail pour chaque méthode ainsi que le domaine d'application privilégiés par rapport aux activités, donc il nous aide à choisir une méthode appropriée selon l'installation à étudiée

Tableau 6 : Critères de choix pour les principales méthodes d'analyse des risques

| Méthodes | Approche | Niveau de détail | Domaines d'application privilégiés |
|-------------------------------|------------------------|------------------|---|
| APR | Inductive | + | Installations les moins complexes Etape préliminaire d'analyse |
| HAZOP | Inductive | ++ | Systèmes thermo- hydrauliques |
| What-if | Inductive | ++ | Systèmes thermo- hydrauliques |
| AMDEC | Inductive | ++ | Sous-ensembles techniques bien délimités |
| Arbre d'évènements | Inductive | +++ | Défaillances préalablement identifiées |
| Arbre des défaillances | Déductive | +++ | Evènements redoutés ou indésirables préalablement identifiés |
| Nœud papillon | Inductive Déductive | +++ | Scénarios d'accidents jugés les plus critiques |

II.6. Principes de quelques méthodes d'analyse de risques

II.6.1. Arbre des défaillances

Permet de déterminer les diverses combinaisons d'évènements qui génèrent une situation indésirable unique, dont le diagramme logique est réalisé au moyen d'une structure arborescente [4]

II.6.2. APR (Analyse Préliminaire des Risques)

Consiste à identifier les divers éléments dangereux présents dans le système étudié et à examiner pour chacun d'eux comment ils pourraient conduire à une situation accidentelle plus ou moins grave, suite à un évènement initiant une situation potentiellement dangereuse

II.6.3. Arbre des conséquences

Permet d'élaborer un diagramme présentant l'ensemble des éventualités, résultant de diverses combinaisons d'évènements, le développement de l'arbre débute par un évènement initiateur et progresse selon une logique binaire : chaque évènement conduit à identifier deux états successifs possibles, l'un acceptable et l'autre non acceptable. Cette démarche fournit la séquence logique des différents évènements susceptibles de se produire en aval de l'évènement primaire et permet donc leur évaluation.

II.6.4. AMDE et AMDEC

AMDE : consiste à considérer systématiquement, l'un après l'autre, chacun des composants du système étudié et à analyser les causes et les effets de leurs défaillances potentielles

AMDEC : équivalent à l'AMDE, en y ajoutant la criticité du mode de défaillance, dont l'estimation nécessite la connaissance des probabilités d'occurrence des défaillances, et les gravités de leurs effets

II.6.5. Méthode HAZOP (HAZard and OPerability study)

Étudie l'influence de la déviation des divers paramètres régissant le procédé analysé par rapport à leurs valeurs nominales de fonctionnement. A l'aide de mots-clefs, les dérives imaginées de chaque paramètre sont examinées systématiquement afin de mettre en évidence leurs causes, leurs conséquences, les moyens de détection et les actions correctrices

II.7. l'analyse préliminaire de risques (APR)

Selon une approche globale on a opté pour la méthode APR. en choisissant le sujet d'analyse des risques industriels pour désigner l'ensemble des dangers qui peuvent surgir au niveau du Centre Emplisseur CE 191 d'El-Eulma et dans le but de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier et juger si ce risque est acceptable ou non. [11]

L'analyse préliminaire des risques permet de mettre la lumière sur des barrières de sécurité existantes (Prévention et les barrières de Protection) en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse ;

II.7.1. Définition :

C'est une démarche, un processus dont l'objectif est d'évaluer les problèmes à

résoudre en matière de maîtrise des risques ; La méthode APR est dédiée à cette démarche qui peut prendre des formes très différentes dans sa mise en œuvre, suivant le domaine technique ou la filière industrielle considérés. Dans bien des cas une analyse préliminaire de risques, met en œuvre des méthodes plus connues dans les phases ultérieures de l'analyse de risques comme l'arbre de défaillance ; l'AMDE(C) (analyse des modes de défaillance, et de leurs effets et de leurs criticités), La sûreté de fonctionnement, méthodes pour maîtriser les risques . [11]

II.7.2. historique et domaine d'application :

L'Analyse Préliminaires des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Elle est utilisée depuis dans de nombreuses autres industries. L'Union des Industries Chimiques ; recommande son utilisation en France depuis le début des années 1980.

L' (APR) est une méthode d'usage très général qui a été réalisée par un group de travail multi disciplinaire ; couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée.

En ce sens, elle est particulièrement utile dans les situations suivantes :

- au stade de la conception d'une installation, lorsque la définition précise du procédé n'a pas encore été effectuée. Elle fournit une première analyse de sécurité se traduisant par des éléments constituant une ébauche des futures consignes d'exploitation et de sécurité. Elle permet également de choisir les équipements les mieux adaptés (avant projet sommaire).

- dans le cas d'une installation complexe existante, au niveau d'une démarche d'analyse des risques. Comme l'indique son nom, l'APR constitue une étape préliminaire, permettant de mettre en évidence les éléments ou les situations nécessitant une attention plus particulière et par conséquent l'emploi de méthodes d'analyses de risques plus détaillées. Elle peut ainsi être complétée par une méthode de type AMDEC, HAZOP ou arbre des défaillances par exemple. [11]

II.7.3. But de la méthode :

Mettre en évidence des Événements Indésirables (EI) et/ou Redoutés (ER) c'est-à-dire des EI à impact sur la sécurité.

II.7.4. Principe :

L'APR nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation. Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

- des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités...
- des équipements dangereux comme par exemple des stockages, zones de réception /expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière ...)
- des opérations dangereuses associées au procédé.

L'identification de ces éléments dangereux et la fonction du type d'installation étudiée et se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode. A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de dangers.

Une situation de dangers est définie comme une situation qui, si elle n'est pas maîtrisée, peut conduire à l'exposition de cibles à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

II.7.5. Déroulement :

L'utilisation d'un tableau de synthèse constitue un support pratique pour mener la réflexion et résumer les résultats de l'analyse. Ce tableau doit parfois être adapté en fonction des objectifs fixés par le groupe de travail préalablement à l'analyse. [11]

tableau 7 : exemple d' un tableau APR

| | | Fonction ou système : | | | | | Date : | |
|----|-----------------------|-----------------------|--------|--------------|----------------------|------------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| N° | Produit ou équipement | Situation dangereuse | Causes | Conséquences | Sécurités existantes | évaluation | Propositions d'amélioration | Nouvelle évaluation |
| | | | | | | | | |

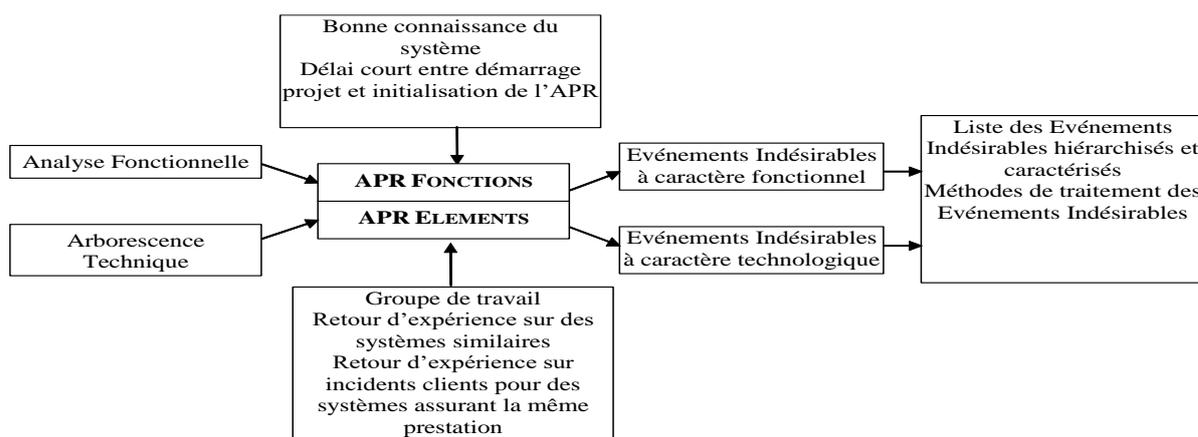


Figure 10 : schéma de Démarche générale de l'APR

Pour chaque fonction identifiée dans la phase de description des installations, les produits ou équipements sont passés en revue, en examinant les situations de dangers potentielles de manière systématique. Pour cela, il est fait appel à l'expérience et à l'imagination de chacun. L'analyse d'accidents constitue de plus une source d'informations à privilégier. Le groupe de travail peut alors adopter une démarche systématique sous la forme suivante :

- sélectionner le système ou la fonction à étudier sur la base de la description fonctionnelle réalisée.
- choisir un équipement ou produit pour ce système ou cette fonction.
- pour cet équipement, considérer une première situation de dangers.
- pour cette situation de dangers, envisager toutes les causes et les conséquences possibles.
- pour un enchaînement cause-situation de danger-conséquences donné, identifier alors les barrières de sécurité existantes sur l'installation.
- si le risque ainsi estimé est jugé inacceptable, formuler des propositions d'amélioration

II.7.6. limites et avantages :

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Par rapport aux autres méthodes, elle apparaît comme relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé. Cet avantage est bien entendu à relier au fait qu'elle est généralement mise en œuvre au stade de la conception des

installations [11]

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances. Toutefois, son utilisation seule peut être jugée suffisante dans le cas d'installations simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approches..

II.8. application de la l'analyse préliminaire de risques (APR) :

Choisissant un objectif à travers une méthode permettant d'établir un examen relativement rapide des situations dangereuses sur les installations, par rapport aux autres méthodes d'analyse, l'APR apparaît comme relativement économique en terme de temps d'application, et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé, ceci représente l'avantage principal de la méthode. En revanche, cette méthode ne permet pas de déterminer avec exactitude le déroulement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour les systèmes complexes.

Avant commencer, il faut définir en amont de l'analyse des échelles de cotation des risques en termes de probabilité, de gravité permettant d'avoir une grille de criticité faisant ressortir les critères d'acceptabilité, sur lesquels le groupe de travail se fondera pour proposer des mesures de maîtrise supplémentaires.

Notons que l'INERIS préconise cette estimation qualitative dans le cadre de l'analyse des risques d'accidents majeurs réalisée dans l'étude des dangers [Joly 2006].

II.8.1. échelles de cotation des risques (probabilité et gravité) [4]

échelles de cotation des risques (probabilité)

| Niveau de probabilité (NP) | NP1 | NP2 | NP3 | NP4 | NP5 |
|----------------------------|--|---------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| Appréciation | Événement possible mais extrêmement peu probable | Événement très improbable | Événement improbable | Événement probable sur site) | Événement courant) |

échelles de cotation des risques (gravité)

| Niveau de gravité NG) | NG1 | NG2 | NG3 | NG4 | NG5 |
|-----------------------|---|---|---|--|---------------------------|
| Appréciation | Négligeable : Aucune atteinte pour la santé | Modéré : Atteinte impliquant traitement du premiers secours | Sérieux : Atteinte sérieuse réversible sans aggravation | Majeur : Atteinte irréversible impliquant des blessures majeures | Catastrophique : Létalité |

II.8.2. Elaboration de la matrice :

Dans le domaine du risque industriel, la quantification des risques constitue une étape incontournable. Elle permet, au regard de la probabilité et de la gravité d'un accident, de juger de la suffisance ou non des mesures de prévention dont l'objectif est de prévenir l'apparition d'un accident, et des mesures de mitigation / protection dont le but est de limiter les effets de ces accidents, afin de se prononcer sur l'acceptabilité d'un risque, il faut pouvoir le mesurer en le comparant à une échelle.

les matrices de criticité ne font pas intervenir une frontière linéaire, mais un ensemble de couples de valeurs de probabilité/gravité (P/G) , au-delà desquels le risque passe du domaine de l'acceptable à celui de l'inacceptable. Pour limiter les erreurs de jugement sur des

événements dont le couple (P/G) se rapprocherait de la frontière, une notion de risque, dite « ALARP » (As Low As Reasonably Practicable), est fréquemment utilisée.

Il est à noter que le nombre de niveaux de probabilité et de gravité, constituant une matrice de criticité, n'a rien d'universel. Néanmoins les matrices de criticité, dites 5 × 5, c'est-à-dire composées de 5 niveaux de probabilité et de 5 niveaux de gravité, sont couramment utilisées.

Tableau 10 : matrice de criticité

| | | | | | | |
|----------------|-----|------------------------|-----------------|--------------|----------|---------------|
| Catastrophique | NG5 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 |
| Majeur | NG4 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 |
| Sérieux | NG3 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 |
| Modéré | NG2 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 |
| Négligeable | NG1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |
| | | NP1 | NP2 | NP3 | NP4 | NP5 |
| | | Extrêmement improbable | Très improbable | Peu probable | Probable | Très probable |

Zone rouge : Risque inacceptable, il nécessite une nouvelle évaluation des risques

Zone jaune : ALARP (As Low As Reasonably Possible) un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation.

