



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Kaidi Mohamed Lamine

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés d'environnement

Thème

**ANALYSE QUANTITATIVE DE RISQUE
POUR PROTEGER LES ENTREPRISES
PETROLIERES ET PETROCHIMIQUES**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ZERROUKI Hamza	MCA	Président
HASSANI Mouaadh	MAB	Examineur
HELLAS Mohamed Seddik	MAB	Rapporteur

Promotion : JUIN 2022

Dédicace

Dédicace

*Pour chaque début il y a une fin, et ce qui beau dans toute
finc 'est la réussite et l'atteinte du but.*

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots que
Je dédie cemodeste mémoire de master, fruit de très
longues années d'études à*

Je dédie ce travail à A Mes chers parents

A Toute ma famille

A Tous ceux qui me sont chers

A Toutes mes amies

*Et toutes personnes qui ont toujours été présentes dans
ma vie.*

Mohamed lamine ...

Remerciements

Remerciements

Je remercie Allah le tout puissant et le miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

A mes chers parents pour leurs soutiens, conseils, aides, amour.

*Mes remerciements vont particulièrement à Monsieur Dr. **HELLAS Mohamed Seddik** pour m'avoir proposé ce sujet, pour son aide et le temps qu'il m'a.*

Mes remerciements particuliers vont à tous les membres du comité de discussion pour avoir donné de leur temps pour évaluer mon travail.

Je voudrais également remercier les professeurs de l'université d'Amar Thelidji, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Enfin, il m'a été très difficile d'écrire cette page par souci d'oublier les nombreuses personnes qu'il me faut citer pour leur aide, leur accueil, leur soutien...

Qu'elles soient toutes assurées de ma plus profonde reconnaissance même si leurs noms n'y figurent pas.

Table des matières

Table des matières

LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE	9
Chapitre 1: Notion de base.....	12
1.1 Introduction	12
1.2 Concepts et définitions	12
1.2.1 Notion de la sécurité	12
1.2.2 Notion du risque	13
1.2.3 Notion de danger	13
1.2.4 Notion de criticité / Grille de criticité	14
1.2.5 Notion d'accident	14
1.3 Processus de gestion des risques	14
1.3.1 Analyse du risque	15
1.3.2 Evaluation du risque	16
1.3.3 Acceptation du risque	16
1.3.4 Réduction du risque	16
1.4 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques.....	17
1.4.1 Méthodes qualitatives :.....	18
1.4.1.1 Analyse préliminaire des risques (APR)	18
1.4.1.2 Hazard and Operability Study (HAZOP)	20
1.4.2 Méthodes semi-quantitatives	21
1.4.2.1 Analyse des couches de protection (LOPA)	21
1.4.3 Méthodes quantitatives	21
1.4.3.1 Arbre des événements (ADE)	22
1.4.3.2 Méthodologie d'analyse quantitative des risques (QRA)	23
1.5 Conclusion.....	23
Chapitre 2: Méthodologie d'analyse quantitative des risques	25
2.1 Introduction	25
2.2 Analyse quantitative des risques.....	25
2.3 Objectifs de l'analyse quantitative des risques.....	25
2.4 Démarche de l'analyse quantitative des risques	26
2.4.1 Identification des dangers et des scénarios d'accidents	27
2.4.1.1 Identification des dangers :	27
2.4.1.2 Identification des éléments sensibles	28
2.4.1.3 Revue des accidents passés	28
2.4.1.4 Elaboration des scénarios d'accidents	28
2.4.2 Estimation des conséquences :	29
2.4.3 Estimation des fréquences :.....	30
2.4.4 Estimation des risques :.....	30
2.4.5 Evaluation des risques :.....	31
2.5 Conclusion.....	32

Table des matières

Chapitre 3: Modélisation de l'effet de surpression d'un BLEVE	34
3.1 Introduction	34
3.2 Définition du BLEVE	34
3.3 Processus de réalisation du BLEVE	35
3.3.1 Types de phénomène BLEVE	36
3.3.1.1 BLEVE chaud	36
3.3.1.2 BLEVE froid	36
3.3.2 Effets du BLEVE	39
3.3.3 Causes du BLEVE	40
3.3.4 Conséquences du BLEVE	41
3.4 Modélisation de l'effet de surpression.....	42
3.4.1 Modèle TNO Multi-énergie.....	42
3.4.2 Modèle équivalent TNT	45
3.5 Les seuils de surpression	47
3.6 Conclusion.....	47
Chapitre 4: Application des modèles proposés à un système opérationnel	49
4.1 Introduction	49
4.2 Présentation de la région de Hassi R'mel	49
4.3 Présentation du site d'étude « Phase Commune B »	52
4.3.1 Différentes sections du commun	52
4.3.2 Description du procédé de la Phase B	52
4.4 Présentation du système étudié : Ballon de propane V302	53
4.5 Identification des scénarios de dangers	54
4.6 Analyse quantitative de l'effet de surpression	56
4.6.1 Scénario d'accident : défaillance au niveau du ballon de propane V302	56
4.6.2 Données d'entrée et conditions initiales	56
4.6.3 Résultats et discussion.....	56
4.6.3.1 Simulation à l'aide du modèle TNT	56
4.6.3.2 Simulation à l'aide du modèle TNO	57
4.6.4 Comparaison des simulations précédentes	58
4.7 Conclusion.....	59
CONCLUSION GENERALE	60
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	62
ANNEXE	64
Résumé	67

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1-1 : Le processus de gestion des risques	15
Figure 1-2 : Classification générale des méthodes d'analyse des risques.....	17
Figure 1-3 : Principe général de la méthode d'APR	19
Figure 1-4 : Schématisation d'un arbre d'événement - inspirée de (Mortureux, 01).....	22
Figure 2-1 : Principales étapes d'analyse des risques.	26
Figure 2-2 : Grille de criticité adoptée par SONATRACH DP HRM	31
Figure 3-1 : Étapes de réalisation du BLEVE	35
Figure 3-2 : Schéma global des effets du BLEVE	41
Figure 3-3 : Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite	43
Figure 3-4 : La surpression en fonction de la distance réduite (TNT).	46
Figure 4-1 : Représentation de la position géographique de Hassi R'mel.....	50
Figure 4-2 : Champ de Hassi R'mel.....	50
Figure 4-3 : Boucle de propane de la phase commune B.....	53
Figure 4-4 : Contours d'effets de surpression obtenus à l'aide de l'équivalent TNT	57
Figure 4-5 : Contours d'effets de surpression obtenus à l'aide modèle TNO Multi-énergie..	58
FIGURE I : Définition du Modèle.....	65
FIGURE II : Boite de dialogue permettant le choix des matières	65
FIGURE III : PARAMETRES du procédé	66
FIGURE IV : Définition du terme source.....	66
FIGURE V : Exemple d'une présentation graphique des effets	67

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Présentation des paramètres de l'HAZOP	20
Tableau 3-1 : comparaison entre BLEVE "chaud" et BLEVE "froid ".	37
Tableau 3-2 : causes de BLEVE	40
Tableau 3-3 : correspondance entre les surpressions maximales et les indices de sévérité....	44
Tableau 3-4 : Grille de Kinsella.....	44
Tableau 3-5 : Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression.....	47
Tableau 4-1 : Unités de la région de Hassi R'mel	51
Tableau 4-2 : Caractéristiques techniques du ballon V302 [SONATRACKH ; HSR].....	54
Tableau 4-3 : Application de la méthode HAZOP : cas du paramètre "pression"	55
Tableau 4-4 : Données d'entrée pour le PHAST	56
Tableau 4-5 : Résultats de la modélisation obtenus par PHAST	58

Liste des Abréviations et Acronymes

Liste des Abréviations et Acronymes

AdE	Arbre des Evénements
AMDE	Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets
APD	Analyse Préliminaire de Dangers
APR	Analyse Préliminaire des Risques
AT	Accident du Travail
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor
DNV	Det Norske Veritas
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability Study
HRM	Hassi R'mel
LOPA	Layers of Protection Analysis
MP	Maladie Professionnelle
OREDA	Offshore and Onshore Reliability Data
PHA	Process Hazard Analysis
PHAST	Process Hazard Analysis Software Tool
PID	Piping and Instrumentation Diagramme
QRA	Quantitative Risk Analysis
TLS	Température Limite de Surchauffe
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
TNT	Trinitrotoluène
UVCE	Unconfined Vapor Cloud Explosion

Introduction générale

Un accident majeur désigne un événement (émission, incendie ou explosion) d'importance majeure qui résulte de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'une installation, et qui entraîne pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation, et/ou pour l'environnement des dommages graves, immédiats ou différés.

Pour réduire les risques associés à ce type d'accidents, des mesures de sécurité de prévention (visant la réduction de la probabilité d'occurrence) et/ou de protection (visant la réduction de la gravité des conséquences), doivent être mises en place. Pour cela, une démarche d'analyse cohérente des risques qui consiste à identifier les événements indésirables, les scénarios d'accident et les zones à risques est nécessaire pour une bonne maîtrise de ces derniers.

Au cours de ces dernières décennies, plusieurs techniques de prévision des risques ont été développées. Citons à titre d'exemple, l'analyse des dangers du procédé (Process Hazard Analysis : PHA), l'analyse des couches de protection (Layers Of Protection Analysis : LOPA) et l'analyse quantitative des risques (quantitative Risk Analysis : QRA) .Cette dernière est une approche rigoureuse visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable pour un bon contrôle des risques, Elle consiste à identifier les scénarios d'accidents potentiels, à estimer leurs probabilités d'occurrence et analyser leurs conséquences.

Problématique

Dans les dernières années et avec l'évaluation technologique, les systèmes industriels pétroliers ont connu une augmentation notable du nombre des accidents majeurs et des catastrophes telles que les incendies et les explosions occasionnant des impacts et des effets graves sur les personnes, les biens et l'environnement. Pour cela des méthodes et outils sont déployés pour maîtriser des risques générés par ces installations industrielles pour cette raison, l'évaluation quantitative des risques (QRA) peut contribuer à la mise en place et dans ce travail on va appliquer une analyse quantitative des risques QRA sur un système industriel  (Ballon de propane V-302) Et modéliser un scénario potentiel (BLEVE) à l'aide du logiciel PHAST.

Organisation du mémoire

Le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une partie théorique que consacré aux concepts et définitions fondamentaux liés aux sécurités, ce chapitre intitulé notion de base.

Dans **Le deuxième chapitre intitulé** "Méthodologie d'analyse des risques" a pour objectif de présenter l'approche globale d'évaluation quantitative des risques en se basant sur une description des différentes étapes de déroulement.

Le troisième chapitre, nous commençons par présenter le phénomène BLEVE, son processus de réalisation, ses causes et ses conséquences. Nous abordons ensuite les principes du deux modèles largement utilisés dans l'estimation de l'effet de surpression, à savoir : l'équivalent TNT et le modèle TNO Multi-énergie, ce chapitre intitulé modélisation de l'effet de surpression d'un BLEVE.

Le dernier chapitre intitulé Application des modèles proposés à un système opérationnel sera consacré premièrement à la présentation du site d'étude "Phase Commune B" de l'entreprise SONATRACH-DP Hassi R'mel et du système analysé "ballon accumulateur de propane réfrigérant V302" qui a fait l'objet de notre étude de cas. Ensuite, nous explicitons en détail une application à l'aide du logiciel PHAST afin de montrer l'ampleur l'effet de surpression et de visualiser les différents contours d'effets associés. Enfin, nous examinons l'influence des modèles utilisés sur l'évolution de l'effet de surpression.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une **conclusion générale** décrivant le travail réalisé et les perspectives envisagées.

Chapitre 1

Notion de base

Sommaire

1.1	.....	Introduction
1.2	.....	Concepts et définitions
1.2.2	.....	Notion du risque
1.2.3	.....	Notion de danger
1.2.4	.....	Notion de criticité / Grille de criticité
1.2.5	.....	Notion d'accident
1.3	.....	Processus de gestion des risques
1.3.1	.....	Analyse du risque
1.3.2	.....	Évaluation du risque
1.3.3	.....	Acceptation du risque
1.3.4	.....	Réduction du risque
1.4	.....	Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques
1.4.1	.....	Méthodes qualitatives
1.4.2	.....	Méthodes semi-quantitatives
1.4.3	.....	Méthodes quantitatives
1.5	.....	Conclusion

Chapitre 1: : Notion de base

1.1 Introduction

L'Hygiène, la Santé et la Sécurité au Travail tiennent aujourd'hui une place de plus en plus prépondérante dans la stratégie et le management de l'entreprise, car au-delà du drame humain et social qu'occasionnent un accident du travail (AT) ou une maladie professionnelle (MP), les impacts économiques et juridiques sont souvent non négligeables.