Zone verte: Risque résiduel, compte tenu des mesures de maîtrise du risque, est modéré et n'implique pas d'obligation de réduction complémentaire du risque d'accident.

les résultats pratiques de l'analyse sont résumés sur le tableau de synthèse suivant, qui constitue un support pratique pour le groupe de travail, et les aide à préparer un ensemble de données d'identification et d'évaluation des risques liées au centre CE191, afin de mettre en places les moyens de prévention, d'intervention et de protection nécessaires

En premier lieu, le système doit décomposer en des sous systèmes selon la fonction de chaque zone qui contient un ou plusieurs équipements

Il existe plusieurs manières de décomposer une installation en sous-systèmes :

- La décomposition hiérarchique en fonction des relations des éléments de l'installation entre eux.
- La décomposition topologique en fonction de la position des éléments de l'installation dans l'espace ;
- La décomposition fonctionnelle de par la situation des éléments de l'installation dans la chaîne de fonctionnement de cette dernière

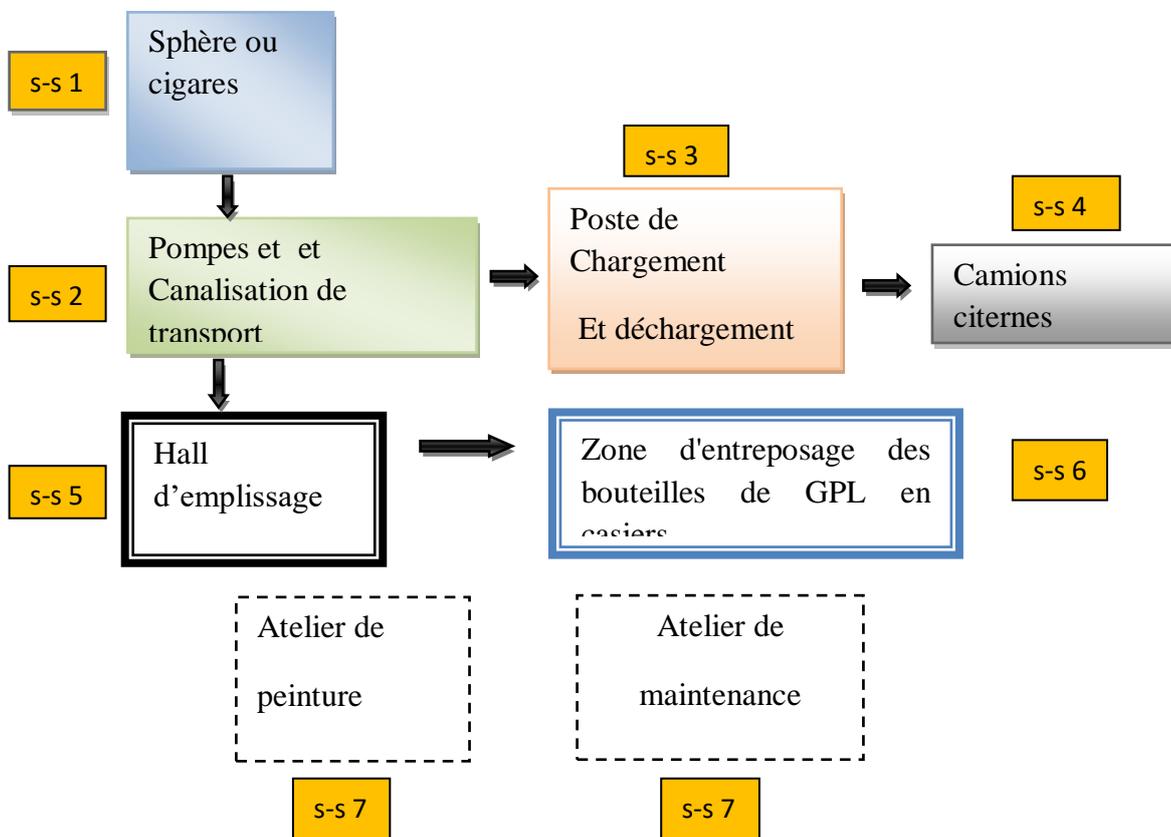


Figure11 : décomposition de système en sous Systems

- Il s'agit d'identifier en quoi chaque sous-système peut être la source de danger.
- En faisant cette identification pour tous les sous-systèmes, on obtient donc une liste exhaustive des dangers de système qui est présentée dans le tableau suivant :

| ACTIVITÉ | sous System | Eléments Dangereux | Situation dangereuse | cause | Conséquences | évaluation | | | Mesures de prévention | G | Mesures de protection Et intervention | P' | C' |
|----------|-------------------|--------------------|---|---|---|------------|---|-----|--|---|---|----|-----|
| | | | | | | G | P | C | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Stockage | Sphère ou cigares | GPL (Butane) | -Excès de pression du GPL dans la Sphère. * scénario (I) | - augmentation de la température générée par une source de chaleur | - explosion (BLEVE) -incendie - effets projectiles | 5 | 3 | 5.3 | - soupapes de sécurité détecteurs des gaz , chaleur , fumés - détecteurs atmosphère explosive - dispositifs limiteurs de pression | 4 | - Protéger thermiquement le réservoir par un écran liquide et retarder ainsi l'échauffement du produit qu'il contient. - rampe d'arrosage pour refroidissement - réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé | 2 | 4.2 |
| | | | -Sur remplissage de la sphère. -Déversement du produit scénario (II) | - mauvaise manipulation - Défaillance du limiteur de niveau Défaillance de la soupape de sécurité | -nuage explosive -BLEVE froid - UVCE ou feu de nappe s'il y a une source de chaleur | 5 | 3 | 5.3 | la mise en œuvre de : - soupapes de sécurité - détections de niveau haut et très haut - fermeture des vannes - dispositifs limiteurs de pression - arrêt automatique des pompes et compresseurs - cuvette de rétention - un système de paratonnerre | 4 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé - dilution le nuage avec arrosage de l'eau | 2 | 4.2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---|--|--|---|---|---|-----|--|---|--|---|-----|
| Réception + transfert | Pompes et compress- eurs + Canalisation de transport | GPL (Butane) -énergie électrique. | Fuite (nuage explosif) scénario (III) | -Perte d'étanchéité au niveau d'un joint ou d'une bride de la canalisation ou une pompe. -Brèche sur la canalisation. Corrosion , vibration, -Choc mécanique , -Desserrage des raccords -Perte d'étanchéité d'une pompe ou d'un compresseur de GPL. | - UVCE - BLEV - incendie | 5 | 4 | 5.4 | - détecteurs des gaz , de chaleur ,des fumés - protection au agressions mécaniques, et la corrosion et le gel. - arrêt automatique des pompes et compresseurs - programme de maintenance adéquat - vérifications périodiques - permis de travail | 4 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé - emplacement de : -extincteurs - RIA - poteaux incendie - arrêter la fuite - dilution de nuage | 3 | 4.3 |
| Distribution de GPL par camions | Poste de Chargement Et de déchargement | GPL (Butane / Propane) -énergie électrique. | Fuite (nuage explosif) scénario (IV) | -Perte d'étanchéité au niveau du bras d'un poste de chargement. -Perte d'étanchéité au niveau du raccordement d'un bras de chargement -Brèche sur un bras ou sur une canalisation associée ou sur le piquage de la citerne. - corrosion ; choc mécanique | -EVCE - explosion (BLEVE) - effets projectiles - incendie - Feu de torche (s'il y a une source de chaleur) | 4 | 4 | 4.4 | détecteurs des gaz , de chaleur ,et des fumés - protection au agressions mécaniques, et la corrosion et le gel. - arrêt automatique des pompes et compresseurs - programme de maintenance adéquat - vérifications périodiques | 3 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé | 2 | 3.2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|--------------|--|--|--|---|---|-----|--|---|---|---|-----|
| Camion Citerne | GPL (Butane / Propane) -énergie électrique. | scénario (V) | Fuite (nuage explosif) | -Perte d'étanchéité au niveau de la citerne. -Perte d'intégrité de la citerne. | - explosion (BLEVE) -incendie - effets projectiles | 3 | 3 | 3.3 | - protection au agressions mécaniques, et la corrosion et le gel. - programme de maintenance adéquat - vérifications périodiques - formation et sensibilisation des chauffeurs | 2 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé - dilution le nuage avec arrosage de l'eau | 2 | 2.2 |
| | | | -Excès de pression du GPL dans la citerne | - augmentation de la température générée par une source de chaleur - sur-remplissage de la citerne + défaillance de la soupape de sécurité | - explosion (BLEVE) -incendie - effets projectiles | 3 | 3 | 3.3 | la mise en œuvre de : - soupapes de sécurité - détections de niveau haut et très haut - fermeture des vannes - dispositifs limiteurs de pression - arrêt automatique des pompes et compresseurs - formation et sensibilisation des chauffeurs | 2 | - Protéger thermiquement le réservoir par un écran liquide et retarder ainsi l'échauffement du produit qu'il contient. - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé | 2 | 2.2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|--|---|---|--|---|---|-----|---|---|--|---|-----|
| Distribution de GPL en bouteilles | Hall d'em Plissage des bouteilles GPL et activités connexes | GPL (Butane / Propane) - énergie électrique. | Fuite (nuage explosif) scénario (VII) | -Perte d'étanchéité au niveau d'un plan de bride d'une canalisation de GPL. -Perte d'étanchéité d'un presse étoupe de vanne. -Brèche majeure sur une canalisation. -Perte d'étanchéité d'une bouteille (au niveau de son robinet). -Rupture du robinet d'une bouteille | -UVCE -explosion (BLEVE) -incendie -Feu de torche (s'il y a une source de chaleur | 5 | 3 | 4.3 | - détecteurs des gaz , de chaleur ,des fumés - protection au agressions mécaniques, et la corrosion et le gel. - arrêt automatique des pompes et compresseurs - maintenance préventive - vérifications périodiques - système de paratonnerre | 4 | - arrêt d'urgence - Protéger thermiquement le bouteilles par un écran liquide et retarder ainsi l'échauffement du produit qu'il contient. - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - réseau incendie - équipe d'intervention bien formé - ligne téléphonique directe avec protection civile - plan d'intervention | 2 | 4.2 |
| | Atelier de peinture | Peinture -énergie électrique. | Débordement de La peinture scénario (VIII) | - d'incendie dans la cabine de peinture et propagation de l'incendie dans le hall. | | 2 | 3 | 2.3 | -Système d'aération et de ventilation - EPI adéquat. -Système de protection et détection automatique (arrêt d'urgence). -maintenance préventive et sécurité préventive -respecter les conditions de stockage | 2 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé - emplacement de : -extincteurs - RIA | 1 | 2.1 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|--|--|--|--|---|---|-----|---|---|--|---|-----|
| | Zone d'entreposage des bouteilles de GPL en casiers | GPL (Butane / Propane) -énergie électrique. | Fuite (nuage explosif) scénario (IX) | -Perte d'étanchéité d'une bouteille (au niveau de son robinet). -Rupture du robinet d'une bouteille - choc mécanique - fissure sur la paroi d'une bouteille | - UVCE - explosion (BLEVE) - incendie (S'il y a une source de chaleur) | 2 | 3 | 2.3 | - EPI adéquat. -Système de protection et détection automatique (arrêt d'urgence). -maintenance préventive et sécurité préventive -respecter les conditions de stockage | 2 | - rampe d'arrosage pour refroidissement -réseau sprinkler - équipe d'intervention bien formé - emplacement de : -extincteurs - RIA - arrêter la fuite - dilution de nuage | 1 | 2.1 |
| Maintenance | Atelier de maintenance | - Pièces + machine -énergie électrique - bois, papier, plastique | -Départ d'un feu - scénario (X) | - électrification - court de circuit - réaction chimique - malveillance - mal organisation - | - Incendie - chute d'un objet - accident de travail | | | 3.1 | - aération des locaux - organiser les choses - éclairage de sécurité - formation et sensibilisation - contrôle périodique | 2 | -Mise en places des extincteurs - exercices de sauvetage et de secourisme - | 1 | 2.1 |

Tableau 11 : application APR

* Un scénario d'accident visualisé sur les figures 13 et 14, est défini comme l'enchaînement ou la combinaison d'événements aboutissant à un accident puis à ses conséquences,

8.1. 2. Résultats

Première évaluation

Dans un premier temps l'évaluation des risques sans prendre en compte les barrières de sécurité mises en place, nous a fait aboutir à une matrice de criticité représentée ci-dessous.

Tableau 12 : évaluation des risques sans prendre en compte les barrières de sécurité

| | | | | | |
|---------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|-----|
| NG5 | | | Scénarios I II | Scénarios, III | |
| NG4 | | | Scénarios. VII. | Scénarios . IV | |
| NG3 | Scénarios IX X | Scénario VIII. | Scénario V , VI | | |
| NG2 | | | | | |
| NG1 | | | | | |
| NG \ NP | NP1 | NP2 | NP3 | NP4 | NP5 |

- Risque résiduel
- Risque ALARP
- Risque inacceptable

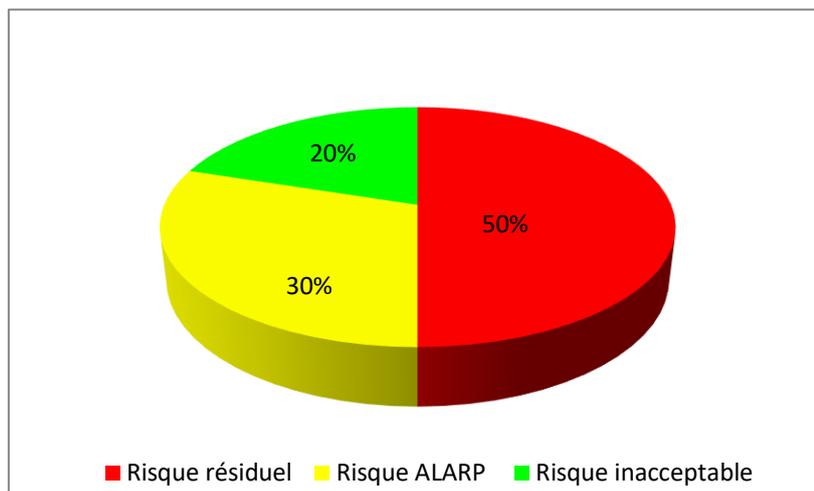


Figure 12 a : Répartition des ENS en fonction de la criticité de leurs risques pour l'ensemble du système (sans barrières de sécurité)

8.1. 3. Interprétation

Après déroulement de l'APR nous constatons ce qui suit :

–Le centre 191 district GPL El-Eulma comportant dix sous systèmes, fait ressortir les systèmes : sphère st cigares, Pompes et compresseurs + Canalisation de transport , Poste de Chargement et déchargement ,Camion Citerne , Hall d'emplissage des bouteilles GPL, et activités connexes , atelier de peinture , Zone d'entreposage des bouteilles de GPL en casier , Atelier de maintenance

– L'usine présente 30 % de risques ALARP (zone jaune en figure 12 a), et 50 % de risques inacceptables (zone rouge en figure 12 a), tandis que les risques résiduels représentent 20% de la totalité des risques.

8.1.4. Deuxième évaluation

La réévaluation des risques est évaluée avec la prise en considération des barrières de prévention et/ou de protection, pour aboutir à une nouvelle matrice de criticité sur laquelle nous avons positionné les différents risques.