Afin de sauver des vies au sein d'une entreprise, des dispositions pénales se sont renforcées ces dernières années, pouvant aller jusqu'à engager la responsabilité civile, voire pénale du chef d'entreprise. L'objectif consiste à lui faire prendre conscience de son rôle moteur dans la politique de prévention et de maîtrise des risques au sein de l'activité qu'il dirige. Une politique de prévention des risques doit être entamée où il s'agit d'identifier les dangers, évaluer, maîtriser et gérer les risques afin d'éviter les accidents. Dans le travail, les salariés sont exposés aux différents risques sans connaître véritablement leur incidence (impact) à long terme sur la santé humaine (MP). La prise de conscience des situations dangereuses auxquelles peuvent être exposés les salariés est une nécessité pour maîtriser les risques associés et concrétiser leur sécurité et celle des biens et de l'environnement.

1.2 Concepts et définitions

Bien que les concepts liés à l'analyse des risques soient bien définis par plusieurs auteurs, textes réglementaires et normes, il nous a paru utile de reprendre quelques notions fondamentales apparaissant dans toute démarche d'analyse des risques.

1.2.1 Notion de la sécurité :

La sécurité est un état où les dangers et les conditions pouvant provoquer des dommages d'ordre physique, psychologique ou matériel sont contrôlés de manière à préserver la santé et le bien-être des individus et de la communauté. C'est une ressource indispensable à la vie quotidienne qui permet à l'individu et à la communauté de réaliser ses aspirations.

L'atteinte d'un niveau de sécurité optimal nécessite que les individus, communautés, gouvernements et autres intervenants, créent et maintiennent les conditions suivantes, et ce, quel que soit le milieu de vie considéré :

- Un climat de cohésion, de paix sociale et d'équité protégeant les droits et libertés ;
- Le contrôle des dangers présents dans l'environnement ;
- Le respect entre les individus de leurs valeurs et de leur intégrité physique, psychologique et matérielle ;
- L'accès à des moyens efficaces de prise en charge et de réhabilitation.

Ces conditions peuvent être garanties par des actions sur l'environnement (physique, social, technologique, politique et économique, organisationnel, etc.) et sur les comportements.

1.2.2 Notion du risque :

Le risque est défini comme une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences [[Villemeur, 1988](#)].

Dans **MADS MOSAR** [[Griot et Ayrat, 2002](#)]. Le risque est caractérisé par une grandeur à trois dimensions au minimum associée à une phase précise du système et caractérisant un événement non souhaité par sa probabilité d'occurrence, sa gravité (ou impact sur les cibles) et son acceptabilité.

Notons qu'en fonction de la probabilité et de la gravité d'un risque qu'on qualifie un risque de majeur. Acceptable, inacceptable,...etc.

1.2.3 Notion de danger :

Le terme "danger" est défini comme une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement [[ISO/CEI 51, 1999](#)].

Dans **MADS MOSAR** [[Griot et Ayrat, 2002](#)], on définit le danger comme étant un état ou situation comportant une potentialité de dommages inacceptables. C'est la situation d'un système où sont réunis tous les facteurs pouvant conduire à la réalisation d'un accident potentiel.

Notons que d'autres définitions de danger proposées par d'autres normes et auteurs portent le même sens malgré leurs vocabulaires différents.

1.2.4 Notion de criticité / Grille de criticité :

Cette notion est définie comme le résultat d'agrégation des deux dimensions, gravité et probabilité d'occurrence. Elle permet d'estimer l'ampleur d'un risque. L'ensemble des niveaux de risque sont ajustés et classés proportionnellement en fonction de l'importance des deux dimensions (probabilité et gravité) dans une grille appelée grille de criticité. Cette dernière est considérée comme une balance qui nous permet de peser le risque et de décider s'il est acceptable ou inacceptable. A l'issue d'un tel résultat qu'on décide de l'opportunité des mesures nécessaires pour maîtriser ce risque.

1.2.5 Notion d'accident :

Un accident est un événement, généralement non souhaité, aléatoire et fortuit, qui apparaît ponctuellement dans l'espace et dans le temps, à la suite d'une ou plusieurs causes, et qui entraîne des dommages vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement. Sa définition semble avoir évolué au xxe siècle : selon le grand Robert la notion d'accident renvoie à « ce qui advient fortuitement, de façon imprévisible », alors que dans le langage courant on parle aussi d'accident pour des événements statistiquement prévisibles (accidents de la route par exemple).

1.3 Processus de gestion des risques

Bien qu'il existe des différences importantes entre les termes liés à la gestion des risques, la définition de processus de gestion des risques est relativement identique dans tous les référentiels et les normes [ISO/CEI 51, 1999], [IEC 61511, 2003]. Dans le cadre de la gestion des risques, l'analyse et l'évaluation des risques peuvent être menées, selon la nature et la qualité de l'information et de données recueillies sur le système par plusieurs façons, qualitative, semi-quantitative ou quantitative. Dans ce qui suit et pour chaque approche, nous présentons quelques méthodes.

Dans les guides [ISO/CEI 73, 2002] et ISO/CEI 51, 1999], la gestion des risques est définie comme l'ensemble des activités coordonnées, menées en vue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable, à un moment donné et dans un contexte donné.

Le processus de gestion des risques est un processus itératif incluant les étapes suivantes (**figure 1-1**) :

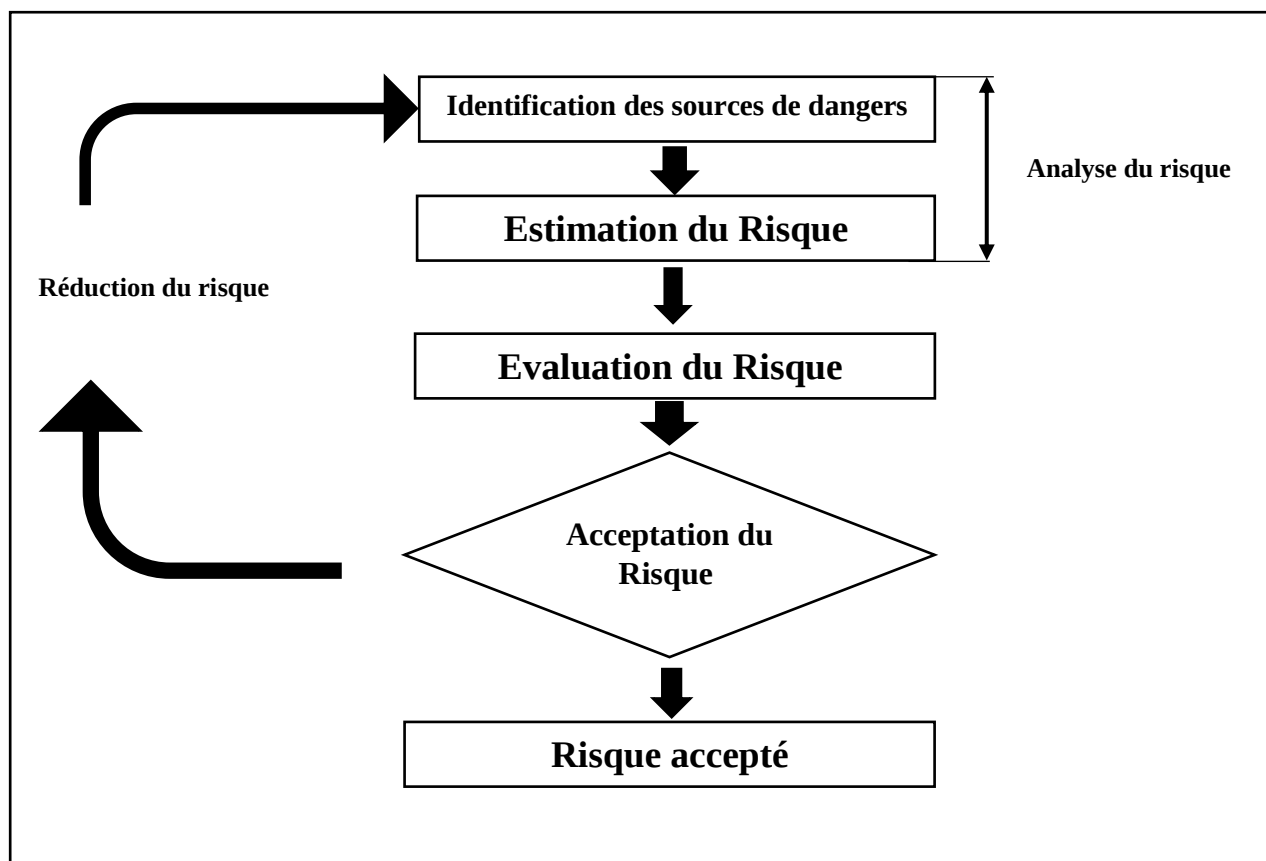


FIGURE 1-1 : LE PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES [ISO/CEI 51 ,1999]

1.3.1 Analyse du risque :

L'analyse des risques occupe une place centrale dans le processus de gestion des risques. Cette étape sert à définir le système ou l'installation à étudier en recueillant toutes les informations et données nécessaires. Dans ce volet, une description à trois niveaux, structurel, fonctionnel et temporel est indispensable afin de mener une analyse efficace et atteindre les objectifs voulus en matière de maîtrise des risques. Dans un premier temps, les principales sources de dangers et les scénarios d'accident doivent être recensés et identifiés. La complexité de certains systèmes étudiés requiert l'utilisation des outils d'analyse aidant à l'identification des dangers [INERIS DRA-35, 2003]. Citons par exemple HAZID (Hazard Identification), HAZOP (Hazard and Operability Study), APD (Analyse Préliminaire de Dangers) et d'autres. Ces outils d'analyse permettent aussi d'identifier les différentes barrières de sécurité existantes dans le système étudié. Une fois le danger est identifié, le risque associé doit être estimé. L'estimation peut être qualitative, semi-quantitative et/ou quantitative en termes de probabilité de son occurrence et de la gravité de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement.

1.3.2 Evaluation du risque :

Après avoir estimé le risque, on doit le comparer aux critères d'acceptabilité établis préalablement par l'entreprise concernée. Cette évaluation permet de prendre une décision sur l'acceptabilité ou l'inacceptabilité de chaque risque [ISO/CEI 51, 1999], c'est-à-dire, déterminer s'il convient d'accepter le risque tel qu'il est ou bien de le réduire.

1.3.3 Acceptation du risque :

L'acceptabilité d'un risque est faite à partir de ses deux paramètres. Le niveau du risque quantifié sera positionné dans une matrice d'évaluation et en fonction des critères d'acceptabilité retenus qu'on juge de l'acceptabilité ou la non-acceptabilité du risque [ISO/CEI 51, 1999]. Si le risque est jugé acceptable, le processus de gestion sera terminé et le risque jugé sera surveillé. Dans le cas contraire, le processus continue en passant à l'étape de réduction.

Dans le cas où les critères de risque sont exprimés en termes de fréquence maximale tolérable ou acceptable pour des conséquences bien définies (cas de mort, par exemple), le risque estimé sera comparé à ces fréquences. Les courbes F/N décrivent parfaitement ce type de critères.

1.3.4 Réduction du risque :

Cette étape consiste à mettre en œuvre les différentes mesures et barrières de prévention et de protection afin de réduire l'intensité du phénomène dangereux (réduction potentielle de danger, atténuation des conséquences) et diminuer sa probabilité d'occurrence [Kirchsteiger, 1999]. Outre les améliorations techniques et de fiabilité d'équipements, la prévention passe aussi par une meilleure prise en compte des facteurs de risque liés à l'organisation et aux personnes. Le choix des actions préventives à engager est effectué en comparant les coûts de leur mise en œuvre avec les coûts des conséquences de risque, en tenant compte de leur probabilité d'apparition. Un suivi régulier de l'évolution des risques est recommandé dans la démarche de gestion des risques afin de contrôler et d'assurer la pertinence des actions préventives engagées et de corriger les dispositions prévues [INERIS DRA-35, 2003].

1.4 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Dans cette partie nous allons décrire brièvement les principales méthodes utilisées dans une démarche d'analyse des risques.

Ces méthodes seront classées dans trois principales catégories : méthodes qualitatives, méthodes semi-quantitatives et méthodes quantitatives (voir [figure 1-2](#)) [Dziubiński, 2006].

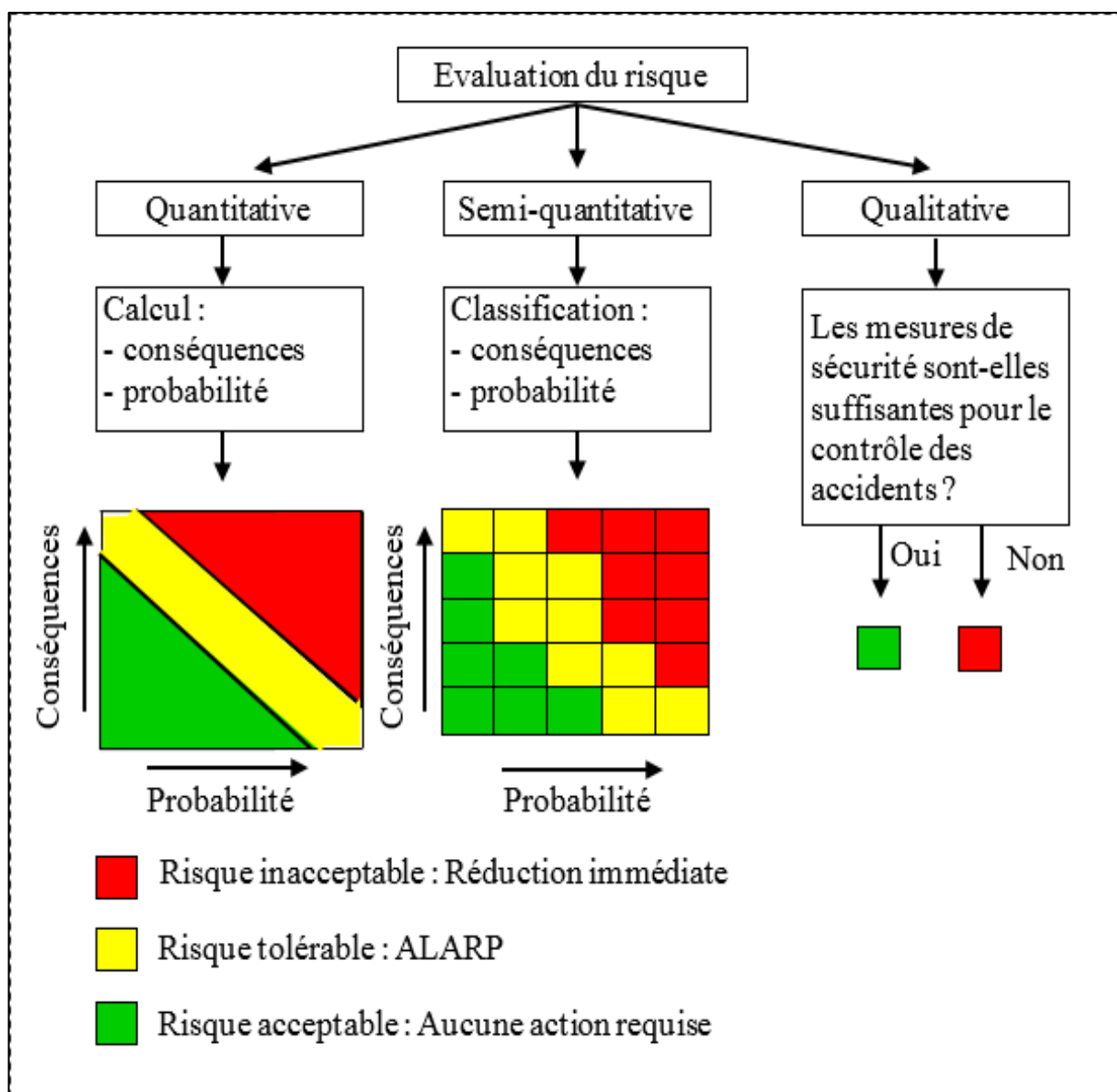


FIGURE 1-2 : CLASSIFICATION GENERALE DES METHODES D'ANALYSE DES RISQUES

1.4.1 Méthodes qualitatives :

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toute autre analyse. En effet, elle permet la bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants [Villemeur, 1988]. Pour une bonne évaluation qualitative du risque, cette approche ne s'appuie pas explicitement sur des données chiffrées, mais elle se réfère à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le retour d'expérience et les jugements d'experts [Kirchsteiger, 1999]. Cette approche nécessite alors une très bonne connaissance des différents paramètres et causes liés au système étudié. Dans quelques études de dangers, cette approche peut être suffisante pour atteindre les objectifs voulus si elle est bien menée et justifiée.

De nombreux outils d'analyse et d'évaluation des risques à caractère qualitatif existent, parmi lesquels nous retrouvons l'APR et HAZOP, présentées ci-après.

1.4.1.1 Analyse préliminaire des risques (APR) :

L'analyse préliminaire des risques est un outil à caractère qualitatif utilisé et appliqué jusqu'à l'heure actuelle dans de nombreuses industries surtout quand il s'agit de connaître et d'évaluer les différents éléments et situations dangereuses dans un système ou installation en phase de conception [Villemeur, 1988]. Les étapes de cette méthode peuvent être résumées comme suit :

- Dans un premier temps, cette méthode permet d'identifier et de lister les éléments du système et les événements pouvant conduire à des situations dangereuses et des accidents. A ce niveau, on analyse des séquences d'événements qui conduisent à un simple incident ou à un accident grave.
- Dans un second temps, il s'agit d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels. Enfin, on doit prévoir toutes les mesures préventives permettant de maîtriser ou d'éliminer les situations dangereuses et les événements causant les accidents potentiels (voir [figure 1-3](#)).

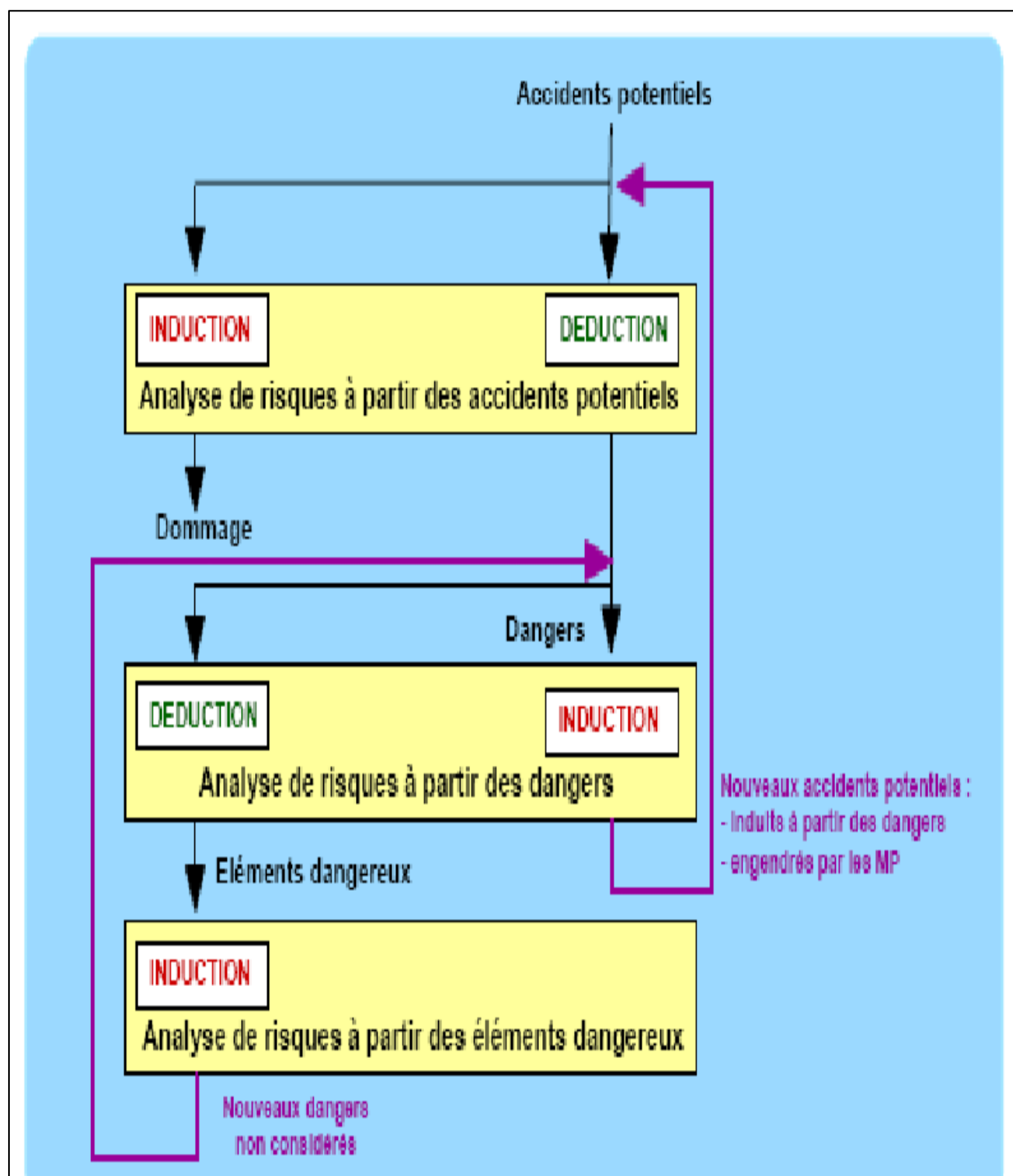


FIGURE 1-3 : PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE D'APR

1.4.1.2 Hazard and Operability Study (HAZOP):

La méthode HAZOP est un outil qualitatif très utilisé en particulier dans l'industrie pétrochimique. Généralement, HAZOP représente une extension de l'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE). Elle consiste à détecter des problèmes potentiels qui peuvent causer un écart par rapport à la conception d'origine et à voir les causes et les conséquences de ces écarts. Cette méthode est mise en œuvre à la fin de phase de conception et précisément au début de phase de réalisation des systèmes industriels puisqu'elle s'appuie sur les plans de circulation des fluides et les schémas détaillés PID (Piping and Instrumentation Diagramme) du système étudié [IEC 61882, 2001], Son déroulement est comme suit :

Après avoir décomposé le système en parties (lignes de circulation), tous les paramètres associés au fonctionnement du système doivent être identifiés, généralement les paramètres rencontrés concernent la température, la pression, le débit et le temps [INERIS DRA-35, 2003]. Ces derniers peuvent subir des contraintes qui vont rendre anormal le fonctionnement du système. Citons par exemple :

- ✓ Augmentation/diminution de débit,
- ✓ Diminution/élévation de la température ou de la pression,
- ✓ Dépassement du temps,...etc.

Ces variations (dérives potentielles) des paramètres engendrent des conséquences potentielles et pour prévenir ces conséquences, HAZOP identifie pour chaque dérive les moyens de détection et les différentes barrières de sécurité prévues pour réduire l'occurrence des accidents.

TABLEAU 1-1 : PRESENTATION DES PARAMETRES DE L'HAZOP

Unité/Opération : Ligne/Équipement							
Paramètre :HAZOP							
Mot-clef	Divination	Causes	Conséquences	Détection	Sécurité existante	Proposition d'amélioration	Observation

1.4.2 Méthodes semi-quantitatives :

L'analyse semi-quantitative des risques est une approche qui n'est ni purement qualitative ni purement quantitative [Desroches, 1995]. Cette démarche a pour but d'enlever l'aspect hautement subjectif de l'information utilisée dans l'approche qualitative en lui donnant plus de précision et d'exactitude, et en même temps pour assouplir et combler le manque de la robustesse des données de l'approche quantitative.

De nombreux outils et méthodes d'analyse et d'évaluation à caractère semi-quantitatif ont été développés. Dans ce qui suit, on présentera une méthode parmi les plus utilisées dans l'évaluation des risques.