Après déroulement l' APR nous constatons ce qui suit :

Tableau 13 : réévaluation des risques avec prise en considération des barrières de prévention et/ou de protection

| | | | | | |
|---------|----------------------|----------------------|--------------|-----|-----|
| NG5 | | | | | |
| NG4 | | Scénarios I, II, VII | Scénario III | | |
| NG3 | | Scénario IV | | | |
| NG2 | Scénarios X VIII. IX | Scénarios V, VI | | | |
| NG1 | | | | | |
| NG \ NP | NP1 | NP2 | NP3 | NP4 | NP5 |

- Risque résiduel
- Risque ALARP
- Risque inacceptable

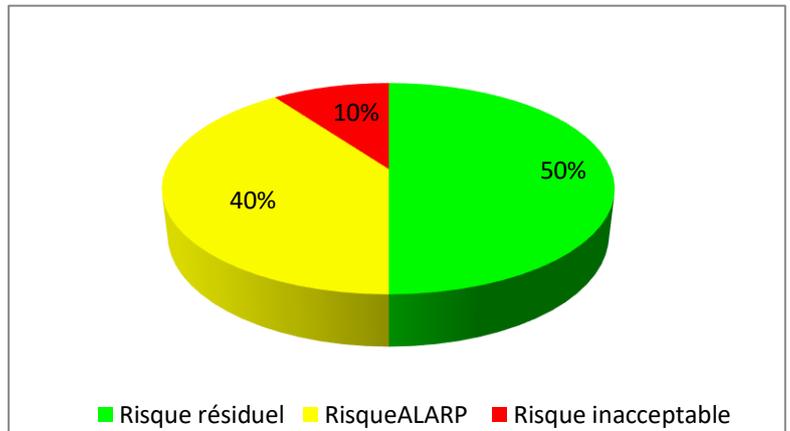


Figure 12 b : Répartition des ENS en fonction de la criticité de leurs risques pour l'ensemble du système (avec barrières de sécurité)

8.1.5. Interprétation

- Après la mise en places des barrières de sécurité, le centre présente 40 % de risques ALARP : Scénarios **I, II, IV et VII** (zone jaune)
- tandis que les risques résiduels représentent 50% de la totalité des risques : Scénarios **X, VIII, IX, V et VI** (zone verte)
- Dans la zone à risques majeurs c'est des risques inacceptables, ils représentent (10 %), elles sont susceptible de provoquer une explosion d'une grande ampleur, donc prendre la configuration **III**. (zone rouge en figure 13) , comme étant le scénario le plus défavorable



Figure 13 : Scénario d'un accident majeur (BLEVE)

8.1.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis à partir de la première étape, d'identifier grâce aux scénarios élaborés par la méthode d'analyse, les zones les plus critiques du CE191, qui sont : la sphère, les cigares de stockage, la pomperie GPL, l'ilot de chargement ainsi que la tuyauterie GPL..

Une première application de l'APR, sans la mise en place des barrières, a fait ressortir Cinq scénarios défavorables, qui ont été réduit à un seul scénario défavorable après la mise en place des barrières de protection et de prévention, ce scénario fera l'objet de la modélisation de l'étude du phénomènes dangereux, caractérisé par l'explosion de la sphère.

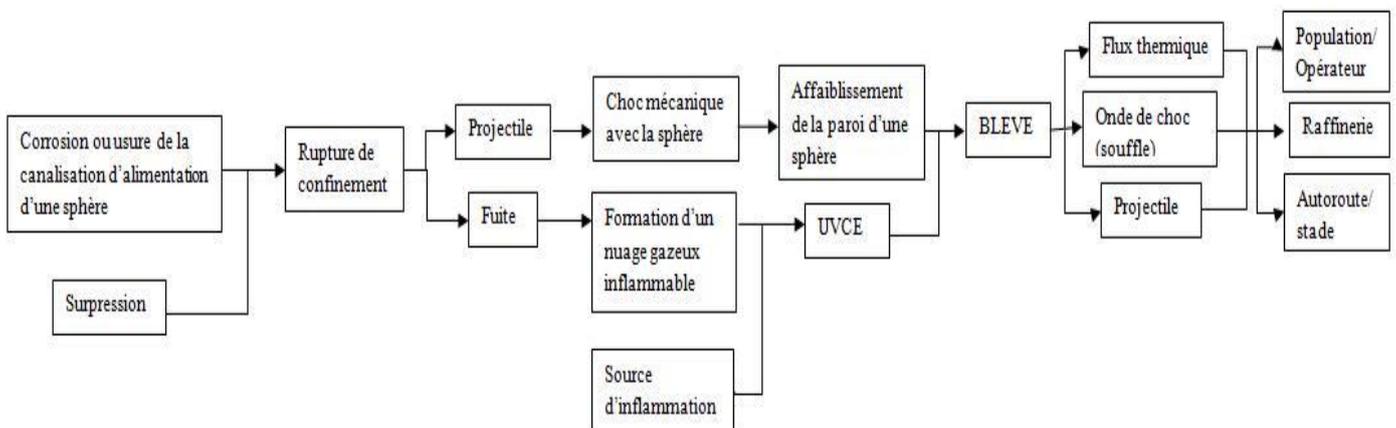
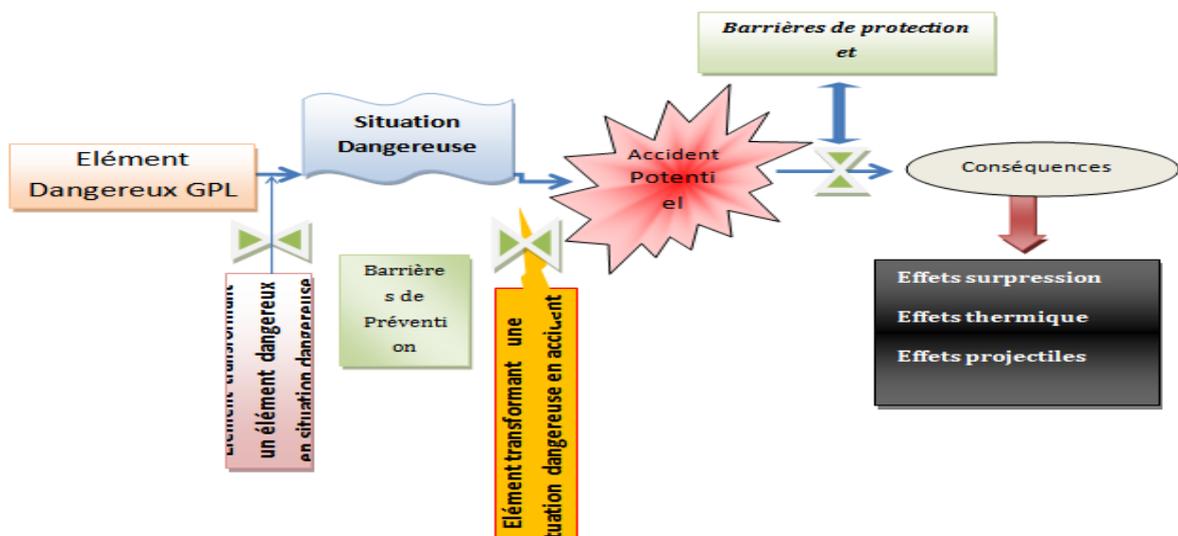


Figure 14 : schéma générale d'un scénario conduite à un accident majeur

Chapitre III. Modélisation des effets des explosions

Chapitre III. Modélisation des effets des explosions

III. 1.Introduction

Toutes les activités de stockage du gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège de phénomène d'explosion de type BLEVE ou d'un UVCE, comme nous l'avons fait ressortir lors de l'étude des risques à l'aide de la méthode APR, en tenant compte du retour d'expérience.

Pour étudier ces phénomènes, nous allons modéliser ces effets à l'aide de trois modèles analytiques à savoir : la méthode de l'équivalent TNT, le modèle multi-énergie et le modèle de Strehlow-Baker, qu'on va les conforter par l'utilisation du logiciel PHAST, en faisant ressortir les distances des effets les plus dangereux sur l'homme et sur les structures.

De ce fait, on va décrire ce phénomène avant de le modéliser pour mettre en évidence sa gravité à partir des distances atteintes par les surpressions et les flux thermiques dégagés lors de l'explosion de la sphère.

III.2. Description des phénomènes d'explosion

III.2.1. définition

C'est un phénomène de désintégration violente et instantanée, accompagné de bruit et parfois d'éclats, suite à des conditions favorables à une explosion, à travers une libération soudaine d'énergie plus ou moins confinée, plus ou moins maîtrisée, avec ou sans conséquences externes. L'explosion peut donner lieu à une onde de surpression (onde de choc), et à la formation d'une boule de feu. [3]

III.2.2. Hexagone d'explosion

Pour qu'une explosion soit possible, six conditions doivent être réunies simultanément :

- Les trois éléments du triangle de feu (combustible, comburant et source d'inflammation).
- Combustible sous forme gazeuse, en présence d'aérosol ou de poussières (matière en suspension).
- Confinement suffisant.
- Proportions dans le domaine de l'explosivité.

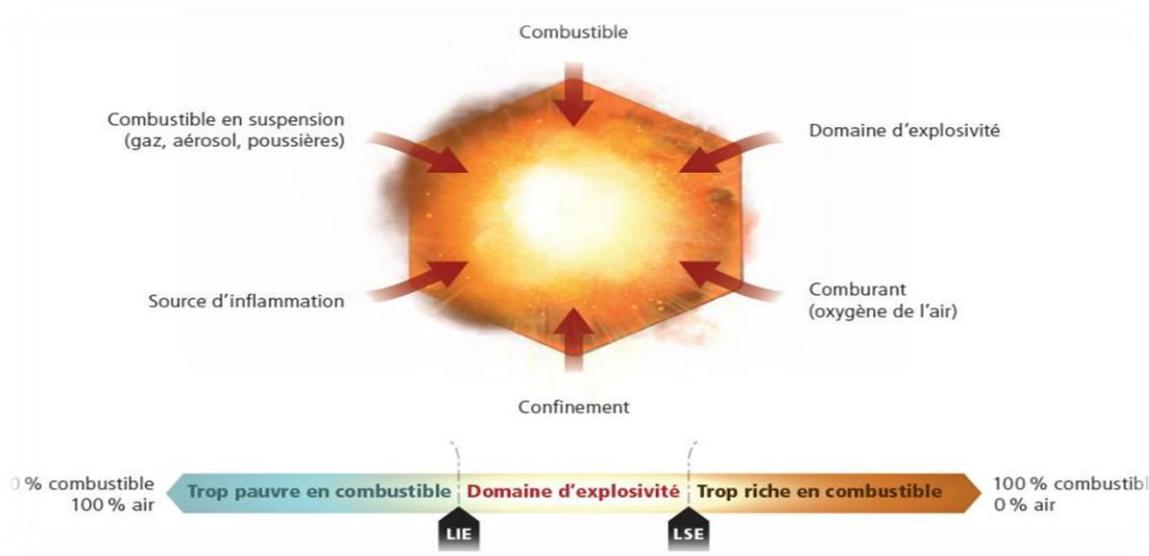


Figure 15 : Hexagone d'explosion

III.2.3. Types d'explosions

2.3.1. Explosions chimiques :

Ils représentent des combustions qui se déroulent à des vitesses élevées, en une fraction de seconde. Elles comprennent les réactions en milieu gazeux ou condensé [6]

a- Explosion en milieu gazeux

Appelée aussi explosion d'atmosphère, c'est la combustion en milieu confiné, d'un mélange composé d'une vapeur de combustible avec de l'air.

b- Explosion en milieu condensé

La réaction de l'explosif condensé se propage sans apport d'oxygène pris du milieu ambiant, elle se définit comme étant la décomposition chimique auto propulsive et rapide produisant une grande quantité de chaleur et de produits gazeux, on peut citer à titre d'exemple de l'explosion chimique : l'UVCE (acronyme de **U**nconfined **V**apor **C**loud **E**xplosion) [6]

c- Description du phénomène d'un UVCE

Un UVCE est une explosion d'un gaz à l'air libre. Il comprend généralement les étapes suivantes:

- Rejet dans l'atmosphère d'un liquide inflammable volatile avec ou sans aérosol.

- Phase d'évaporation naturelle de la nappe liquide épanchée.
- Mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable, de manière concomitante, la dilution et le transport du nuage de vapeur avec ou sans aérosol dont une partie du volume reste inflammable.
- En présence d'une source d'allumage, amorce de l'inflammation du nuage.
- Propagation d'un front de flamme dans les parties inflammables du nuage. Ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit de la manière d'un piston sur le mélange de combustible environnant, et peut être à l'origine de la formation d'une onde de surpression aérienne.
- Enfin, la chaleur dégagée va changer la proportionnalité du mélange air – combustible, et entraîne à la combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour devenir inflammables. [6]

D'une manière générale, le terme UVCE s'applique lorsque des effets de surpression sont observés, alors que le terme Flash fire est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de surpression.

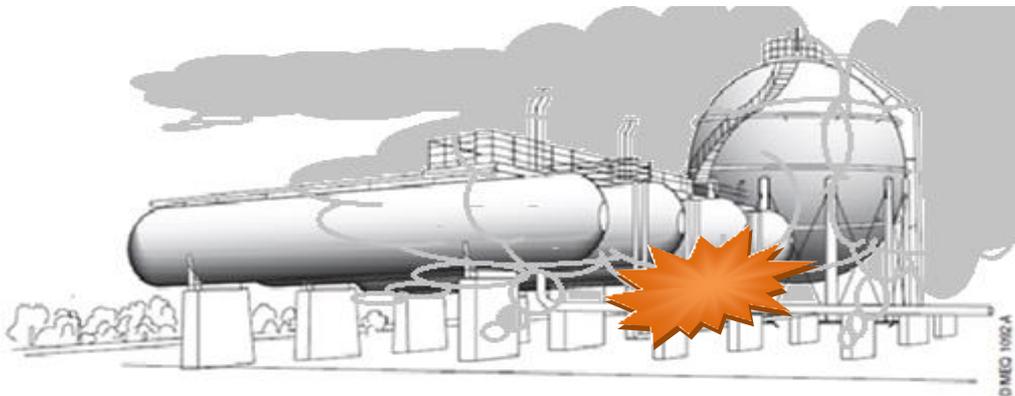


Figure 16 : scénario d'un UVCE

2.3.2. Explosion physique

L'explosion physique n'est pas caractérisée comme étant une combustion, en faisant élever la pression d'un espace confiné jusqu'à un point de rupture de l'enceinte. Elle est due à l'ouverture brutale d'un récipient contenant un fluide sous pression, à la vaporisation quasi instantanée d'un liquide, on cite pour cela, le BLEVE (acronyme de **B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apour **E**xplosion), En effet, le BLEVE est associé avant tout à un changement

d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour parler de BLEVE.

"Un BLEVE est causé par la ruine complète d'un réservoir pressurisé contenant un liquide dont la température est très supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique" . [4]

Ce scénario est le plus dangereux dans l'analyse des risques traitée dans le chapitre II.

III.2.4. Description du phénomène d'un BLEVE

2.4.1. Définition:

Le BLEVE peut être défini comme étant la vaporisation violente à caractère explosif, consécutive à une rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température largement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.

Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE.

2.4.2. Causes possibles d'un BLEVE :

Les principales causes d'un BLEVE qui ont été identifiées, dont deux sont liées à des agressions externes :

- Agression mécanique :** Un réservoir ayant subi une corrosion est moins résistant qu'un réservoir neuf, il suffit que la température excède les 35°C pour que la corrosion s'installe.
- Agression thermique :** le feu de torche, le feu de nappe ou la hausse de la température durant l'été peuvent être la cause d'un "BLEVE" .
- Sur -remplissage du réservoir.**

2.4.3. Produits concernés par le BLEVE :

On cite les gaz liquéfiés comme combustibles:

- Le GNL, le GPL, Le Propylène, Le Butène, l'acétylène, l'ammoniac, le Chlorure de Vinyle, l'oxyde de Propylène....

Par ailleurs, il y figure les gaz liquéfiés non combustibles :

- Le dioxyde de carbone, l'azote, le chlore, l'hélium. [4]

2.4.4. Equipements concernés par le BLEVE :

Le BLEVE touche les équipements à l'air libre contenant des gaz liquéfiés sous pression.

On peut en citer les équipements suivants:

- Stockages Fixes : Cigares, sphères.
- Engins de Transport : Camions Citernes, Wagons, Navires.
- Autres : Chaudières. Tuyauteries. Bouteilles de gaz...

2.4.5. Les types des BLEVEs :

a- BLEVE Froid: Le BLEVE se produit avec un réservoir qui contient un liquide sous pression,

Le BLEVE froid survient quand le réservoir qui contient le liquide se rompt à cause d'un choc, à une mauvaise manipulation, ou à une fragilisation.



Figure 17 : - Chronologie d'un BLEVE froid

Lorsqu'une fissure est créée, la pression de l'air au contact de la fissure, qui était initialement à la pression atmosphérique, passe brusquement à la pression de service du réservoir, le gaz s'échappe par cette fissure, sous la forme d'un jet. La pression baisse donc rapidement dans le réservoir, le liquide se met à bouillir sous l'effet de la chute de pression, il se transforme rapidement en gaz, et la pression augmente de manière très importante dans le réservoir. Cette pressurisation catastrophique provoque la propagation de la fissure puis la rupture totale du réservoir avec une onde de surpression, connue par le BLEVE froid [4].

b- BLEVE Chaud

Dans ce cas, la rupture du réservoir est la conséquence d'un incendie enveloppant le réservoir de stockage, ce dernier est exposé au flux thermique d'un incendie, il se produit une augmentation de la pression intérieure du réservoir et une diminution de la phase liquide (par ébullition).



Figure 18 : Le mécanisme de formation du BLEVE chaud dû à un feu externe
(Référence : Daniel A. Crowl "Understanding explosions", CCPS Publication, 2003)

De plus la résistance du réservoir diminue (à 400°C, l'acier perd 30% de sa résistance à 700°C, il perd 90% de sa résistance), Ainsi, la rupture initiale se produit généralement sur la partie du réservoir en contact avec la couche gazeuse. En effet, cette partie est susceptible de s'échauffer plus rapidement que la partie du réservoir en contact avec le liquide et les propriétés mécaniques de l'enveloppe s'y dégradent donc d' autant plus vite.

Lorsque la pression intérieure est supérieure à ce que peut supporter le réservoir, le contenant se rompt et une fissure se crée. Au niveau de cette fissure, la pression de l'air, qui était à la pression atmosphérique, passe brusquement à la pression de service du réservoir, il y a donc une première onde de surpression, provoquant une détonation.

Puis, le gaz s'échappe par cette fissure, sous la forme d'un jet. La pression baisse donc rapidement dans le réservoir, le liquide se met à bouillir violemment, non pas sous l'effet de la chaleur, mais sous l'effet de la chute de pression, il se transforme rapidement en gaz, et la pression augmente de manière très importante dans le réservoir. Par ailleurs, le jet de gaz peut entraîner des gouttelettes (aérosol), qui viennent gêner l'échappement du gaz et contribuent ainsi à la montée de la pression. Cette repressurisation catastrophique provoque la propagation de la fissure puis la rupture totale du réservoir avec une deuxième onde de surpression (bien plus importante que la première) et la projection

d'éclats métalliques. Le gaz est libéré et se mélange avec l'air, s'il s'agit d'un gaz inflammable, il peut provoquer la formation d'une boule de feu.

2.4.6. les effets du BLEVE :

- Effets de surpression: propagation d'une onde de surpression,
- Effets missiles : projection de fragments à des distances parfois très importantes,
- Effets thermique : rayonnements thermiques engendrés par la boule de feu.

Les effets générés par un BLEVE sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a eu lieu :

a- Paramètres propres au mélange :

- Réactivité du mélange (vitesse de combustion, taux d'expansion).
- Gradient de la concentration et d'homogénéité.
- Turbulence propre du rejet.

b- Paramètres propres à l'environnement:

- Source d'inflammation (position par rapport au nuage de la source d'énergie).
- Encombrement (nombre, position, taille des obstacles).
- Confinement partiel.

III .3 .Modélisation des effets de surpression :

La caractérisation d'un phénomène d'explosion des gaz d'hydrocarbures requiert la connaissance des éléments suivants:

a- Caractérisation du terme source

✓ **Initial :**

- Brèche sur l'équipement
- Substance, ou mélange de substances, libérée(s) à l'atmosphère
- Conditions opératoires (température, pression)

✓ **Secondaire :**

- Nappe de liquide formée en rétention.

b- Conditions de formation d'un nuage inflammable par mélange avec l'oxygène sont
Induites par :

- l'émission d'une phase liquide à la brèche avec génération éventuelle d'aérosol,
- la vaporisation de la nappe liquide formée, selon la caractérisation physico-chimique du produit et des conditions ambiantes.

c- Dispersion atmosphérique :

- Conditions météorologiques
- Détermination des contours physiques du nuage
- Détermination du volume inflammable

d- Inflammation du nuage :

- Propagation d'une flamme à travers les parties du nuage où la concentration se situe à l'intérieur du domaine d'inflammabilité.
- Accélération possible de la flamme sous l'effet de la turbulence (turbulence atmosphérique, turbulence due au jet, turbulence engendrée par le sillage des obstacles), des gradients de concentration et des instabilités naturelles de la flamme qui se développent à grande échelle.
- Mélange et combustion des zones plus riches en combustible.

e- Caractérisation des effets :

- Rayonnement thermique induit par la combustion du nuage
- Si la combustion est suffisamment rapide, il va y'avoir une production d'une onde de surpression aérienne.

Il existe plusieurs modèles de calcul des effets de surpressions aériennes, les plus largement utilisés sont les suivants:

- ✓ Modèle de l'équivalent TNT.
- ✓ Modèle Multi-énergie ou TNO.
- ✓ Modèle de Strehlow-Baker.
- ✓ Modèle CAM (Congestion Assessment Model), proposée par Shell.
- ✓ Modèle CFD (Computational Fluid Mechanics)

On se limite dans le présent travail, à une approche selon les trois premiers modèles.

III.3. 1. Application du Modèle de l'équivalent TNT.

3. 1. 1. description :

Selon cette méthode, la puissance de l'explosion du nuage de vapeur équivaut à une masse équivalente de TNT (trinitrotoluène) qui produirait la même force de l'explosion. La surpression est donnée par l'expression analytique suivante : [6]

$$P_s = \frac{80\ 800 \left(1 + \left[\frac{Z}{4.5} \right]^2 \right)}{\sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.048} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{0.32} \right]^2} \sqrt{1 + \left[\frac{Z}{1.35} \right]^2}} \quad (1)$$

On évalue la masse du gaz inflammable dans le nuage M_G avec des concentrations entre les limites d'explosivité, afin de faire ressortir la valeur la équivalente de TNT (M_{TNT}) donnée par la relation suivante :

$$M_{TNT} = \frac{f_E \Delta H_c M_G}{\Delta H_{TNT}} \quad (2)$$

Le calcul de la distance réduite Z qui est donné en fonction de la distance du centre de l'explosion (x) et M_{TNT} par :

$$Z = \frac{x}{M_{TNT}^{1/3}} \quad (3)$$

Par mesure de sécurité, la sphère doit être remplie à 80%

Pour un volume: $V_{\text{sphères}} = 2000 \text{ m}^3$, correspondant à une masse volumique

$$\rho_{\text{butane liquide}} = 580 \text{ kg/m}^3$$

On obtient alors une masse totale du butane à l'état liquide de :

$$M_T = 928000 \text{ kg}$$

Le retour d'expérience et les enquêtes réalisées sur les effets des accidents d'explosion survenus, montrent que généralement ce n'est pas toute la masse qui participe à l'explosion, Pour cela, la masse à considérer pour la suite de la modélisation est celle que le nuage qui aurait atteint dans son expansion les limites de l'explosivité, suivant les conditions.

stœchiométriques. on peut estimer selon le retour d'expérience, que seulement le $(1/50)^{\text{ème}}$ de la masse totale qui est concerné par l'explosion, soit:

$$M_G = 18560 \text{ kg}$$

3.1.2. Calcul de la masse équivalente en TNT :

Pour les données suivantes : $\Delta H_{\text{TNT}} = 4\,760 \text{ kJ/kg}$ et $\Delta H_{\text{c (butane)}} = 45\,700 \text{ kJ/kg}$

En prenant $f_E = 0.05$, on déduit :

$$M_{\text{TNT}} = 8909 \text{ kg}$$

3.1.4. Calcul de la surpression P_s en fonction des distances x

les valeurs de P_s (en bar) sont calculées soit par l'expression analytique donnée précédemment, ou en utilisant le diagramme empirique de Brasie et de Simpson



Figure 19 : Abaque du modèle de l'équivalent TNT

Tableau 15 : Variation de la surpression P_s en fonction des distances x (selon l'abaque)

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Modèle TNT | x (m) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| | * P_s (bar) | 1.3 | 0.31 | 0.10 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |

Tableau 16 : Variation de la surpression P_s en fonction des distances x (résultats analytiques)

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------|-----|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Modèle TNT | x (m) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| | ** P_s (bar) | 1.2 | 0.27 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.025 | 0.02 | 0.019 | 0.018 | 0.016 | 0.015 |

Tableau 17 : Comparaison entre les deux méthodes de calcul (modèle TNT)

** à l'aide de l'abaque / * à l'aide de la formule analytique

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Modèle TNT | x (m) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| | z | 2.45 | 4.82 | 9.65 | 14.47 | 19.29 | 24.12 | 28.94 | 33.77 | 38.59 | 43.41 | 48.24 |
| | * P_s (bar) | 1.3 | 0.31 | 0.10 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| | ** P_s (bar) | 1.2 | 0.27 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.025 | 0.02 | 0.019 | 0.018 | 0.016 | 0.015 |

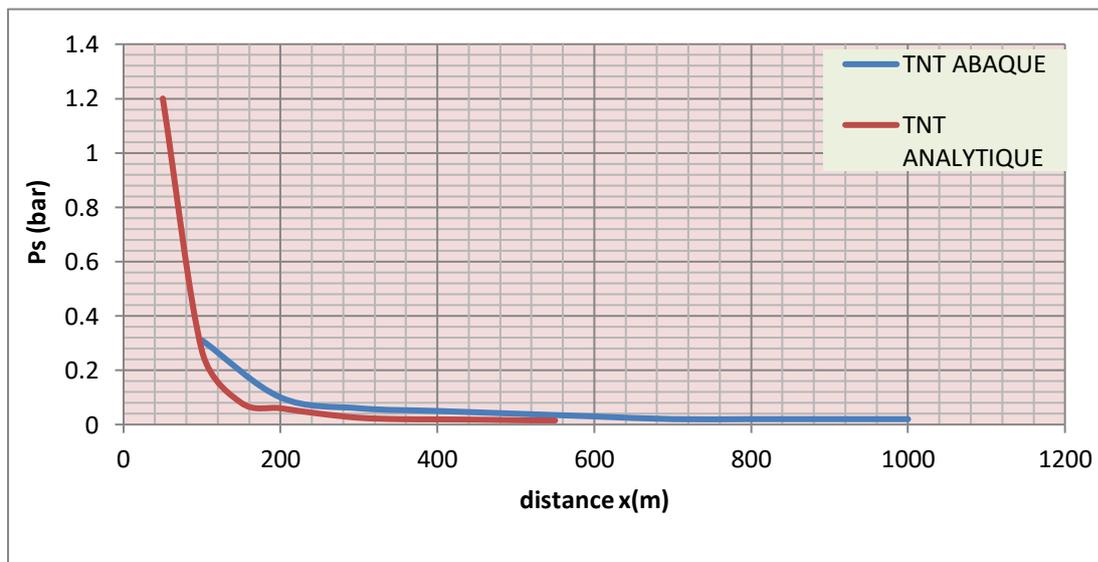


Figure 20 : variation de la surpression P_s en fonction des distances x (modèle de l'équivalent TNT)

3.1.5. Interprétation :

- on observe que les deux courbes représentées sur la figure 20, sont plus ou moins superposées et présentent pour les deux cas une atténuation très rapide, qui ne vérifie pas les lois physiques.

- vu la simplicité de la méthode TNT, on ne peut l'utiliser qu'à des distances très proches du centre de l'explosion, par contre, elle n'est pas fidèle pour des distances plus ou moins éloignées du centre de l'explosion.

III. 3. 2. Application du modèle multi-énergie (Modèle TNO)

L'hypothèse la plus importante de la méthode est que la force de l'explosion, à travers la surpression développée, dépend de la disposition de l'espace où le nuage se propage. Plus précisément, seules les régions obstruées ou partiellement obstruées (régions à haute densité d'équipement) contribueront à une explosion à haute intensité. Les parties restantes du nuage brûleront lentement, sans aucune incidence sur la force de l'explosion. [6]

Initialement, les dimensions du nuage sur la base de la quantité de gaz inflammable propagée doivent être estimées, et les sources probables d'explosion doivent être identifiées.

3.2. 1. Estimation des dimensions du nuage

En considérant la même masse du produit inflammable calculée dans le modèle TNT, La masse volumique à l'état gazeuse du butane est de 2.44 kg/m³ (15°C, 0.1 MPa).

Par conséquent, le volume de butane dans le nuage peut être estimé à :

$$V_{\text{butane gaz}} = 7606 \text{ m}^3.$$

La réaction de la combustion du butane est donnée par:



Par conséquent, le rapport butane -oxygène est de 2/13 et le rapport (air - O₂) est de 1/5, ce qui conduit à un rapport (butane- air) de 2/65.