1.4.2.1 Analyse des couches de protection (LOPA) :

La méthode LOPA fut historiquement l'une des méthodes récentes qui a été développée à la fin des années 1990 par le CCPS (Center for Chemical Process Safety), [CCPS, 2001 ; Hellas M.S., Chaïb.R. 2020a]. LOPA est un acronyme qui signifie "Layers Of Protection Analysis" (analyse des couches de protection). Cette méthode fut utilisée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes et des procédés industriels chimiques, pétrochimiques et nucléaires [IEC 61511, 2003 ; Hellas M.S., Chaïb.R. 2020a]

1.4.3 Méthodes quantitatives :

L'analyse quantitative des risques est considérée comme l'approche la plus retenue pour une bonne prise de décision sur les risques. Cette approche consiste à caractériser les différents paramètres d'analyse des risques par des mesures probabilistes [Desroches, 1995].

L'obtention de ces mesures passe généralement par un traitement mathématique [Villemeur, 1988] en prenant en compte les données relatives aux différents paramètres évalués et aussi aux informations qui sont de nature quantitative.

À l'égard de l'application de cette démarche, une attention particulière aux données utilisées, à leur origine et à leur adéquation aux cas étudiés doit être portée par une simple erreur remettra l'étude en cause.

L'arbre des événements (AdE) et l'analyse quantitative des risques (QRA) représentent par excellence ce type de méthodes.

1.4.3.1 Arbre des événements (ADE) :

L'arbre des événements est une méthode déductive [Villemeur, 1988] qui consiste à partir d'un événement initiateur conduisant à des conséquences redoutées à envisager l'échec ou le succès des fonctions de sécurité puis définir les événements susceptibles de se produire en aval de l'événement initiateur, les barrières de sécurité et leurs fonctions doivent être identifiées en leurs affectant des probabilités de défaillance. Comme le montre la (figure 1-4), l'arbre des événements construit permet d'identifier les différentes séquences d'événements susceptibles de conduire ou non à des conséquences catastrophiques.

Les étapes de la méthode sont :

- 1) Définition de l'élément initiateur,
- 2) Identification des barrières de sécurité et leurs fonctions,
- 3) Construction de l'arbre,
- 4) Traitement de l'arbre.

La probabilité d'occurrence de l'événement initiateur par celles des barrières de sécurité existantes pouvant empêcher le scénario d'accident.

L'arbre des événements sert comme support pour la méthode QRA. Pour ce, nous ferons appel à cette méthode pour représenter les scénarios d'accidents.

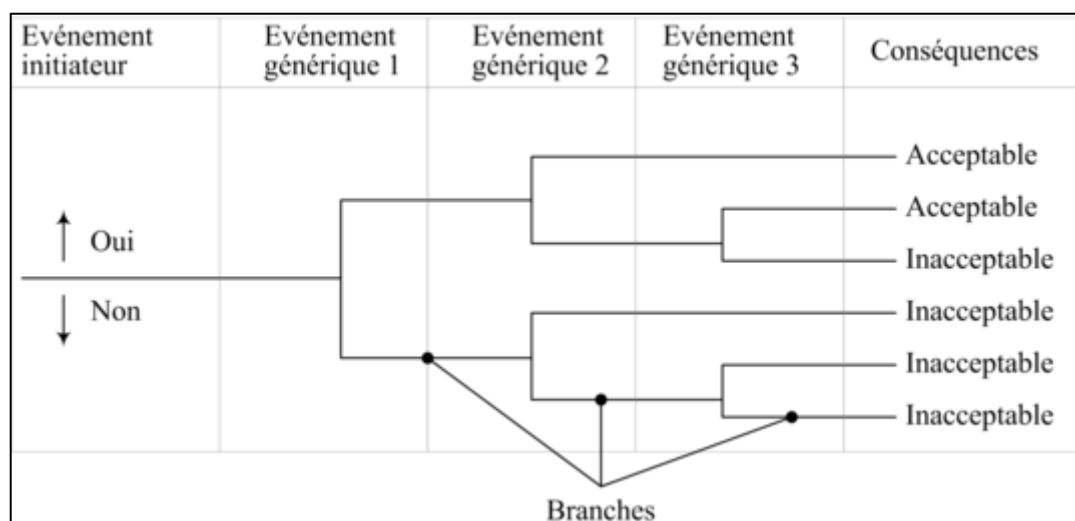


FIGURE 1-4 : SCHEMATISATION D'UN ARBRE D'EVENEMENT - INSPIREE DE (MORTUREUX, 01)

1.4.3.2 Méthodologie d'analyse quantitative des risques (QRA) :

L'analyse quantitative des risques (QRA) est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette approche consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences, moyennant des méthodes d'analyse des risques et des modèles mathématiques des effets et de vulnérabilité. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et par suite appliquer les mesures qui répondent convenablement à cette estimation.

L'analyse des risques a pour objet d'évaluer le niveau des risques spécifiques du système analysé. Il existe un grand nombre d'outils dédiés à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou une installation industrielle. Ces outils sont classés dans trois principales catégories : méthodes qualitatives, méthodes semi-quantitatives et méthodes quantitatives.

1.5 Conclusion

Dans tous les métiers, les travailleurs peuvent être exposés à une multitude de risques sur le lieu de travail. Les mesures d'hygiène et de sécurité s'attaquent à tout l'éventail des dangers présents sur le lieu de travail, de la prévention des **accidents** à des dangers plus insidieux. Les programmes de santé et de sécurité doivent viser à prévenir les maladies et **accidents** liés au travail plutôt qu'à résoudre les problèmes a posteriori.

Ce que nous avons présenté dans ce chapitre Ce sont juste des concepts de base qui nous permettent d'étudier l'analyse et l'évaluation des risques, qui nécessitent une analyse de ces dangers. C'est ce dont nous parlerons dans le deuxième chapitre.

Chapitre 2

Méthodologie d'analyse quantitative des risques

Sommaire

2.1	.....	Introduction
2.2	.....	Analyse quantitative des risques
2.3	.....	Objectifs de l'analyse quantitative des
2.4	.....	Démarche de l'analyse quantitative des risques
2.4.1	.....	Identification des dangers et des scénarios d'accidents
2.4.2	.....	Estimation des conséquences
2.4.3	.....	Estimation des fréquences
2.4.4	.....	Estimation des risques
2.4.5	.....	Evaluation des risques
2.5	.....	Conclusion

Chapitre 2: *Méthodologie d'analyse quantitative des risques*

2.1 Introduction

L'analyse probabiliste des risques technologiques et industriels est maintenant bien acceptée par les scientifiques et les autorités réglementaires. Cette analyse a été utilisée dans le domaine de la conception, de l'exploitation et de la maintenance des installations industrielles comme les installations à risques Seveso (chimie, pétrochimie, armement, transport), ou dans les domaines de haute technologie tels le spatial et le nucléaire où la réglementation impose justement l'élaboration d'un rapport de sûreté dès la conception et un suivi des résultats pendant toute la durée d'exploitation de l'installation.

2.2 Analyse quantitative des risques

Dans l'analyse quantitative, le risque s'exprime mathématiquement en combinant l'importance des conséquences d'un événement indésirable (pour la population, et/ou les structures et/ou l'environnement) et sa fréquence de réalisation. L'analyse quantitative de risques permet de connaître la contribution de chaque composant d'un système au risque global de celui-ci. Elle permet aussi de comparer l'influence de mesures de réduction de risques sur le risque global. Les efforts de réduction des risques peuvent ainsi être dirigés par exemple vers les composants à haut risque (plus critique) ou selon le rapport du coût sur la réduction le plus avantageux [[Hellas M.S., chaib r. 2018b](#)].

À la lumière des résultats de l'analyse de risques, il est alors possible de mettre en place des mesures de gestion visant d'une part la prévention et le contrôle des risques et d'autre part la planification d'une intervention d'urgence appropriée.

2.3 Objectifs de l'analyse quantitative des risques

L'évaluation des risques peut être utilisée pour contribuer à la conception, à l'exploitation ou à la réglementation des activités dangereuses. Elle peut être extrêmement utile de plusieurs façons, notamment [[CCPS, 2010](#)], [[CCPS, 1999](#)] :

- Estimation des niveaux du risque et évaluation de leur importance. Cela aide à décider si les

risques doivent être réduits ou non.

- Identifier les principaux contributeurs au risque. Cela aide à comprendre la nature des dangers et suggère des cibles possibles pour les mesures de réduction des risques.
- Définir des scénarios d'accidents potentiels dès la phase de conception. Ceux-ci peuvent être utilisés comme une base pour la gestion des crises et la planification des mesures de secours et d'évacuation en cas d'urgence.
- L'évaluation des mesures/barrières de réduction des risques. La QRA peut être liée à une analyse coûts-avantages pour aider à choisir les moyens de réduction les plus rentables.
- Identifier les procédures et les équipements critiques pour la sécurité. Ils sont essentiels pour minimiser les risques et doivent faire l'objet d'une attention particulière pendant l'exploitation.
- Identifier les précurseurs d'accidents qui peuvent être surveillés pendant l'exploitation afin de signaler les tendances défavorables dans les incidents.

Dans l'ensemble, ces utilisations possibles de la QRA fournissent une structure rationnelle de surveillance des risques et d'orientation pour la prise de décision sur les problèmes de sécurité.

2.4 Démarche de l'analyse quantitative des risques

L'analyse quantitative des risques d'accidents constitue un outil important permettant de quantifier les conséquences et les fréquences des risques. Elle se divise en cinq étapes principales résumées dans la (Figure 2-1) suivante :

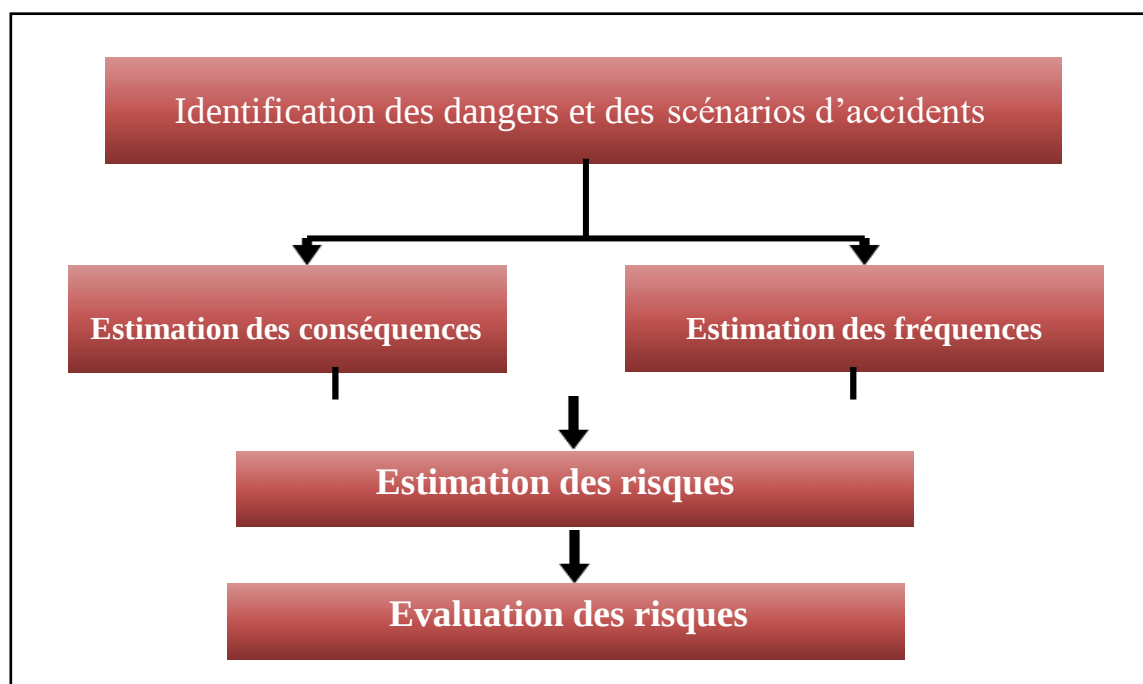


FIGURE 2-1 : PRINCIPALES ETAPES D'ANALYSE DES RISQUES. [CPR 18E, 1999]

2.4.1 Identification des dangers et des scénarios d'accidents :

L'identification des dangers et des scénarios d'accidents permet de recueillir l'information relative au projet et/ou système en exploitation à l'étude (installations, équipements, matières dangereuses, etc.) et au milieu dans lequel il sera situé.