Ce qui nous permet d'estimer le volume du nuage à :

$$V_{\text{nuage}} = 247195 \text{ m}^3$$

Soit un rayon R du nuage en forme hémisphérique :

$$R = 47.18 \text{ m}$$

Ce rayon détermine les zones où le nuage se dispersera.

b- Vérification des conditions d'application pour avoir un encombrement conforme de la zone :

On montre dans les figures 21 et 22, les dispositions et les côtes tout autour de la sphère :



Figure 21 : Photo réelle des équipements de stockage GPL du centre 191

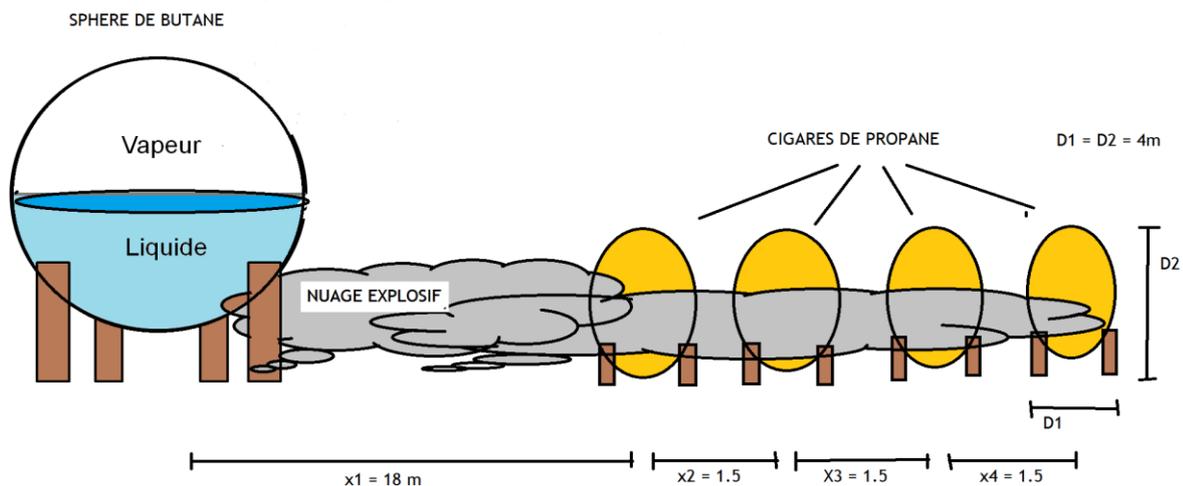


Figure 22 :Distribution des équipement considérés comme obstacles par à port au nuage explosif

La procédure de mise en place d'une zone encombrée est basée sur l'effet des obstacles sur la génération de la turbulence dans le flux d'expansion de la flamme. L'espace autour du centre de l'explosion est séparé en régions obstruées et non obstruées. Le nuage ne peut se propager que dans l'espace libre de chaque zone obstruée. Une zone encombrée est une région de haute densité d'obstacles (équipement, murs, bâtiments, etc.), permettant à la force de l'explosion de devenir très importante.

Deux règles empiriques ont été proposées par Berg, la distance X (m), représente la distance entre chaque nouvel objet et son précédent, et doit satisfaire aux deux conditions suivantes:

$$\text{a) } X < 25 \text{ m}$$

$$\text{b) } X < 10 D_1 \quad \text{ou} \quad X < 1.5 D_2$$

Vérification des conditions de l'encombrement de l'installation:

- Pour l'obstacle 1 (cigare 1) :

$$x = 12 < 25 \text{ m (valable)}$$

$$x = 12 < 10 D_1 = (10 \times 4) = 40 \text{ (valable)} \quad \text{ou} \quad x = 3 < (1.5 \times D_2 = 1.5 \times 4 = 6) \text{ (valable).}$$

- Pour l'obstacle 2 (cigare 2) :

$$x = 1.5 < 25 \text{ m (valable)}$$

$$x = 1.5 < 10 D_1 = (10 \times 4 = 40) \text{ (valable)} \quad \text{ou} \quad 1.5 < (1.5 D_2 = 1.5 \times 4 = 6) \text{ (valable).}$$

- Pour l'obstacle 3 (cigare 3):

$$x = 5 < 25 \text{ m (valable)}$$

$$x = 1.5 < 10 D_1 = (10 \times 4 = 40) \text{ (valable)} \quad \text{ou} \quad 1.5 < (1.5 D_2 = 1.5 \times 4 = 6) \text{ (valable).}$$

- Pour l'obstacle 4 (cigare 4):

$$x = 1.5 < 25 \text{ m (valable)}$$

$$x = 1.5 < 10 D_1 = (10 \times 4 = 40) \text{ (valable)} \quad \text{ou} \quad 1.5 < (1.5 D_2 = 1.5 \times 4 = 6) \text{ (valable).}$$

On déduit ce qui suit :

- tous les équipements représentés sur la figure 22 sont entourés par le nuage
- Il participe donc en la détermination des régions obstruées,

Pour qu'un nouvel objet fasse partie d'une zone encombrée, sa distance par rapport à la précédente doit satisfaire aux conditions suscitées.

3.2. 2. Calcul de la Puissance de l'explosion et surpression

Dans le diagramme de la figure 23, on donne la surpression relative en fonction de la distance adimensionnelle r' . Ces deux quantités sont définies comme suit :

$$r' = x \left(\frac{E}{P_a} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

$$P_s' = \frac{P_s}{P_a} \quad (5)$$

- Ou :
- P_a : est la pression ambiante en (MPa) = 0,1 MPa = 100 KPa
 - x : est la distance du centre de l'explosion en m,
 - E : représente l'énergie totale libérée par l'explosion en MJ.

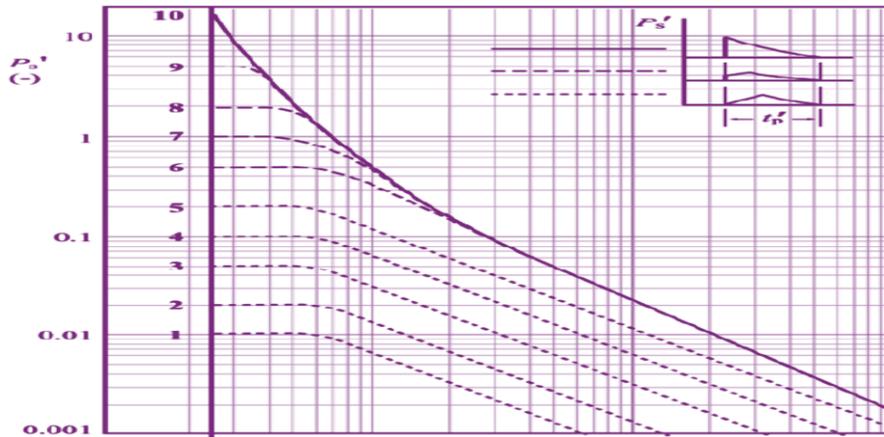


Figure 23 : Surpression adimensionnelle en fonction de la distance adimensionnelle, avec un paramètre (valeurs de 1 à 10) représentant le coefficient de la puissance de l'explosion

3.2. 3 Calcul de la surpression:

- Pour chaque région (encombrée ou non) la puissance de l'explosion est choisie (une forte densité d'obstacle se traduira par une explosion de grande intensité).
- On calcule l'énergie totale E , libérée lors de l'explosion dans cette région,
- Pour une distance spécifique x , on calcule la distance adimensionnelle r' ,
- A partir de la courbe présentée sur la figure 23, on obtient la surpression, P_s (MPa), produite par l'explosion.

L'énergie totale E de l'explosion est calculée

$$E = V_{\text{nuage}} [\Delta H_{\text{c but}} \times \rho_{\text{but gaz}} \times (2/65)] \quad (6)$$

Soit :

$E = 848129848 \text{ KJ}$

On présente les résultats à différentes positions sur le tableau 18 et la figure 24

Tableau 18 : variation des puissances de pression P_s en fonction des distances x (à l'aide du modèle multi énergie TNO)

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| TNO | x (m) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| | r' | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 1.5 | 2.00 | 2.5 | 3.00 | 3.5 | 4.00 | 4.5 | 5.00 |
| | P_s (bar) | 1,1 | 1 | 0,5 | 0,3 | 0,16 | 0,13 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |

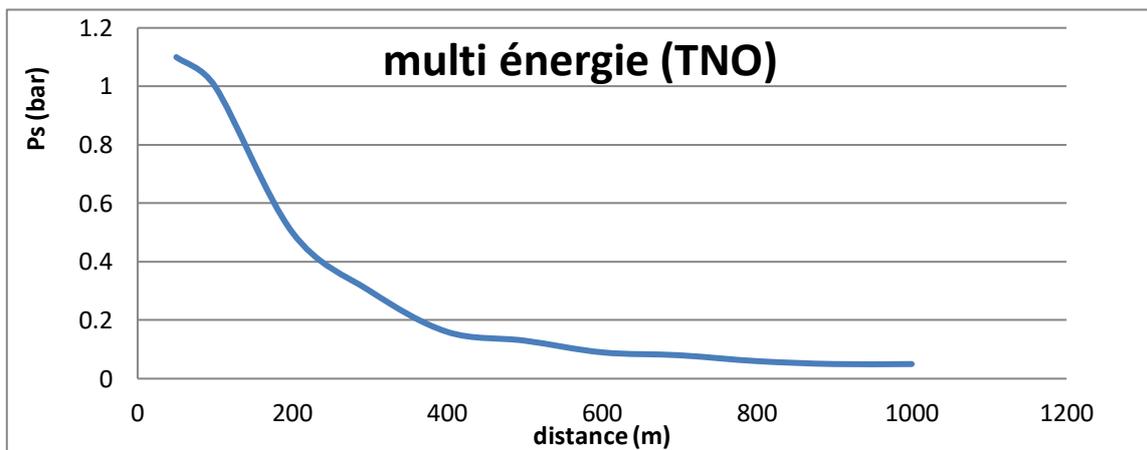


Figure 24 : Variation de la surpression P_s en fonction des distances x (modèle multi-énergie (TNO))

3.2. 4. Interprétation des résultats

Il apparaît clairement que ce modèle est plus explicite et vérifie bien l'atténuation dégressive physique.

III.3.2. Application du modèle Strehlow-Baker

2.1. Description du modèle

Le modèle de Baker-Strehlow a été publié pour la première fois en 1996. Il est basé sur la même idée de régions encombrées qui ont été initialement proposée par le modèle Multi-Energie. Dans ces deux modèles, la présence d'obstacles dans l'expansion de la flamme provoque des explosions de nuage de vapeur d'une intensité élevée. Dans le modèle Multi-Energie, les régions encombrées sont déterminées. Dans ces régions, l'explosion est d'une intensité plus élevée, et est caractérisée par le coefficient de souffle de l'explosion. Dans le

modèle de Baker-Strehlow, le paramètre important dans le choix de la puissance de l'explosion est la vitesse de propagation de la flamme. Elle est déterminée par :

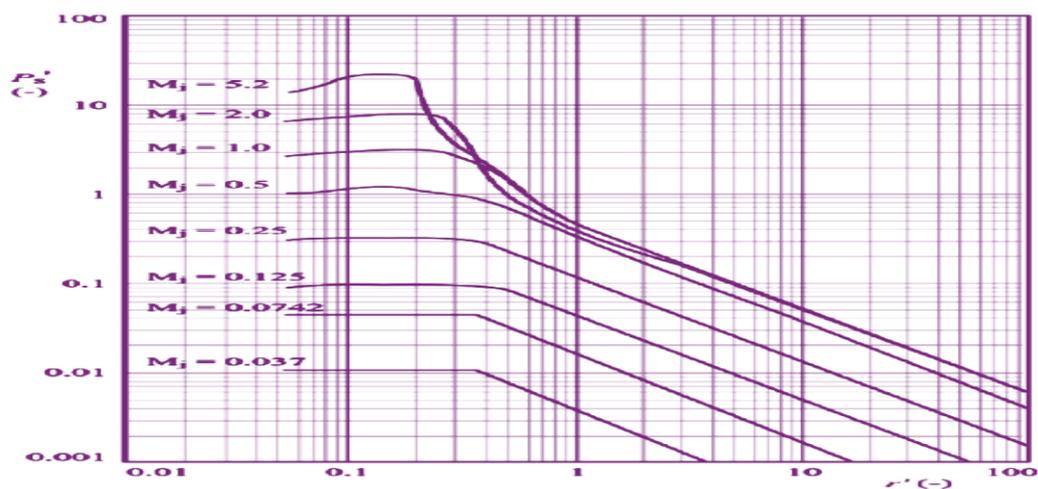
- La manière dont le front de flamme se propage, la réactivité du carburant, et la densité des obstacles.

a- Vitesse de la flamme

- la vitesse de la flamme est le paramètre le plus important dans la détermination de la puissance de l'explosion.
- La présence d'obstacles à l'expansion de la flamme produit de gros tourbillons turbulents
- La surface augmentée nécessite une consommation de carburant plus élevée par unité de temps et, par conséquent, la vitesse de la chaleur émise est augmentée et par conséquent la vitesse du front de la flamme.

| Expansion de la flamme | Réactivité du carburant | Densité des obstacles | | |
|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|--------|
| | | Élevée | Moyenne | Faible |
| 1-D | Élevée | 5.2 | 5.2 | 5.2 |
| | Moyenne | 2.27 | 1.77 | 1.03 |
| | Faible | 2.27 | 1.03 | 0.294 |
| 2-D | Élevée | 1.77 | 1.03 | 0.588 |
| | Moyenne | 1.24 | 0.662 | 0.118 |
| | Faible | 0.662 | 0.471 | 0.079 |
| 3-D | Élevée | 0.588 | 0.153 | 0.071 |
| | Moyenne | 0.206 | 0.100 | 0.037 |
| | Faible | 0.147 | 0.100 | 0.037 |

Tableau 19 : Vitesse de la flamme, en nombre de Mach



b-Puissance de surpression de l'explosion

Dans cette approche, le diagramme du modèle, illustré à la figure 25 , sera utilisé, en raison de sa simplicité.