Cette étape consiste à identifier les dangers ou les risques, identifier les éléments sensibles du milieu, réaliser la revue des accidents passés reliés à des entreprises ou des procédés similaires et établir les scénarios d'accidents.

2.4.1.1 Identification des dangers :

L'identification des dangers vise à faire l'inventaire des dangers liés à un processus, une installation ou une activité. Elle fait appel à plusieurs sources d'information, notamment l'expérience, les modes opératoires, les descriptions de procédés, les informations sur les matières dangereuses, etc. Généralement, les dangers sont associés aux matières dangereuses nécessaires au projet, aux procédés et aux équipements ainsi qu'à la localisation géographique du processus [Théberge, 2000].

La complexité de certains systèmes étudiés nécessite l'utilisation des outils d'analyse aidant à l'identification des dangers. Citons à titre d'exemple : HAZOP (Hazard and Operability Study), [IEC 61882, 2001] APD (Analyse Préliminaire de Dangers) et d'autres.

Dangers liés aux matières dangereuses

Les matières dangereuses (manipulées, transportées, transformées, etc.) peuvent être à l'origine d'accidents technologiques majeurs. Les dangers liés aux matières dangereuses découlent notamment des éléments suivant : les caractéristiques des matières (inflammabilité, toxicité, corrosivité, réactivité, ...), les quantités, et les incompatibilités entre matières dangereuses.

Dangers liés aux activités et conditions opératoires de l'installation

Les activités peuvent être à l'origine de situations dangereuses, notamment la manutention, l'entreposage et le transport. Elles doivent être identifiées et le cas échéant mises en relation avec les matières dangereuses impliquées.

Les conditions d'opération peuvent être à l'origine de dangers ou augmenter le danger associé à des matières dangereuses, par exemple, l'eau ne présente pas un danger en soi, mais si elle est utilisée sous forme de vapeur à haute pression, elle pourrait entraîner une explosion avec des effets graves. En effet, il est important de considérer les conditions normales et anormales d'opération lors de l'identification des dangers [Théberge, 2000].

2.4.1.2 Identification des éléments sensibles :

Les éléments sensibles du milieu (population, structures et infrastructures, éléments d'environnement) sont des composants du milieu susceptibles d'être affectés par les conséquences d'un accident. La présence d'éléments sensibles pourrait :

- Augmenter le nombre d'individus potentiellement atteints (par exemple, un centre commercial) ;
- Entraîner la destruction des éléments de grande valeur du patrimoine humain ou naturel (par exemple, un bâtiment historique ou une réserve écologique) ;
- Alourdir la tâche des intervenants lors d'un accident (par exemple : l'évacuation dans un hôpital) ;
- Déclencher d'autres accidents en cascade découlant du premier (effet domino), par exemple, un réservoir atteint par l'onde de choc d'une première explosion.

2.4.1.3 Revue des accidents passés :

Une revue des accidents passés apporte un éclairage complémentaire quant aux défaillances, incidents et accidents susceptibles de survenir. La connaissance des accidents passés offre un point de comparaison concret à l'exercice d'identification des dangers et des scénarios d'accidents. L'analyste est invité à consulter les rapports d'accidents qui se sont produits dans des installations identiques ou similaires au projet étudié ainsi que les banques de données sur les accidents au travail et les accidents technologiques majeurs [CCPS, 2000], [CPR 14E, 1999].

2.4.1.4 Elaboration des scénarios d'accidents :

À partir des informations recueillies sur le projet et/ou le système opérationnel, les matières dangereuses présentes et les accidents passés, l'élaboration des scénarios d'accidents permet d'établir une liste des événements anormaux susceptibles de survenir.

L'utilisation d'un scénario normalisé (scénario maximum possible) vise à estimer les conséquences maximales en terme de population touchée et de territoire affecté (superficie) ainsi que le niveau d'impact (décès, blessures, contamination) afin d'évaluer si le système étudié peut être à l'origine d'un accident majeur.

2.4.2 Estimation des conséquences :

L'estimation des conséquences liées aux scénarios d'accidents retenus permet d'établir et de quantifier les impacts de ces événements sur le milieu environnant. Cette quantification sera plus détaillée dans le troisième chapitre.

Les conséquences d'un scénario d'accident se définissent à l'aide de deux notions, les **caractéristiques** de l'accident et ses **impacts**. Les caractéristiques sont celles qui peuvent générer un effet négatif sur les éléments sensibles du milieu. L'impact définit cet effet. Par exemple, lors d'un incendie (événement accidentel), le rayonnement thermique (caractéristique) entraîne des brûlures (impact) aux individus exposés [Théberge, 2000].

Au cours d'une QRA, les conséquences (caractéristiques et impacts) de chaque accident potentiel doivent être quantifiées puis évaluées ainsi que l'influence des effets dominos. Quatre types d'événements accidentels sont généralement considérés au cours de l'évaluation quantitative des conséquences [Hellas, M.S., Chaib, R. & Verzea, I. 2019] :

- Termes source (les rejets accidentels) ;
- Dispersion atmosphérique ou les nuages toxiques ;
- Incendies ;
- Explosions.

Calcul des conséquences

La conséquence d'un scénario d'accident est établie en deux étapes :

- Les caractéristiques sont déterminées à partir de la modélisation de l'accident ;
- L'impact est établi en modélisant l'effet de ces caractéristiques sur les éléments sensibles du milieu.

La modélisation de l'accident permet de décrire les phénomènes physico-chimiques successifs (fuite, dispersion atmosphérique, inflammation, combustion) menant à l'accident et de calculer ses caractéristiques qui provoquent l'impact sur les éléments sensibles du milieu.

Les conséquences peuvent être calculées à l'aide de modèles mathématiques (modèles empiriques ; outils et codes informatiques) permettant la modélisation des accidents potentiels et de leurs conséquences [CCPS, 2014 ; Hellas, M.S., Chaib, R. & Verzea, I. 2019].

2.4.3 Estimation des fréquences :

Le calcul de la fréquence d'occurrence permet d'établir la possibilité qu'un accident se produise et la possibilité que des éléments sensibles du milieu soient affectés par les conséquences découlant de cet accident.

Fréquence d'occurrence de l'accident

La fréquence d'occurrence d'un scénario d'accident dépend de la fiabilité des équipements impliqués et de la séquence d'événements générant l'accident. Lorsque la fréquence d'occurrence d'un scénario d'accidents n'est pas directement disponible, il est nécessaire de décomposer le scénario en événements dont la fréquence ou la probabilité d'occurrence est connue. Pour ce faire, les méthodes des arbres de défaillances et d'événements sont souvent utilisées. Les taux de défaillances et les probabilités d'occurrence utilisés dans ces arbres peuvent être tirés des bases données reconnues dans la littérature spécialisée telles que : **OREDA** (Offshore and Onshore Reliability Data) [CCPS, 2009], [CCPS, 2001].

À la suite de l'évaluation des fréquences, il peut y avoir rétroaction afin d'apporter des modifications au projet et/ou système opérationnel. Les modifications apportées ont pour but de réduire la fréquence des accidents potentiels en augmentant la fiabilité des équipements et des systèmes. Le changement d'équipements, l'ajout d'équipements de contrôle et d'alarme et leur redondance sont autant de mesures qui contribuent à la réduction des fréquences d'occurrence d'accidents.

2.4.4 Estimation des risques :

Le risque est l'effet combiné d'une fréquence d'occurrence d'un événement redouté et des conséquences de cet événement. Le risque associé à une installation est la somme des risques de tous les événements accidentels qui ont pour origine cette installation.

Lors de l'estimation des risques associés à une installation, le risque peut être calculé pour chaque type de conséquences (décès, blessures irréversibles, atteinte environnementale, perte économique, etc.). Il existe diverses façons d'exprimer mathématiquement le risque, notamment les contours du Gravité.

2.4.5 Evaluation des risques :

Après avoir estimé le risque, on doit le comparer aux critères d'acceptabilité établis préalablement par l'entreprise concernée. Cette évaluation permet de prendre une décision sur l'acceptabilité ou l'inacceptabilité de chaque risque [Hellas, M.S., Chaib, R. 2021a, 2021b], c'est-à-dire, déterminé s'il convient d'accepter le risque tel qu'il est ou bien de le réduire.

L'acceptabilité d'un risque est faite à partir de ses deux paramètres : sa probabilité d'occurrence et sa gravité. Le niveau du risque quantifié sera positionné dans une matrice d'évaluation et en fonction des critères d'acceptabilité retenus qu'on juge de l'acceptabilité ou la non-acceptabilité du risque (cf. **Figure 2-2**). Si le risque est jugé acceptable, le processus d'analyse sera terminé et le risque jugé sera contrôlé. Dans le cas contraire, le processus continue en passant à la réduction.

Dans le cas où les critères du risque sont exprimés en termes de fréquence maximale tolérable ou acceptable pour des conséquences bien définies (cas de mort, par exemple), le risque estimé sera comparé à ces fréquences. Les courbes F/N décrivent parfaitement ce type de critères (cf. **Figure 2-3**) [CCPS, 2000], [CCPS, 2009].

PROBABILITE GRAVITE	1 : Improbable <i>Improbable de se produire durant la durée de vie de l'installation</i> ($< 10^{-4}$ /an)	2 : Rare <i>Peut se produire une fois durant la durée de vie de l'installation</i> (10^{-4} à 10^{-2} /an)	3 : Occasionnel <i>Peut se produire plus qu'une fois durant la durée de vie de l'installation (1/10 ans)</i> (10^{-2} à 10^{-1} /an)	4 : Fréquent <i>Peut se produire plusieurs fois durant la durée de vie de l'installation</i> (1/an)
1 : Négligeable -Blessures superficielles ; -Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 10%.	Faible	Faible	Faible	Modéré
2 : Modérée -Blessures mineures ; -Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 50%.	Faible	Modéré	Modéré	Élevé
3 : Critique -Blessures graves ; -Arrêt de l'unité (train).	Modéré	Modéré	Élevé	Élevé
4 : Catastrophique -La mort ; -Arrêt de l'usine (module).	Modéré	Élevé	Élevé	Élevé

FIGURE 2-2 : GRILLE DE CRITICITE ADOPTEE PAR SONATRACH DP HRM

2.5 Conclusion

L'analyse de risques d'accidents technologiques majeurs s'inscrit dans un cheminement plus large de gestion des risques. Sa réalisation permet de connaître les accidents potentiels associés à l'implantation ou la présence d'une installation. L'évaluation des conséquences et des risques pour les populations, l'environnement et les territoires environnants contribue à une meilleure gestion de ceux-ci par leur réduction, la mise en place de mesures de sécurité et d'atténuation, la mise œuvre d'une planification des mesures d'urgence et d'un programme de gestion de risques adapté à la nature des accidents potentiels majeurs identifiés.

Après la présentation des concepts et principes de base relatifs à l'évaluation quantitative des risques dans ce chapitre, il s'avère que la quantification des conséquences et des effets liés aux accidents majeurs est la tâche la plus lourde dans une QRA qui nécessite une évaluation rigoureuse à l'aide des modèles complexes et des codes informatiques développés,

Chapitre 3

Modélisation de l'effet de surpression d'un BLEVE

Sommaire

3.1	.....	Introduction
3.2	.....	Définition du BLEVE
3.3	.....	Processus de réalisation du BLEVE
3.3.1	.....	Types de phénomène BLEVE
3.3.1.1	.....	BLEVE chaud
3.3.1.2	.....	BLEVE froid
3.3.2	.....	Effets du BLEVE
3.3.3	.....	Causes du BLEVE
3.3.4	.....	Conséquences du BLEVE
3.4	.....	Modélisation de l'effet de surpression
3.4.1	.....	Modèle TNO Multi-énergie
3.4.2	.....	Modèle équivalent TNT
3.5	.....	les seuils de surpression
3.6	.....	Conclusion

Chapitre 3: *Modélisation de l'effet de surpression d'un BLEVE*

3.1 Introduction

Le risque technologique peut se manifester par un accident se produisant sur un site industriel et pouvant entraîner des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens, l'environnement ou le milieu naturel.

Il est lié à l'utilisation, au stockage ou à la fabrication de substances dangereuses.

Les effets résultants d'un accident industriel peuvent être de 3 types :

- ✓ **effet de surpression** : conséquence d'une explosion, c'est la propagation à grande vitesse d'une onde de pression
- ✓ **effet thermique** : soit par rayonnement, par conduction ou convection
- ✓ **effet toxique** : dispersion d'un nuage suite à rupture du contenant, ou fumées d'incendie.

3.2 Définition du BLEVE

Le BLEVE est un acronyme qui signifie "Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion". Ce phénomène correspond à une vaporisation violente, à caractère explosif, suite à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température normale d'ébullition à la pression atmosphérique [[Hellas, M.S., Chaïb, R. 2021a, 2021b](#)].

Ce phénomène d'éclatement de réservoirs peut se décomposer en plusieurs phases successives ou simultanées :

- ❖ une réaction chimique de combustion interne ;
- ❖ l'éclatement du réservoir avec destruction de la paroi ;
- ❖ l'émission de projectiles ;
- ❖ la propagation d'une onde de pression dans l'environnement ;
- ❖ des échanges thermiques internes (conduction avec la paroi du réservoir) et externes (rayonnement, convection).

3.3 Processus de réalisation du BLEVE

Un BLEVE se produit lorsqu'un réservoir contenant du gaz se rompt, entraînant la libération instantanée de la vapeur, du liquide bouillant, des missiles (fragments de réservoir) et de l'onde de souffle. Le type de BLEVE le plus courant est causé lorsque la paroi extérieure du réservoir est exposée à un incendie. Le transfert continu de chaleur du feu à la paroi du réservoir augmente la température et la pression à l'intérieur du réservoir, jusqu'à ce que le réservoir se rompe. Cette défaillance soudaine du réservoir entraîne une vaporisation explosive de son contenu.

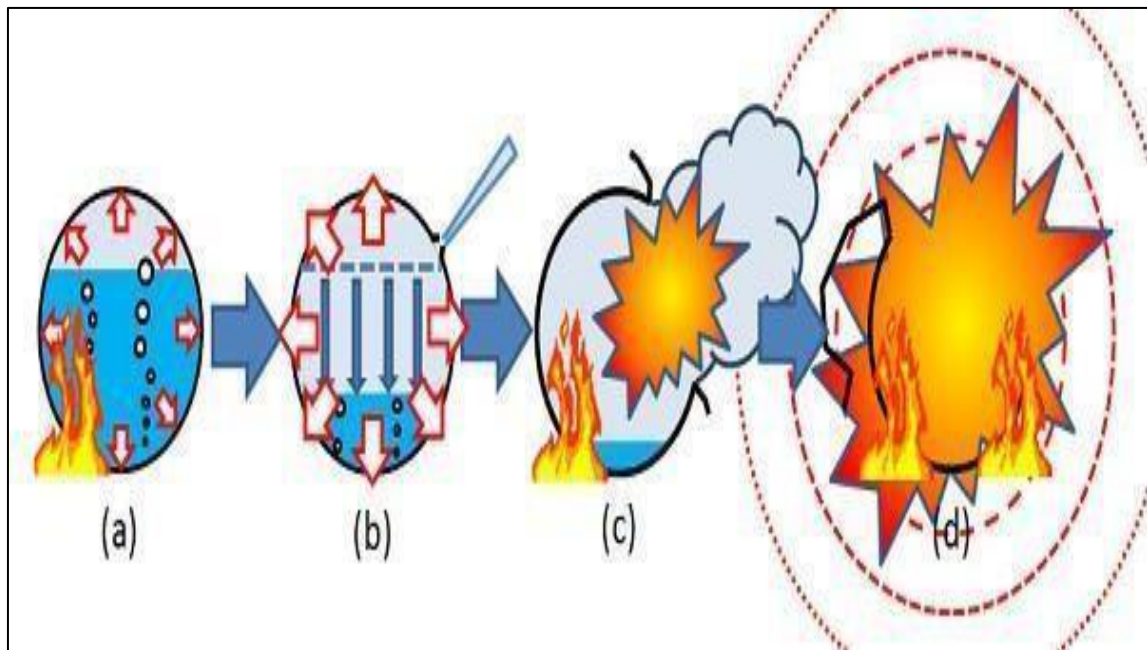


FIGURE 3-1 : ÉTAPES DE REALISATION DU BLEVE

Lorsque la structure du réservoir se fragilise, la vapeur tente de s'échapper ou de fuir par l'ouverture, ce qui entraîne une diminution de la pression à l'intérieur du réservoir. Cette baisse drastique de la pression à l'intérieur du réservoir entraîne une ébullition rapide du liquide et une augmentation de la formation de vapeur. La pression de la vapeur qui s'échappe devient très élevée et conduit à une explosion détruisant complètement la structure du réservoir et les zones environnantes [SAFEGE, 2013], [Champassith, 2014].

3.3.1 Types de phénomène BLEVE

On distingue le **BLEVE froid** et le **BLEVE chaud**. La différence entre les deux types réside dans la température à laquelle se produit la rupture de l'enceinte. Cette température est appelée température limite de surchauffe, abrégée « TLS ». Elle est propre au produit stocké et est fonction de la température critique du produit en question.

La quantité de liquide vaporisé est généralement plus importante lors d'un BLEVE chaud que lors d'un BLEVE froid, Les conséquences sont donc nettement plus prononcées avec un BLEVE chaud.

3.3.1.1 BLEVE chaud :

Si, lors de la rupture, la température du liquide dépasse la température limite de surchauffe, il se produit un **BLEVE** chaud. Dans ce cas, la pression augmente avec la température (selon les lois de Gay-Lussac et des gaz parfaits). Lorsque la soupape de l'enceinte se déclenche, la partie liquide diminue au profit de la partie gazeuse (pression de vapeur saturante). Or, la phase gazeuse transmettant moins bien la chaleur que la phase liquide, celle-ci se concentre dans le haut du réservoir, ce qui cause sa fragilisation, puis sa rupture. De plus, si le gaz est inflammable, l'ouverture de la soupape peut créer une longue flamme (ou « effet chalumeau »). Le phénomène d'ébullition a lieu en dehors de tout site de nucléation (interface qui permet la vaporisation), dans tout le volume, donc à hauteur de l'énergie accumulée.

3.3.1.2 BLEVE froid :

Si, lors de la rupture, la surchauffe du liquide est inférieure à la température limite de surchauffe, la dépressurisation rapide entraîne un BLEVE froid. Dans ce cas, il s'agit d'une vaporisation instantanée également à hauteur de l'énergie accumulée, mais cette fois au niveau des interfaces, telles que les parois du réservoir encore au contact du liquide. On trouve notamment cette configuration avec du dioxyde de carbone liquide ou du dioxygène liquide, la rupture du réservoir pouvant être due à un choc mécanique ou à la corrosion. Dans ce cas, la soupape ne peut pas jouer son rôle.

Pour les **BLEVE** de réservoirs contenant du GPL deux notions de BLEVE sont définies. La notion de BLEVE froid ou chaud se réfère uniquement à la température limite de surchauffe (TLS) du produit :

- La transformation, qui se produit en dessous de la température limite de surchauffe à pression atmosphérique, est généralement appelée « **BLEVE froid** ».
- La transformation, qui se produit au-dessus de la température limite de surchauffe à pression atmosphérique, est généralement appelée « **BLEVE chaud** ».

Le **Tableau 3-1** ci-dessous propose une comparaison synthétique entre les **BLEVE "froids"** et **"chauds"** d'après [INERIS-DRA-2002].

TABEAU 3-1 : COMPARAISON ENTRE BLEVE "CHAUD" ET BLEVE "FROID".

	BLEVE "chaud"	BLEVE "froid"
Instants initiaux	1. Température du Liquid initialement au-dessus de la température limite surchauffe 2. Le réservoir se rompt localement 3. Formation d'un jet 4. Dépressurisation 5. Remontée en pression du réservoir du fait de l'ébullition 6. Ruine du réservoir	1. Liquide en dessous de la limite de surchauffe. 2. Ruine du réservoir due à des effets essentiellement mécaniques
Durée entre la rupture initiale et le rejet à caractère explosif	Quelques dixièmes de secondes après la formation d'une fissure de 20 cm	Quelques centièmes de secondes
Géométrie du réservoir après le BLEVE	Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles	Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles
Mode de rejet	Tout ou majeure partie du liquide est vaporisée instantanément	Une partie du liquide se vaporise instantanément, le reste est dispersé sous forme de gouttelettes

Boule de feu	Boule de feu classique ascendante	Nuage d'aérosol en feu au niveau du sol avec une boule de feu ascendante
Effets de surpression	Le bruit de l'onde de choc suggère d'importantes surpressions	Apparaissent relativement réduits d'après le niveau sonore de ce type de BLEVE
Projectiles	De grandes pressions de rupture ont le potentiel d'envoyer des projectiles sur d'importantes distances	Les faibles pressions de rupture limitent probablement la distance parcourue par les projectiles
Conditions nécessaires	Liquide chaud et rupture locale afin de déclencher une explosion par surchauffe	Réservoir peu résistant conduisant à sa ruine totale

3.3.2 Effets du BLEVE

a) Thermique :

Les effets thermiques sont liés aux rayonnements thermiques de la boule de feu. Quand un produit inflammable est exposé lors d'un BLEVE, la boule de feu peut avoir des conséquences assez importantes (effet thermique radiatifs). Plusieurs théories, pour déterminer les effets des boules de feu, ont été établies mais elles ont toutes la même démarche qui sont la suivante [[Anousone ; 2014](#)] :

- ❖ Détermination du diamètre de la boule ;
- ❖ Détermination de la durée de combustion de la boule ;
- ❖ Estimation de l'élévation de la boule de feu ;
- ❖ Calcul de la densité de flux thermique radiatif reçue par une personne exposée au rayonnement ;
- ❖ Détermination des effets sur l'homme.

b) Surpression :

D'une part non négligeable de l'énergie initialement présente étant absorbée par l'émission de projectiles, seule une fraction de l'énergie est disponible pour la propagation de l'onde de pression [[Hellas, M.S., Chaib, R. 2021a](#)], 2021b due à la détente brutale du volume de gaz brûlé à une pression égale à la pression statique de rupture du réservoir. La détermination de la surpression engendrée par une explosion au moyen d'une méthode simple est un problème qui n'est pas résolu à l'heure actuelle. Aussi, la sélection d'un des modèles de la littérature n'est pas triviale."

- ❖ D'après des enregistrements de la surpression engendrée par un BLEVE, trois pics ont été mis en évidence :
- ❖ Première phase : détente brutale
- ❖ Deuxième phase : vaporisation explosive du liquide (selon Shield) / premier et deuxième phase associés au même phénomène (selon Birk)
- ❖ Troisième phase : combustion de la boule de feu

c) Missile :

Lors de la rupture d'un réservoir des fragments peuvent être projetés à des distances élevées [[CRC : 2009](#)].

3.3.3 Causes du BLEVE

Trois principales causes du BLEVE ont été identifiées, dont deux sont liées à des agressions externes :

1. **Un impact mécanique** par exemple à **un choc** (accident de la circulation d'un camion-citerne,) ou à une **fragilisation** (corrosion,). Plus de 20% des incidents étaient causés par des dommages mécaniques.
2. **Une agression thermique ou un chauffage externe** (exemple, à un excès de pression du a un incendie voisin entraînant une rupture du métal sous l'action de la chaleur). Ce type de causes contribuent par 50% des accidents **BLEVE**.
3. **le sur remplissage du réservoir** une montée en température entraîne la dilatation du liquide à l'intérieur, qui peut aller jusqu'à la disparition complète de la phase gazeuse : c'est le phénomène de plein hydraulique. La pression monte alors extrêmement rapidement dans le réservoir et entraîne sa rupture, mais la température peut être encore bien plus basse que la TLS à pression atmosphérique. et dans ce contexte, l'absence d'un dispositif de décharge de surpression était un facteur contributif.