2.2. Estimation de la surpression P_s en fonction de la distance x du centre du nuage à l'aide du modèle de Baker-Strehlow : [6]

Dans notre cas le butane sera considéré comme un combustible à haute réactivité. L'expansion de la flamme dans ce cas peut être considérée comme une propagation à 2-D, car la disposition des réservoirs de stockage facilitera un tel type d'expansion, et la densité du butane est supérieure à celle de l'air, on considère les deux variantes suivantes:

- a- Dans une densité moyenne des obstacles : $M_j = 0,662$
- b- Dans une densité importante des obstacles: $M_j = 1.03$

à partir de l'abaque du modèle de Baker – Strehlow, les résultats sont présentés dans le tableau 20.

tableau 20 : Représentation des résultats de P_s (puissance de pression) en fonction de la distance x à l'aide de l'abaque de baker-strehlow

** une densité moyenne des obstacles / ** une densité importantes des obstacles*

| BAKER STREHLOW | x (m) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|-------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | r' | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 1.5 | 2.00 | 2.5 | 3.00 | 3.5 | 4.00 | 4.5 | 5.00 |
| | P_s * | 1,1 | 0,70 | 0,32 | 0,22 | 0,19 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,019 | 0,018 | 0,017 |
| | P_s ** | 2.95 | 1.00 | 0.5 | 0.35 | 0.25 | 0.2 | 0.18 | 0.15 | 0.12 | 0.10 | 0.19 |

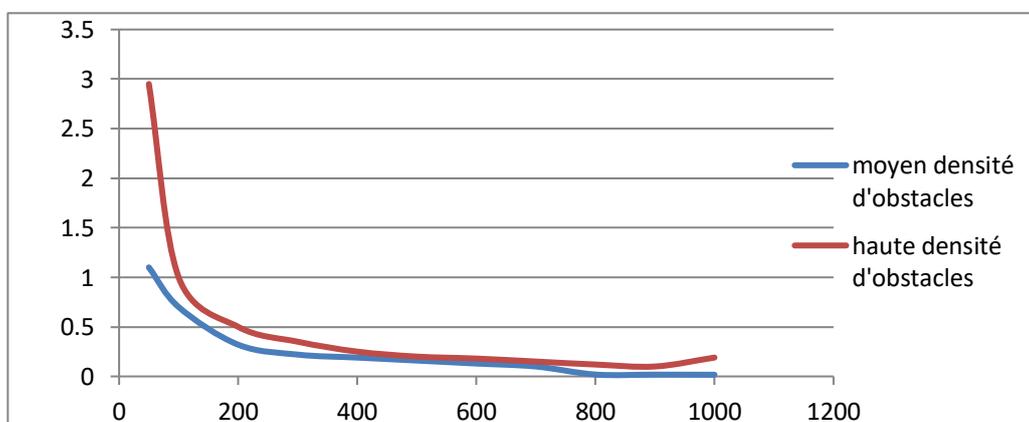


Figure 26 : Variation de la surpression P_s en fonction des distances x (modèle baker-strehlow)

2.3. Interprétation :

- d'une façon identique, à ce qui a été dit pour la configuration TNO, on observe une atténuation progressive, conforme à l'évolution physique.
- Une légère comparaison entre les deux configurations, fait apparaitre clairement la forte surpression au voisinage du centre (à $x = 50$ m) de l'explosion dans le cas d'une densité des obstacles importante (p_s proche de 3 bar) par rapport au cas d'une densité moyenne ($p_s = 1.1$ bar)

2.4. comparaison entre les trois modèles

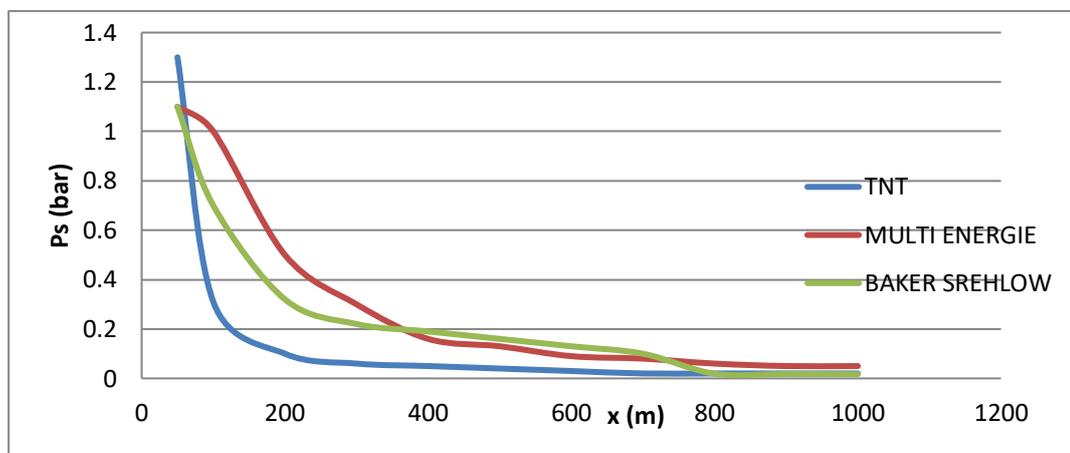


Figure 27 : comparaison entre les trois modèles

La décroissance ou l'atténuation progressive des valeurs de la surpression P_s en fonction de la distance x dans le modèle de baker –strehlow pour une densité moyenne des obstacles, est très proches de celle du modèle TNO et sont conforme à la dégression physique, par contre les valeurs présentées dans le modèle de l'équivalent TNT présentent une forte dégression.

III. 4. Simulation et modélisation à l'aide du logiciel PHAST

Après avoir calculé les différentes distances des effets thermiques et de surpressions d'un BLEVE à partir de modèles mathématiques, nous allons utiliser le logiciel PHAST dédié à ce genre de phénomènes (BLEVE)

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel utilisé pour évaluer les situations présentant des risques potentiels pour le personnel, les installations et

l'environnement, et pour mesurer la gravité de ces situations. Il a été développé par DNV Software, reconnu comme le leader mondial dans le domaine de l'évaluation de risques et des accidents industriels majeurs, il est aussi un précieux outil d'aide à la décision en matière de risque industriel et de sécurité publique.

PHAST examine la progression d'un incident potentiel de la fuite initiale à la dispersion en champ lointain, incluant la modélisation de l'explosion, des effets de l'inflammabilité, et de la toxicité [2]

III. 4. 1. Avantages de l'utilisation du logiciel PHAST:

- Faciliter l'élaboration et la mise en œuvre des évaluations des risques pour des fins d'études de danger ;
- Faciliter les études pour la réduction des coûts en termes de pertes et d'assurances ;
- Permettre l'optimisation de la conception du site et des procédés
- Aider l'industrie à se conformer à la législation ;
- Permettre à la détermination des niveaux de gravité en tenant compte des conséquences.
- améliorer la compréhension des dangers potentiels par les utilisateurs ;

Les mises à jour régulières du logiciel incorporent les expériences et les expertises les plus récentes dans l'industrie [2]

III. 4. 2. Résultats de la simulation en utilisant le logiciel PHAST

Nous avons simulé et modélisé les effets du phénomène de BLEVE sur la sphère de Butane, très proche de l'unité voisine de stockage des carburants (les bacs de stockage), cette dernière peut être la cible immédiate, et le siège des effets dominos importants conduisant à une catastrophe de grande importance.

La modélisation nécessite les paramètres suivants :

- Le volume ou la masse de GPL contenu dans la sphère ;
- La pression et la température de rupture de la sphère ;
- Les conditions météorologiques : la vitesse et direction de vent, la température de la région et l'humidité (contenue dans l'étude de danger du centre datée en 2014).

III. 4.3. Résultats obtenus à l'aide du logiciel PHAST

Les données nécessaires à la réalisation de cette simulation sont :

- Taux de remplissage à 80 % de Butane ;
- Une pression d'éclatement de 10 bar et une température de rupture de 50°C ;
- Vitesse de vent 10 m/s en direction nord est ;
- Température ambiante 25°C ;
- Humidité de 70%.

Les figures 28 et 29 montrent les distances caractéristiques des effets de surpression d'une explosion de la sphère : (modèle multi-énergie).

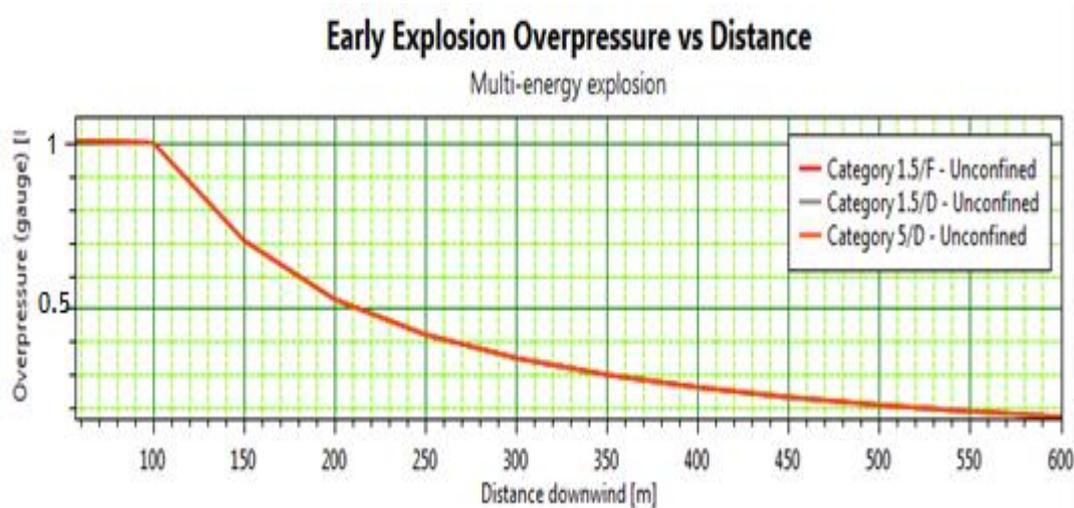


Figure 28 : Distances des effets de surpression d'une explosion sur la sphère – PHAST



Figure 29 : Zones des effets des surpressions d'une explosion de la sphère du butane au niveau de C119 El-Eulma

Les valeurs seuils retenues sont celles de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations soumises à autorisation.

*Tableau 21 : seuils des effets de surpression sur l'homme et sur les structures par rapport aux distances x de centre de l'explosion *m * conformément à l'arrêté français du 29/09/05*

| pression (bar) | Distance (m) | Effet sur l'homme | Effets sur les structures |
|-----------------------|---------------------|---|---|
| 0.020 | 1600 | Seuils des effets délimitant la zone des effets indirects par bris des vitres sur l'homme | Seuils des destructions significatives des vitres. |
| 0.050 | 700 | Seuils des effets irréversibles délimitant la zone de danger significatifs pour la vie humaine | Seuils des dégâts légers sur les structures |
| 0.140 | 300 | Seuils des effets létaux délimitant la zone de danger grave pour la vie humaine | Seuils des dégâts graves sur les structures |
| 0.200 | 200 | Seuils des effets létaux significatifs délimitant la zone de danger très grave pour la vie humaine | Seuils des effets domino |
| 0.300 | 150 | ----- | Seuils des dégâts très graves sur les structures |

Selon les figures et le tableau représentés, on remarque :

- Des dégâts très graves et des effets dominos sur les structures, qui sont le bloc administratif, les halls de stockage et de remplissage ainsi que les bacs de stockage des carburants du centre de distribution des carburants NAFTAL, situés à distance de 130 m, conduisant à des effets dominos tel que la destruction totale des bacs, le débordement des produits stockés, le déclenchement des nouveaux incendies et des explosions à répétition, ce qui devrait aggraver la situation,
- Des dégâts graves sur les structures de la station de service située à distance de 344m, et la RN 77, et d'autres établissements voisinages,

- A la distances de 500 m ou il existe un groupe d'habitations il y a des dangers significatifs pour la vie humaine et des dégâts légers sur les structures
- Les zones les plus éloignées tel que MECHTAT ELKHAMSA, se trouvant à distance de 1600 m ? Ou il y a des effets indirects par bris des vitres sur l'homme.



Figure 30 : positionnement des déférents cibles par à port au centre d'explosé

- conclusion

Les résultats obtenus des valeurs de surpression entre les différentes méthodes analytiques, tel que la méthode de l'équivalent TNT, la méthode de baker stehlow, la méthode multi- énergie et les résultats obtenues à l'aide du logiciel PHAST, montrent les mêmes ordres de grandeur.

En utilisant les outils informatiques à travers le logiciel (PHAST) dans le cas de la disponibilité ces moyens de calcul, très efficace, rapide, mais dans le cas de la non disponibilité de l'outil informatique ou de la licence de logiciel PHAST, le calcul analytique est le plus indiqué et permet à l'utilisateur une totale autonomie.

III.5. Modélisation des effets thermiques

:



Figure 31 : Boule de feu image réelle

III.5.1. Boule de feu :

Une boule de feu peut être le résultat d'une explosion des gaz inflammables sous pression. Généralement une boule de feu résulte de l'inflammation rapide, qui fait suite à un BLEVE, mais elle peut également apparaître pendant l'inflammation d'un mélange gazeux inflammable (UVCE).

La boule de feu peut émettre de très grandes quantités de chaleur radiative causant des dommages matériels, et des décès dans le voisinage immédiat de l'explosion de la boule de feu.

On peut observer lors de la constitution d'une boule de feu, ce qui suit:

- la formation d'une boule de feu ne dépend pas des conditions météorologiques en raison de la pression importante avec laquelle le gaz a été libéré.
- la durée de vie d'une boule de feu est très petite ou instantanée.
- le taux de combustion est égal à toute la quantité de la substance inflammable divisée par la durée du feu. [7]

Pour estimer la quantité de chaleur émise par la boule de feu, plusieurs modèles existent dans la littérature, des modèles purement empiriques et très simples, qui permettent de déterminer, à partir de la connaissance de la masse du produit contenue dans le réservoir.

III.5.2. Choix du modèle

Pour le calcul du flux de chaleur, la forme de la boule de feu est considérée comme sphérique. La méthode adoptée pour le calcul du flux thermique dans le cas d'une boule de feu suit les étapes suivantes :

- Calcul des dimensions et la durée de la boule de feu ainsi que le taux de combustion et à partir de ces paramètres on obtient le pouvoir émissif maximal de la flamme.
- Calcul de la densité du flux radiatif.

III.5.3. Dimensions et durée de la boule de feu

Les expressions utilisées pour le calcul des dimensions d'une boule de feu et sa durée sont des formules empiriques. Ces expressions sont basées sur la connaissance de la masse de la substance inflammable, M (kg). Cette masse est généralement obtenue à partir du volume initial du réservoir, V (m³), la fraction de ce volume qui est rempli de gaz pressurisé dans la phase liquide, f (-), et de la densité, ρ_{mat} (kg/m³), de la substance inflammable. Elle est donnée par :

$$M = f V \rho_{mat} \quad (7)$$

Soit :

| |
|------------------------|
| $M = 92800 \text{ Kg}$ |
|------------------------|

Les observations réelles des boules de feu montrent que pendant le premier tiers de la durée totale de la boule de feu, t_{max} (s), son diamètre, D (m), augmente jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur maximale, D_{max} (m). Durant le temps restant, la boule de feu prend la hauteur tandis que son diamètre reste constant.

5. 3.1. Diamètre maximal D_{max} et la durée totale, t_{max} de la boule de feu :

On dispose de deux méthodes empiriques pour calculer le diamètre maximum, D_{max} (m) et la durée totale, t_{max} (m), de la boule de feu

a- Méthode de Roberts : Selon Roberts (Roberts 1982), à partir des expressions empiriques suivantes :

$$D_{\max} = c_2 M^{1/3} \quad t_{\max} = c_3 M^{1/3} \quad (8)$$

Avec $C_2 = 5.8 \text{ sKg}^{1/3}$ et $C_3 = 0.45 \text{ sKg}^{1/3}$

b- Méthode TNO : TNO (TNO 2005) propose expressions empiriques suivantes :

$$D_{\max} = c_4 M^{0.325} \quad t_{\max} = c_5 M^{0.26} \quad (9)$$

Avec $C_4 = 6.48 \text{ sKg}^{-0.325}$ et $C_5 = 0.825 \text{ sKg}^{-0.26}$

Donc on peut choisir une des deux méthodes, pour calculer les dimensions de la boule de feu résultant de l' explosion de la sphère de stockage du butane (scenario du BLEVE au centre 191 El-Eulma), afin d'estimer le flux de chaleur reçu par une cible quelconque se trouvant à une distance X du centre de la boule de feu.