Il est clair que le chauffage externe et les dommages mécaniques sont les plus courants d'un part, et les accidents provoqués par le sur remplissage conduisent souvent à un nombre élevé de morts d'autre part [Comité Français ; 2010]. (**Tableau 3-2**)

TABEAU 3-2 : CAUSES DE BLEVE

Nature du réservoir	Impact mécanique	Agression thermique	Sur remplissage du réservoir
Sphère	BLEVE « froid »	BLEVE « chaud » ou « froid »	BLEVE « froid »
Wagon citerne		BLEVE « chaud »	
Camion-citerne		BLEVE « chaud »	
Réservoir petit vrac (cylindre)		BLEVE « chaud » ou « froid »	
BLEVE		BLEVE « chaud »	

3.3.4 Conséquences du BLEVE

Si la substance impliquée en cause n'est pas combustible, l'onde de pression et les missiles seront les seuls effets de l'explosion. Cela pourrait se produire si une chaudière à vapeur (vapeur d'eau) explosait. Toutefois, si la substance est un combustible, comme c'est souvent le cas dans l'industrie de transformation (par exemple, le **GPL** ou l'éthylène), le mélange liquide/gaz libéré par l'explosion s'enflammera probablement, donnant naissance à une boule de feu de forme approximativement hémisphérique, initialement au niveau du sol. La (Figure 3-2) suivante montre les différents effets engendrés par le **BLEVE** :

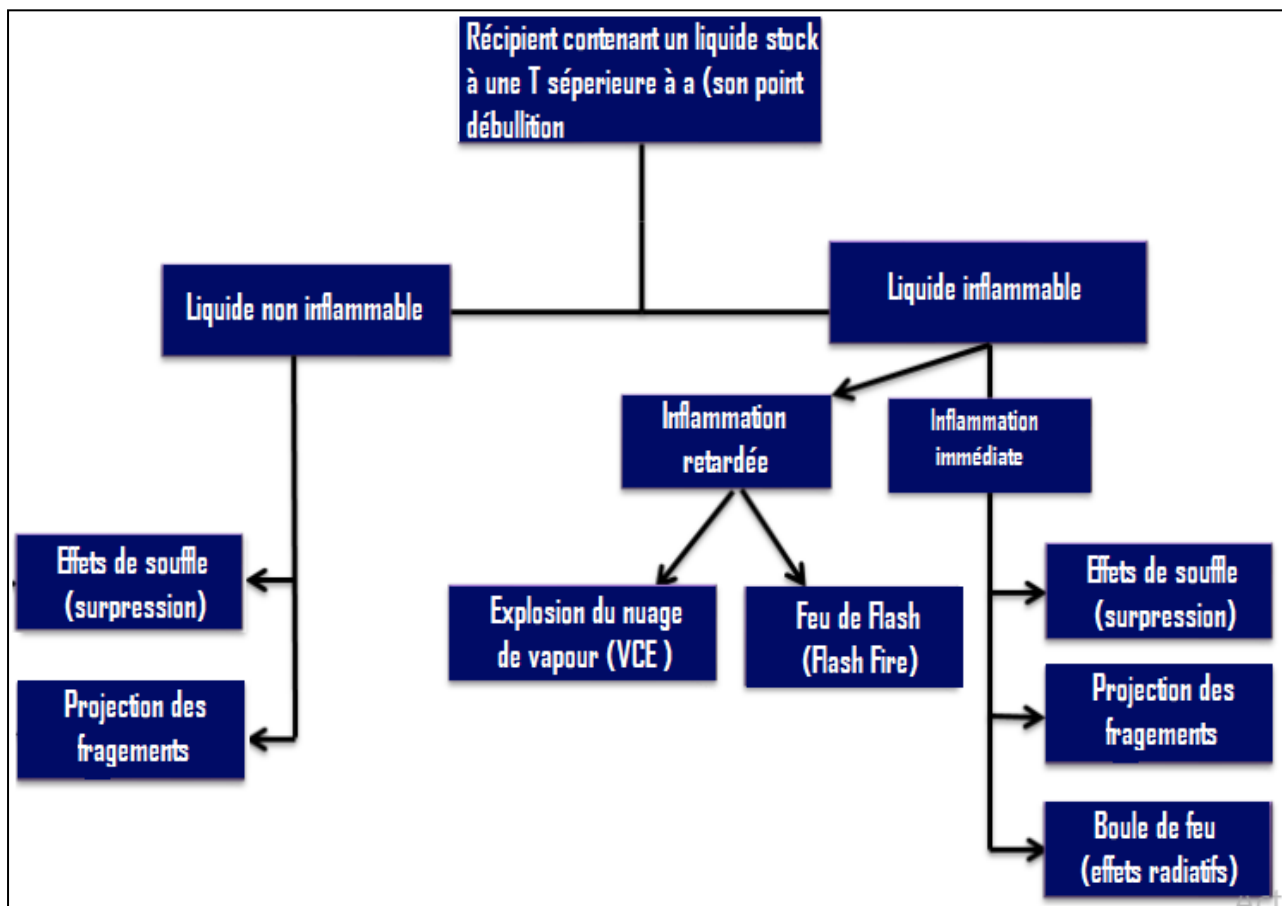


FIGURE 3-2 : SCHEMA GLOBAL DES EFFETS DU BLEVE

3.4 Modélisation de l'effet de surpression

Il existe plusieurs méthodes pour l'estimation des surpressions aériennes dues aux explosions. Les plus utilisées sont [CPR 18E, 1999], [Mannan, 2012] et [CPR 14E, 1999] :

- le modèle TNO Multi-énergie, pour des explosions confinées ou non confinées (UVCE) ;
- l'équivalent TNT, pour des explosions confinées ;
- la méthode de Strehlow-Baker, pour des explosions thermiques exclusivement.

Vu les propriétés du phénomène BLEVE qui n'est pas une explosion exclusivement thermique, on s'intéresse dans ce mémoire à la présentation et l'application des deux premières méthodes.

3.4.1 Modèle TNO Multi-énergie

Le principe de ce modèle, développé par l'organisation TNO, [Hellas, M. S., Chaib, R., & Verzea, I. 2020b], est d'accumuler la masse participante à l'explosion, évaporée dans un environnement plus ou moins encombré. La méthode conduit, en quatre étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange explosif.

Calcul du rayon caractéristique

$$\bar{R} = R (E / P_0)^{1/3} \quad (1)$$

- E est l'énergie d'explosion (J)
- $\bar{R}$ distance mise à l'échelle pour TNO Multi-Energy (-)
- P_0 est la pression atmosphérique en Pascal (101325 Pa).
- R la distance entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en (m).

Ce modèle repose sur le principe selon lequel seules les zones encombrées sont susceptibles de générer des effets significatifs de surpression. La violence de l'explosion est alors caractérisée par un degré/indice de sévérité variant de 1 à 10, chaque degré faisant en fait référence à un niveau de surpression maximale atteinte dans le nuage inflammable.

Une estimation sûre et conservatrice de l'indice de sévérité pour une explosion forte (détonation) peut être faite si l'on suppose une sévérité maximale de 10 (c.-à-d. pour une explosion confinée, le degré est fixé à 10). Cependant, un degré de 7 semble représenter avec plus de précision les expériences réelles. De plus, pour des distances réduites supérieures à 0.9 (surpressions réduites inférieures à 0.5 bar), il n'y a pas de différence dans la surpression prédite pour les indices de sévérité allant de 7 à 10 puisque les courbes de surpression convergent vers la courbe 10 (cf. **Figure 3-3**). L'explosion résultant des parties non confinées et non obstruées (non encombrées)

Restantes d'un nuage peut être modélisée en supposant un faible degré de sévérité. Pour les parties étendues et au repos, une sévérité minimale de 1 est recommandée [SAFEGE, 2013], [Champassith, 2014].

✚ Détermination de la distance réduite

D'après TNO, la distance réduite $\bar{R}$ déterminée à partir des courbes Multi-énergie présentées à la **Figure 3.3**

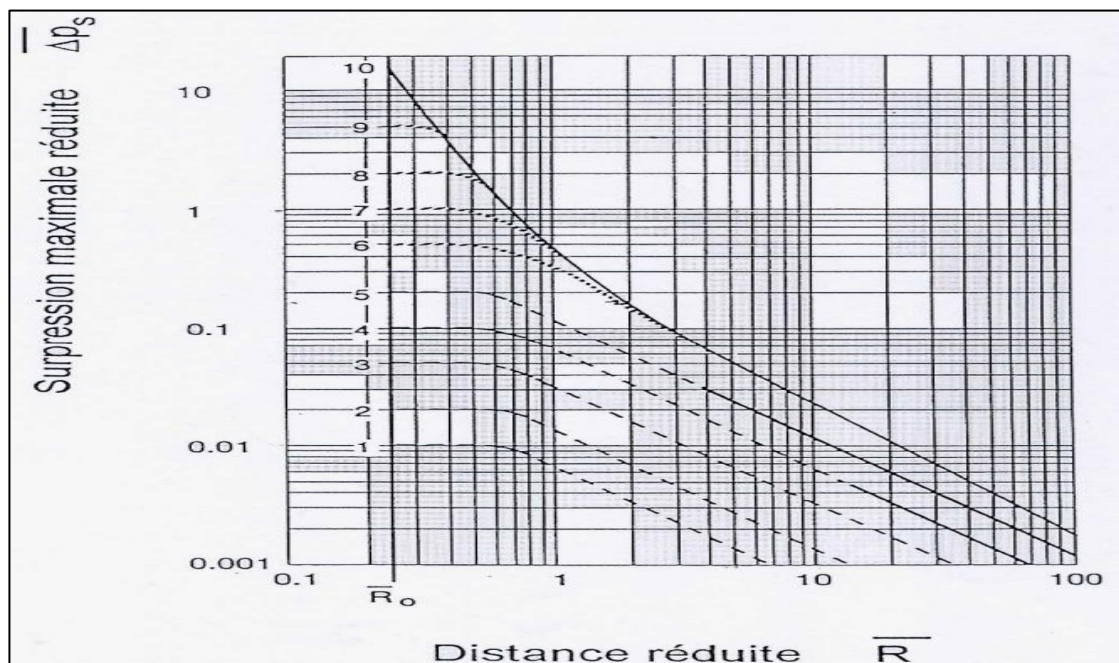


FIGURE 3-3 : COURBES MULTI-ENERGIE DONNANT LA SURPRESSION EN FONCTION DE LA DISTANCE REDUITE [INERIS, OMEGA, 2002]

Le **Tableau 3-3** ci-dessous présente la correspondance entre les surpressions maximales et les indices de sévérité (compris entre 1 et 10).

TABLEAU 3-3 : CORRESPONDANCE ENTRE LES SURPRESSIONS MAXIMALES ET LES INDICES DE SEVERITE

Indice de sévérité	Surpression max correspondante (mbar)
1	10
2	20
3	50
4	100
5	200
6	500
7	1 000
8	2 000
9	5 000
10	10 000

Pour les explosions de gaz à l'air libre ou UVCE modélisées à travers un modèle Multi-énergie, le choix du degré de sévérité peut se faire à l'aide la méthode de KINSELLA qui se présente sous la forme d'un tableau présenté ci-dessous (cf. **Tableau 3-4**). Le degré de sévérité peut être estimé en fonction de 3 paramètres, à savoir : l'énergie d'inflammation, le degré de confinement et le degré d'encombrement [SAFEGE, 2013].

TABLEAU 3-4 : GRILLE DE KINSELLA

Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
Faible	Fort	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	⊙	⊙			⊙		7 à 10
	⊙	⊙				⊙	7 à 10
⊙		⊙			⊙		5 à 7
	⊙		⊙		⊙		5 à 7
	⊙		⊙			⊙	4 à 6
	⊙			⊙	⊙		4 à 6
⊙		⊙				⊙	4 à 5
	⊙			⊙		⊙	4 à 5
⊙			⊙		⊙		3 à 5
⊙			⊙			⊙	2 à 3
⊙				⊙	⊙		1 à 2
⊙				⊙		⊙	1

Le choix de l'indice de sévérité est la phase la plus délicate de la méthode Multi-énergie puisqu'il n'existe pas aujourd'hui de méthode consensuelle. La méthode la plus couramment utilisée est celle de KINSELLA.

3.4.2 Modèle équivalent TNT

Le principe du modèle équivalent TNT est de rapporter l'énergie de l'explosion à une masse équivalente de TNT, pour laquelle on peut faire un lien entre la surpression engendrée par l'explosion et la distance au centre de l'explosion.

Le modèle conduit, en trois étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable [CCPS, 2010].