On choisit le modèle de Roberts, et on obtient:

$$D_{\max} = 252.76 \text{ m et } t_{\max} = 19.61 \text{ Sec}$$

. La hauteur maximale H_{\max} du centre de cette sphère qui s'élève du sol à une hauteur :

$$H = D_{\max} = 252.76 \text{ m}$$

5.3.2. Taux de combustion

Le taux de combustion, m' (kg/m²s), peut être calculé en fonction de la masse, M (kg), de la substance inflammable et de la durée totale de la boule de feu, t_{\max} (s), comme suit :

$$m' = \frac{M}{(0.888\pi D_{\max}^2) t_{\max}} \quad (10)$$

Soit :

$$m' = 0.670 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$$

5.3.3. Pouvoir émissif maximal de la flamme

Le pouvoir émissif maximal de la flamme, SEP_{\max} (kW/m²), peut être exprimé en fonction du taux de combustion, m' (kg/m²s) , de l'enthalpie de combustion complète, ΔH_c

$$SEP_{\max} = \chi_r m' \Delta H_c \quad (11)$$

(kJ/kg) et de la fraction radiative χ_r , comme suit :

$$\text{Tel que : } P_{sv} = 7 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Où : P_{sv} (Pa), est la pression de vapeur à l'intérieur du réservoir.

On obtient :

$$\chi_r = 0.03$$

$$SEP_{max} = 9185.7 \text{ kW/m}^2$$

5.3.4. Pouvoir émissif réel de la flamme

Dans le cas d'une boule de feu, on suppose qu'il n'y a pas assez de suie pour influencer le flux de chaleur radiatif. Par conséquent, on admet que :

$$SEP_{réel} = SEP_{max} = 9185.7 \text{ kW/m}^2$$

5.3.5. Densité de flux thermique radiatif

La densité du flux thermique radiatif, à une distance spécifique du centre de la boule de feu est donnée par :

$$\dot{q}_r'' = SEP_{réel} F_{12} \tau \quad (13)$$

ou : F_{12} représente le facteur de vue.

Dans ce cas, la forme de la boule de feu est considérée comme une sphère parfaite.

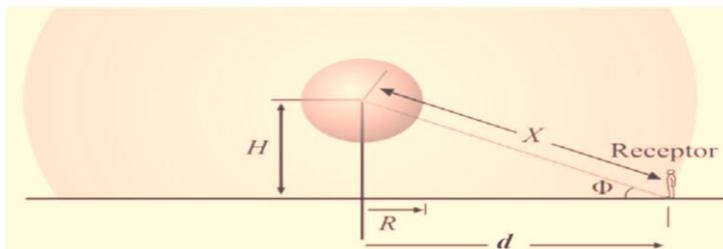


Figure 33 : schéma d'une Boule de feu

$$F_{12} = (R / X)^2 \quad (14)$$

$$\text{Avec } X = \sqrt{H^2 + d^2} \quad (15)$$

d : est la distance de la cibles par rapport au centre de la boule de feu.

τ : représente la transmissivité atmosphérique.

Pour le calcul de la transmissivité atmosphérique, τ on peut utiliser l'expression empirique suivante (Bagster & Pittblado 1989) :

$$\tau = c_7 [P_w (X - R)]^{-0.09} \quad (16)$$

Avec $c_7 = 2.02$

Et $R = H/2 = 126 \text{ m}$

On aura alors $F_{12} = 126 / \sqrt{(252)^2 + d^2}$

P_w (Pa) représente la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air tandis que X (m) est la distance séparant la cible du centre de la boule de feu

$$P_w = RH P_w^0 \quad (17)$$

La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air peut être calculée à partir de la pression de vapeur de saturation dans l'air P_w^0 , et l'humidité relative, RH.

P_w^0 du butane est inférieure ou égale à 101300 Pas à 15°C selon le tableau caractéristiques du GPL.

RH égale à 0.7 dans la région. Soit : $P_w = 70910 \text{ Pas}$

Ce qui conduit au calcul de la densité du flux thermique radiatif en fonction de la distance d :

$$q'' = 9185.7 \times \left(126 / \sqrt{(252.76^2 + d^2)} \right)^2 \times \left(2.02 \left[(70910) \times \left(\sqrt{(252.76^2 + d^2)} - 9.62 \right) \right]^{-0.09} \right)$$

Tableau 22 : Variation de densité de flux thermique reçus par une cible à une distance x par à port au centre de la boule de feu

| | | | | | |
|----------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| d (m) | 200 | 400 | 500 | 1000 | 1200 |
| q'' (kW/m ²) | 34 | 24 | 20 | 8 | 5 |

Les résultats de la variation de la densité du flux thermique reçu par une cible à une distance x sont représentés sur la figure 34

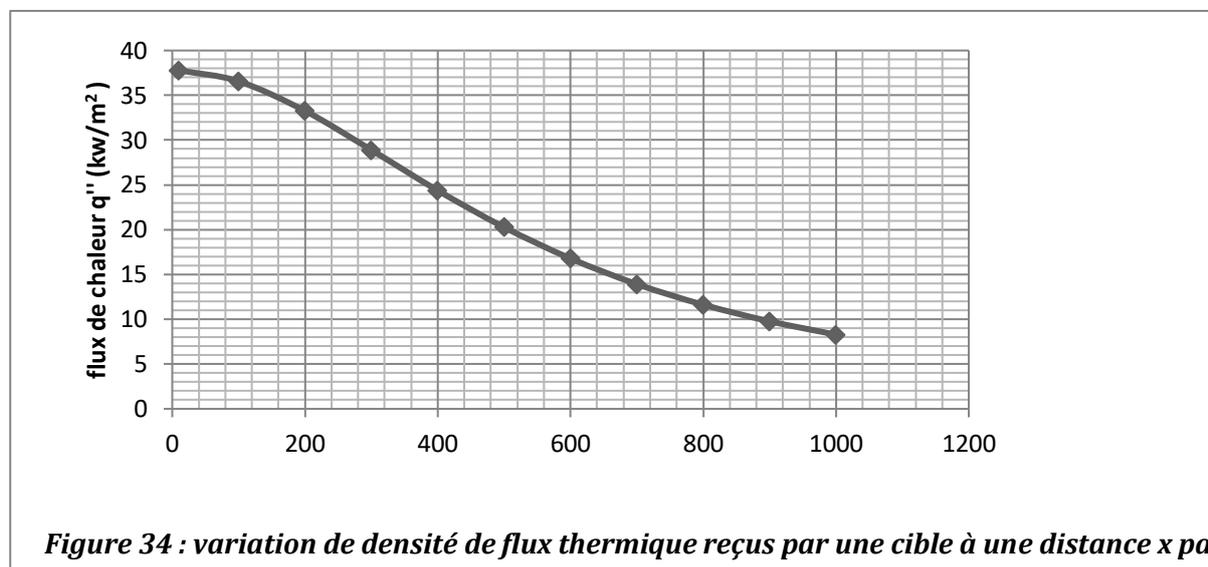


Figure 34 : variation de densité de flux thermique reçus par une cible à une distance x par à port au centr de la boule de feu

A partir des résultats obtenus de la répartition de la densité du flux thermique radiatif, et en tenant compte de l'arrêté portant sur les seuils des effets thermiques sur l'homme et sur les structures, on présente le tableau 23.

*Tableau 23 : seuils des thermiques sur l'homme et sur les structures par à porte au distances x de centre de l'explosion *m * conformément à l'arrêté français du 29/09/05*

| densité de flux thermique (kW/m²) | Distance (m) | Effet sur l'homme | Effets sur les structures |
|---|---------------------|---|--|
| 3 | 1300 | Seuils des effets irréversibles délimitant la zone de danger significatifs pour la vie humaine | |
| 5 | 1200 | Seuils des effets irréversibles délimitant la zone de danger significatifs pour la vie humaine | Seuils des destructions significatives des vitres. |
| 8 | 1000 | Seuils des effets létaux significatifs délimitant la zone de danger très grave pour la vie humaine | Seuils des effets domino correspondant au Seuils des dégâts graves sur les structures |
| 16 | 600 | | Seuils d'exposition prolongée des structures correspondant des dégâts très graves sur les |

| | | | |
|-----------|------------|-------|---|
| | | | structures |
| 20 | 500 | | Seuils de tenue de béton pendant plusieurs heurs et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton |

En conclusion, l'environnement immédiat de la sphère de stockage de GPL tel que les bacs de stockage des carburants, le bloc administratif, le hall de remplissage ne sont pas à l'abri du seuil de la tenue du béton, des effets dominos qui deviennent très graves et significatifs, pour cela la RN5 et le restaurant, sont exposées à des dangers graves sur l'homme et à des dégâts graves sur les structures,

La zone urbanisée, la mosquée, et les fermes , sont exposées à des dangers significatifs pour la vie humaine ainsi que des destructions significatives des vitres.

Chapitre IV : les Barrières de sécurité

Chapitre IV : les Barrières de sécurité

Après les résultats obtenus de l'analyse et de l'évaluation des risques, ainsi que la modélisation des effets, il faut maintenant définir quelles sont les mesures à mettre en place afin de réduire les risques considérés comme étant inacceptables ou, du moins, nécessitant une action correctrice. Ces mesures peuvent être techniques ou organisationnelles qui sont communément appelées barrières de sécurité

IV .1. Le concept de barrières de sécurité

La figure 34 représente le couple danger – récepteur. Dans cette représentation, un danger agit sur un récepteur avec une certaine fréquence (probabilité d'occurrence). Si l'exposition se produit réellement, cela pourrait engendrer des conséquences d'une gravité plus ou moins importante selon la situation. De cette image, le risque est qualifié par les deux notions de probabilité et de gravité. Pour éliminer ou réduire un risque, il existe trois grandes options possibles :

- Agir sur la source de la menace (le danger ou aléa).
- Mettre en place une barrière de protection entre le danger et le récepteur.
- Agir sur le récepteur en le sensibilisant afin qu'il résiste au danger (concept de résilience).

Le choix entre ces trois stratégies dépend des possibilités techniques disponibles, de leur facilité de mise en œuvre et de leurs coûts respectifs. [10]

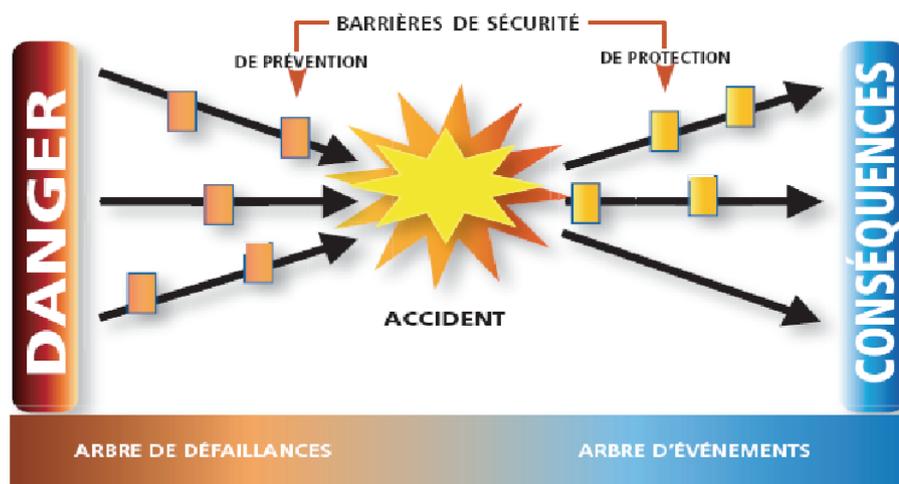


Figure34 : barrières schématisées avec l'approche nœud papillon.

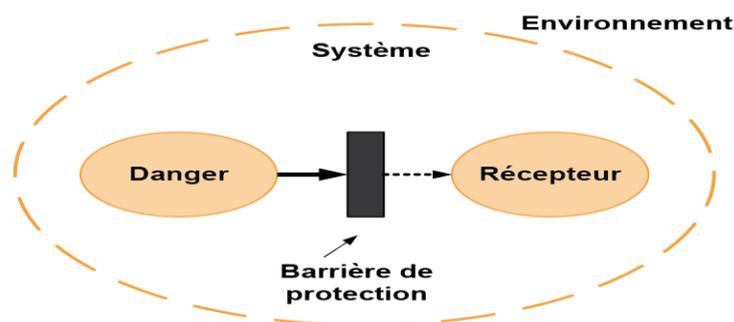
Une barrière de sécurité est définie comme étant : une procédure ou un élément matériel destiné à interrompre ou à modifier le scénario d'un accident de manière à en réduire soit la probabilité, soit les conséquences. Tel que mentionné précédemment, celles-ci peuvent être divisées en barrière de prévention, en barrières de protection, et en barrières d'interventions,

Exemples de barrières de prévention :

- Programme régulier d'entretien préventif des équipements
- Inspections (audits) sur le terrain des activités en cours
- Procédures d'exploitation détaillées
- Formation du personnel
- Politiques internes, visant l'instauration et le maintien d'une culture rigoureuse de sécurité et de gestion des risques
- Verrouillages automatiques, interrompant les équipements avant la survenance d'un accident si des conditions potentiellement dangereuses surviennent.

Exemples de barrières de protection :

- Appareils de détection avec alerte
- Mur de sécurité
- Bassin de rétention
- Gicleurs, rideau d'eau
- Exercices d'urgence
- Procédures d'évacuation
- Plan d'urgence
- Clôture et guérite (contrôle d'accès)



La figure 36 : représente le couple danger - récepteur

Le terme « Barrière de sécurité » regroupe les barrières techniques de sécurité et les barrières organisationnelles de sécurité. [10]

- **Barrière technique de sécurité**: un élément matériel, un dispositif de sécurité ou un système instrumenté de sécurité mis en place pour réduire la probabilité et ses conséquences.

- **Barrière organisationnelle de sécurité** : une activité humaine (opération ou procédure) qui s'oppose à l'enchaînement d'événements susceptibles d'aboutir à un accident (prévention) ou qui en diminue les conséquences (protection) .

IV. 2. Les actions préventives dans les sites industriels

La politique de prévention repose sur 4 piliers :

2.1. La maîtrise du risque à la source

L'exploitant doit démontrer qu'il maîtrise les risques. Il s'agit de limiter les accidents et l'importance de leurs conséquences sur leur environnement à travers un certain nombre d'outils :

- des études de dangers afin d'identifier les accidents les plus dangereux pouvant survenir ;
- des études d'impact afin de réduire au maximum les nuisances causées par le fonctionnement normal ;
- la formation des salariés pour leur participation à l'élaboration et la mise en œuvre de la politique de prévention des risques de l'établissement ;
- des exercices de sécurité civile afin de tester les Plan d'intervention Interne (PII) et les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) ;

2.2. La maîtrise de l'urbanisation

La maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels participe également à la réduction des risques en intervenant directement sur le facteur des enjeux, ou de leurs vulnérabilités. En effet, le développement, à proximité d'un site à risques, d'habitats, de structures éducatives, de loisirs ou de santé, d'infrastructures de transport ou d'activités économiques, expose des populations à un éventuel accident. Cette augmentation de présence humaine est susceptible d'accroître la gravité de l'accident. La connaissance des aléas technologiques est le préalable à toute politique de maîtrise de l'urbanisation. Ainsi, il incombe aux autorités en charge du contrôle des installations à risques d'informer les maires des communes concernées par ces risques pour que ces derniers **puissent prendre en compte** ces éléments dans les documents d'urbanisme (Plan d'Urbanisme Directeur par exemple),

mais aussi dans d'autres décisions qui relèvent de leur responsabilité (permis de construire, zones d'activités, etc.).

2.3. L'organisation des secours

En cas d'événement majeur, la population est avertie au moyen du signal national d'alerte, diffusée par les sirènes présentes sur les sites industriels classés Haut Risque Industriel (HRI).

Les secours s'organisent à partir des plans préalablement établis :

- Le Plan d'intervention Interne (PII) est spécifique à l'établissement concerné. Il est conçu par l'exploitant et il définit l'organisation interne en cas d'accident n'entraînant pas de conséquences graves au-delà des limites du site ;

2.4. Le Contrôle

Les services techniques concernés, interviennent sous l'autorité de chacune des communes, d'une part pour l'instruction des dossiers et l'analyse des études réalisées sur les installations à risques, et, d'autre part, pour le contrôle régulier de ces installations selon un programme pluriannuel définissant des thématiques d'inspection.

IV.3. Les consignes en cas d'accident

3.1. Actions collectives

En cas d'évènement majeur, la population est avertie au moyen du signal national d'alerte, diffusé par les sirènes présentes sur les sites industriels. Il se compose de trois séries successives de 1 minute chacune, espacées de 5 secondes. Un signal est également émis en fin d'alerte, en continu pendant 30 secondes. Le signal d'alerte peut être écouté sur le site : A noter que les sirènes sont testées le premier mercredi de chaque mois à midi.

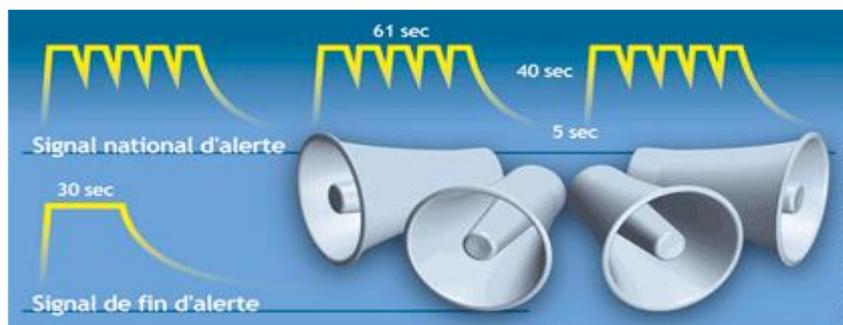


Figure 37: système d'alerte générale

L'alerte peut également être relayée par les radios ou la télévision afin de permettre aux populations de se tenir éloignées de la zone impactée par le sinistre. Dans certains cas, il est possible que l'évacuation sectorielle et temporaire soit décidée par le responsable des opérations de secours. L'information est transmise par la radio ou autre moyen tel que des véhicules équipés de haut-parleurs. La conduite à tenir est de garder son calme, ne pas fumer, de couper le gaz et l'électricité du domicile, de prendre ses papiers et de regagner le point de rassemblement indiqué.

3.2. Actions individuelles

L'insuffisance d'information des populations et un comportement non adéquat lors des situations accidentelles peuvent aggraver les conséquences d'un sinistre majeur. Des consignes et des réflexes simples de sécurité permettent de se protéger de ces conséquences.

a-Avant

- S'informer sur l'existence ou non d'un risque (car chaque citoyen a le devoir de s'informer)
- Estimer sa propre vulnérabilité par rapport au risque (distance par rapport à l'installation, nature des risques)
- Bien connaître le signal d'alerte pour le reconnaître le jour de la crise

b- Pendant (dès le signal d'alerte)

- Ne pas rester à l'extérieur ou dans son véhicule et rejoindre le bâtiment le plus proche. En cas d'impossibilité et si un nuage toxique vient dans votre direction, fuir selon un axe perpendiculaire au vent
 - Ecouter la radio et suivre les instructions
 - Ne pas chercher à rejoindre ses proches (ils se sont eux aussi protégés)
 - Ne pas téléphoner
 - Se laver en cas d'irritation et si possible se changer
 - Ne pas fumer ou allumer de flamme, car une explosion est possible et un nuage toxique n'est pas toujours détectable à l'odeur
 - Ne pas sortir avant le signal de fin d'alerte, sauf si ordre d'évacuation (rejoindre le point de regroupement) Si l'ordre donné est le confinement :
 - Boucher toutes les entrées d'air : portes, fenêtres, aérations ..., et arrêter la ventilation
- Si vous êtes témoin d'un accident :
- Donner l'alerte : 14 (pompiers), 17 (police),... en précisant si possible le lieu exact, la nature du sinistre (feu, fuite, nuage, explosion, etc.), le nombre de victimes
 - S'il y a des victimes, ne pas les déplacer (sauf nécessité absolue)

c- Apres (dès la fin de l'alerte)

- Ne pas se diriger vers le lieu du sinistre par simple curiosité
- Aérer les locaux dans lesquels vous vous êtes confinés

IV.4. Mesures de prévention et de protection contre les risques liés activités de stockage GPL

4.1. Généralités

- la prévention, visant à éviter l'occurrence d'une situation dégradée susceptible de conduire à une explosion, consiste en:

- a. Prévenir et limiter les fuites des produits inflammables stockés;
- b. Prévenir l'inflammation d'un éventuel atmosphère explosif susceptible d'être formé;

- les personnes doivent être informés que :

- ✓ De violentes explosions peuvent se produire à tout moment.
- ✓ Le risque d'explosion est présent tant que le produit n'a pas brûlé ou été inactivé.
- ✓ De gros débris peuvent être projetés loin du sinistre.
- ✓ Les nuages de vapeur se dirigent généralement vers le bas. Ils peuvent s'enflammer et exploser.

- La distance approximative de la source au seuil des blessures notables pour une bouteille de gaz butane, propane ou GPL de 13kg est de 52 m.

4.2. Prévention contre les fuites des produits inflammables:

Afin de prévenir et limiter les fuites des produits inflammables stockés, il y a lieu :

- de protéger les équipements susceptibles de contenir de tels produit contre :

- Les agressions mécaniques.
- La corrosion.
- Le gel.

- de mettre en œuvre des équipements sur dimensionnés par rapport aux contraintes d'utilisation

- De faire les contrôles périodiques règlementaires des appareils à pression de gaz et des appareils à pression de vapeur (APG et APV) tel que la sphère, les cages de stockage, les compresseurs, les extincteurs...

- disposer des détecteurs d'atmosphère explosive, en cas de détection, il convient de mettre l'installation en sécurité,

- de prévenir les sur-remplissages par la mise en œuvre de procédures et de détections de niveau haut et très haut redondées de manière indépendante entraînant automatiquement
- dans le cas échéant, la mise en sécurité des installations adéquats (fermeture des vannes, arrêt des pompes et compresseurs, ...).
- de prévenir les surpressions par des dispositifs limiteurs de pression et des détecteurs de pression haute, entraînant automatiquement la mise en sécurité des installations;

4.3. Prévention contre l'inflammation d'une atmosphère explosive :

Pour prévenir l'inflammation d'une éventuelle atmosphère explosive, il y a lieu :

- D'employer des matériels adaptés aux atmosphères explosives (ATEX), de soumettre les travaux par point chaud à la délivrance d'un permis de feu et à la mise en œuvre de toutes les précautions nécessaires;

IV.4. Conduite à tenir en cas d'un sinistre

Avant l'intervention En cas de sinistre, Les intervenants doivent être dotés par les moyens ou les équipements de protection individuels E. P. I tel que les casques, les gants, lunettes de sécurité, les bottes, les ARI ...etc ,et avec précaution :

- Établir un périmètre de sécurité adapté au risque et veiller à son respect (forces de l'ordre).
- Refroidir à l'aide d'eau pulvérisée en grande quantité et en priorité la partie du réservoir située au dessus du niveau du liquide (10 l/mn/m²).
- Ne pas utiliser de jet « bâton ».
- La tenue d'approche ne protège pas de l'effet missile.
- Toute structure non combustible peut servir d'écran.
- Les structures maçonnées n'offre qu'une faible protection contre les effets missiles.
- Il ne faut attaquer le feu que si les personnes ou les biens sont en danger.
- Si seuls les biens sont menacés, les actions en zone de danger sont à exclure (agir depuis l'extérieur de celle-ci tant que le réservoir n'a pas pu être convenablement refroidi).
- Les lances fixes ou fixées doivent être privilégiées.
- Lorsque le réservoir a été refroidi, procéder à l'extinction de l'incendie menaçant le réservoir.
- si celle-ci n'a pu être réalisée auparavant.
- Si le réservoir n'est pas déformé, le dégager lorsque l'approche de celui-ci devient possible sans danger.
- Ne jamais manipuler un réservoir sans l'avoir refroidi au préalable.

- Toute déformation volumétrique visible d'un réservoir doit être considérée comme un signe d'une explosion éminente.
- En cas de fuite enflammée, ne pas éteindre la flamme mais refroidir les parois du contenant.

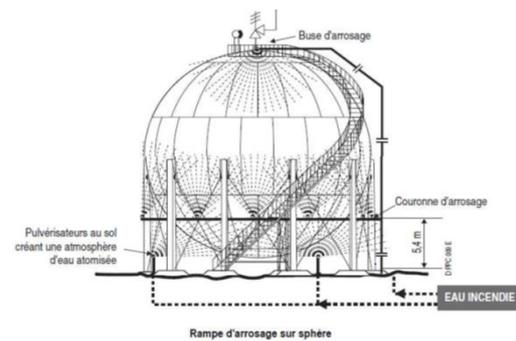
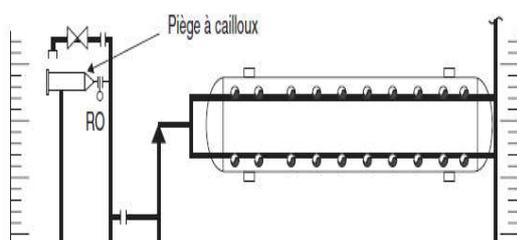


Figure 37 : Protection contre l'incendie : Rampe de pulvérisation d'eau

Conclusion générale

L'historique montre que toutes les installations gazières, peuvent provoquer des dangers très graves, avec une ampleur catastrophique sur l'homme et sur l'environnement.

Afin de répondre à cette problématique, ce travail a «été fait à travers un enchaînement logique, Dans un premier temps, on a présenté les informations nécessaires pour bien comprendre le fonctionnement du centre enfuteur (CE 191), par la suite, on a défini la méthodologie à suivre dans le but d'apporter des réponses. Le recensement et l'identification des risques liés à ce centre, consistent à choisir une méthode d'analyse pour arriver à une maîtrise efficace et économiquement raisonnable.

L'application de la méthode APR au centre CE191, nous a permis de recenser les types d'accidents possibles, leurs causes et leurs conséquences, mais d'une manière très générale, elle nécessite un niveau de description du système étudié plus détaillé, à l'aide d'une autre méthode appropriée tel que l' HAZOP, l'AMDEC , l'ADD....etc)

La modélisation des effets de la surpression, et les effets thermiques par plusieurs modèles analytiques, tel que (TNT, TNO , Baker Stehlow) et à l'aide du logiciel PHAST, nous a permis d'estimer les distances atteintes par les effets d'explosion sur l'environnement immédiat, sur l'homme et sur les structures aux alentours du centre CE191 El-Eulma ,et l'étude a montré que les installations au voisinage telles que, la route national, le groupe d'habitations ne sont pas à l'abri de dégât catastrophiques.

Le type des accidents liées à l'activité du GPL, qui sont généralement les explosions, nécessitent de mettre l'accent sur la prévention et notamment au niveau de la fiabilité des équipements et installations par des contrôles technique, tout en augmentant les barrières contre tout type de risques.

Nous pensons également, que dans le futur, il faudra compléter les études précédentes en recherchant de nouveaux scénarios de risque, de nouvelles méthodes que se soit techniques ou organisationnelles, et de nouvelles barrières en continuelle amélioration.

Il s'agit donc d'anticiper une réflexion, et de proposer à nos entreprises les moyens d'engager progressivement, une dynamique environnementale et managériale des risques, destinée à faire évoluer les mentalités, et à créer de nouveaux comportements, et une nouvelle culture d'entreprise.

Bibliographie :

- [1]- **La base ARIA** : « Analyse, Recherche et Information sur les Accidents »
(ARIA 6756) [1.1]. - (ARIA 6835) [1.2]. -(ARIA 1) [1.3]. - (ARIA 6934) [1.4]. - (Aria 7128) [1.5]. - (Aria 1836) [1.6]. - (ARIA 8316) [1.7]. - (Aria 11649) [1.8]. - (ARIA 17647) [1.9].
- [2]- D. Djalal et M. Meziane. ENP (2016), Maîtrise des risques majeurs au niveau du "Centre Vrac GPL – CV 165" de NAFTAL à Sidi Arcine (Baraki). Ecole Nationale Polytechnique l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat.
- [3]- TREAL . Sophie .(2006) , impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle , université D'ORLEANS , thèse pour l'obtention du grade docteur.
- [4]- Oméga 5 (2002), Le BLEVE: Phénoménologie et modélisation des effets thermiques Méthode pour - l'évaluation et la prévention des risques accidentels. **139** (INERIS).
- [5]- GROUPE DE TRAVAIL SECTORIEL « GPL » / Sous-groupe « modélisations » Les Phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et Pétrochimie.
- [6]- Assael Marc J, Kakosimos Konstantinos E. (2010), Fires, explosions, and toxic gas dispersions : Effects Calculation and Risk Analysis, CRC Press.
- [7]- Morgan J. Hurley (2016), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th Edition, Springer.
- [8]- Crowl D. A. (2003), Understanding explosions, Center for Chemical Process Safety.
- [9]- y . MOUILLEAU et j .f. LECHAUDEL (1999) , Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre
- [10]- Document d'Information Communal sur les risques majeurs , Les risques majeurs à Bischwiller.
- [11]- techniques de l'ingénieur. T112 - Sécurité et gestion des risques / Méthodes d'analyse des Risques.