- 1^{ère} étape : estimer la masse de TNT (M_{TNT}) ;
- 2^{ème} étape : à l'aide d'abaque, rechercher la valeur de la surpression en fonction de la distance de la source de danger à un point d'impact donné (Figure 3-4).

La méthode est basée sur le diagramme empirique de Brasie & Simpson, Figure 3-4 [CPR., 1997] et la surpression P_s (bar) est déterminée en fonction d'une distance réduite (scaled distance) Z ($m / kg^{1/3}$), définie par l'équation (2) :

$$Z = X / M_{TNT}^{1/3} \quad (2)$$

Où : M_{TNT} est la masse de TNT et calculé comme suit :

$$M_{TNT} = \frac{f \times \Delta H \times M}{M_{TNT}} \quad (3)$$

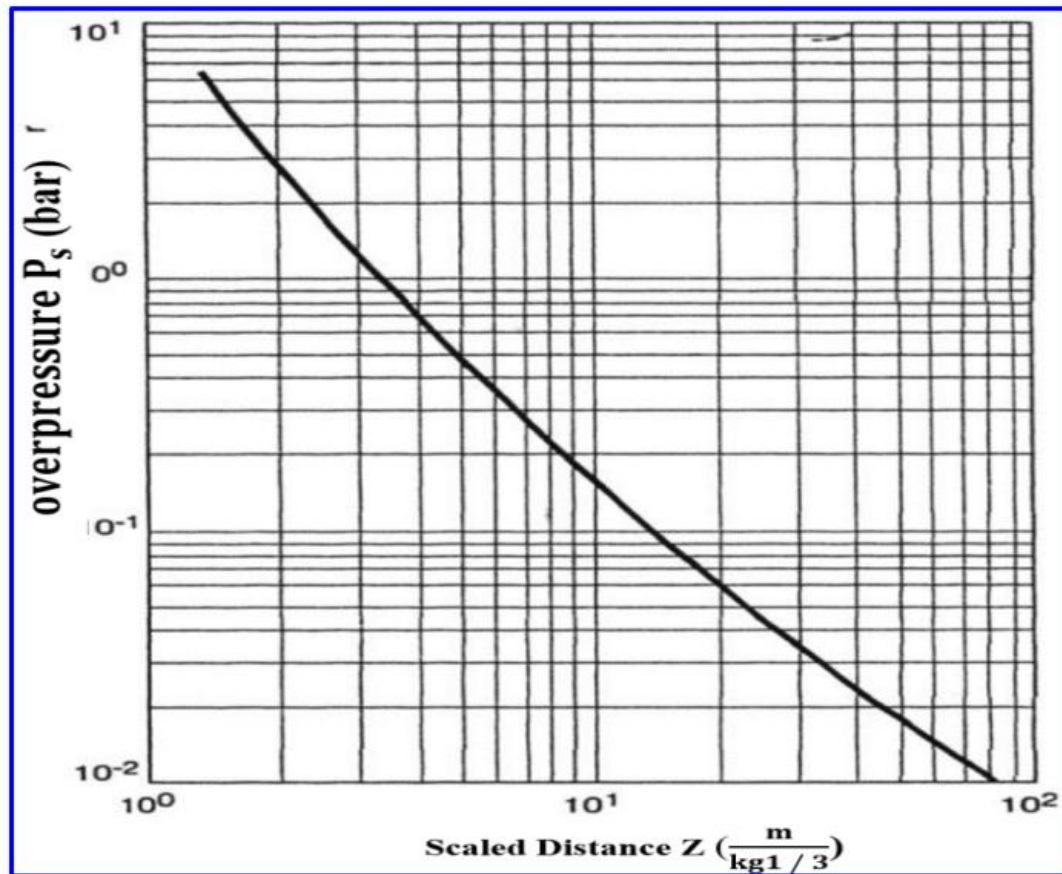


FIGURE 3-4 : LA SURPRESSION EN FONCTION DE LA DISTANCE REDUITE (TNT). [CPR., 1997]

3.5 Les seuils de surpression

Dans cette étude, on utilise les seuils de surpression adoptés par le Groupe SONATRACH (cf. **Tableau 3-5**) pour quantifier et discuter des effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les structures.

TABLEAU 3-5 : VALEURS DE REFERENCE RELATIVES AUX SEUILS D'EFFETS DE SURPRESSION.

Seuils		Effets / Dommages
Effets dominos	160 mbar	Premiers dégâts aux structures (effet domino)
	300 mbar	Dégâts graves aux structures
Effets sur l'homme	25 mbar	Dommages graves
	50 mbar	Dommages irréversibles ou létaux

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de décrire les fondements de base relatifs au phénomène **BLEVE**. Ensuite, nous avons présenté les deux principaux modèles permettant d'analyser les effets de surpression associés à ce phénomène. Dans un but de validation des modèles proposés, nous présenterons dans le chapitre suivant une application à un système industriel au niveau de la zone industrielle de **Hassi R'mel** (Accumulateur de propane réfrigérant **V302**).

Chapitre 4

Application des modèles proposés à un système opérationnel

Sommaire

4.1	.....	Introduction
4.2	.....	Présentation de la région de Hassi R'mel
4.3	.....	Présentation du site d'étude « Phase Commune B »
4.3.1	.....	Différentes sections du commun
4.3.2	.....	Description du procédé de la Phase B
4.4	.....	Présentation du système étudié : Ballon de propane V302
4.5	.....	Identification des scénarios de dangers
4.6	.....	Analyse quantitative de l'effet de surpression
4.6.1	.....	Scénario d'accident : défaillance au niveau du ballon de propane V302
4.6.2	.....	Données d'entrée et conditions initiales
4.6.3	.....	Résultats et discussion
4.6.3.1	.....	Simulation à l'aide du modèle TNT
4.6.3.1	.....	Simulation à l'aide du modèle TNO
4.7	.....	Comparaison des simulations précédentes
4.8	.....	Conclusion

Chapitre 4: Application des modèles proposés à un système opérationnel

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application des modèles de quantification de l'effet de surpression engendré par le BLEVE au niveau de la zone industrielle de Hassi R'mel (particulièrement au système "Accumulateur de propane réfrigérant V302" situé à la Phase Commune B) au sein de l'entreprise **SONATRACH-DP**. En se référant à l'analyse dysfonctionnelle par HAZOP révélant que l'événement redouté pour le V302 est le phénomène BLEVE, notre choix s'est porté sur ce système qui fera l'objet d'une étude de cas réel.

Les résultats de simulation sont obtenus moyennant le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool), outil très performant d'analyse des conséquences développé par DNV.

4.2 Présentation de la région de Hassi R'mel

La région de Hassi R'mel possède environs 2.4 % des ressources mondiales en gaz naturel. L'Algérie se place en 11ème rang des pays producteurs du gaz, elle satisfait ses besoins et ceux d'une partie de l'Europe en gaz sec, le GPL et le condensât qui sont des produits de qualité, subissant des traitements au niveau des raffineries avant d'être vendus ou envoyés vers l'industrie pétrochimique.

Hassi R'mel se trouve à 550 km au sud de la capitale à une altitude moyenne de 760 m (cf. [Figure 4-1](#)). Elle est située au sein de la région administrative de la wilaya de Laghouat à environ 40 kilomètres à l'ouest de Berriane, 60 kilomètres au nord-ouest de Ghardaïa et 130 kilomètres au sud-est de Laghouat.

La région HRM est un champ qui produit le gaz sec, le GPL et le condensât avec une activité secondaire qui consiste à produire le pétrole. Le champ de Hassi R'mel est divisé en trois zones de production, comme le montre le [Tableau 4-1](#).

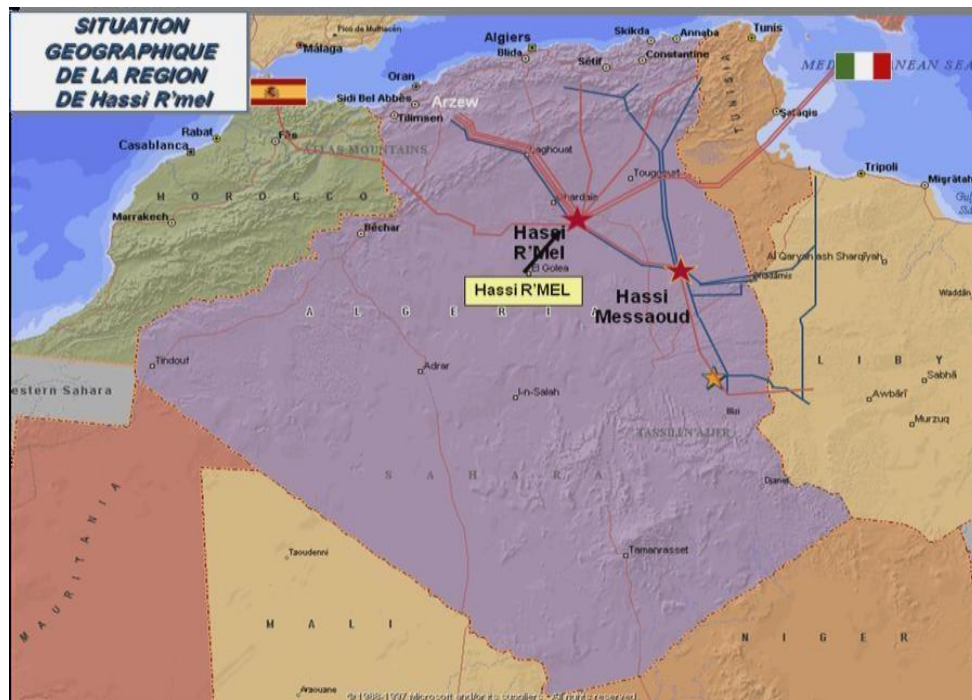


FIGURE 4-1 : REPRESENTATION DE LA POSITION GEOGRAPHIQUE DE HASSI R'MEL

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ HRM est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum du liquide. Les cinq modules de traitement de gaz (0, 1, 2, 3, et 4) sont disposés d'une manière alternée par rapport aux deux stations de compression tel que présenté sur la [Figure 4-2](#).

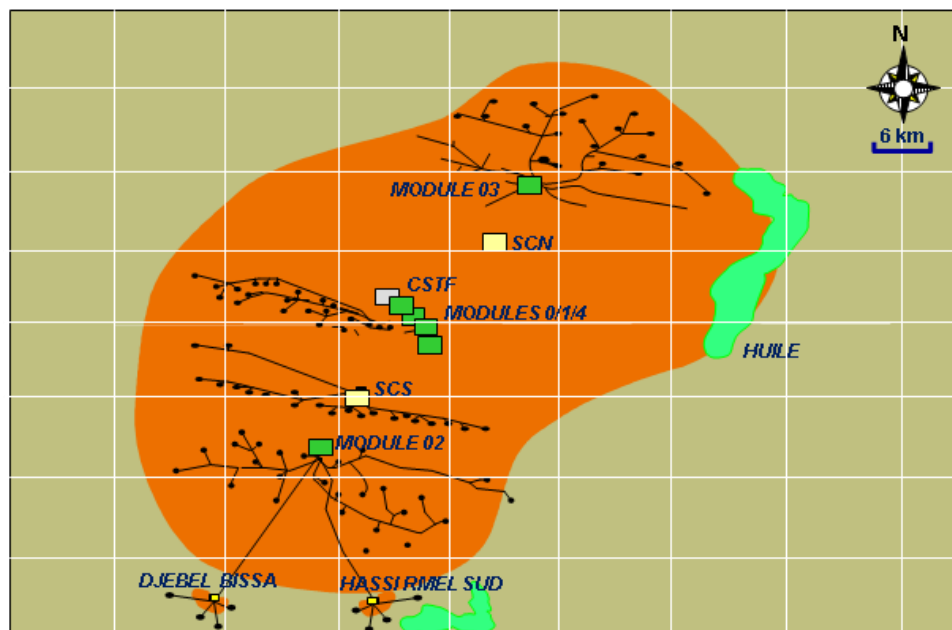


FIGURE 4-2 : CHAMP DE HASSI R'MEL

TABLEAU 4-1 : UNITES DE LA REGION DE HASSI R'MEL

Zones	Unités
Zone nord	- Module de traitement de gaz brut (MPP3) - Station de déshuilage - Station de Réinjection Nord (SC-Nord) - Centres de traitement d'huile (CTH2, CTH4) - Centre de stockage et de prélèvement butane (NAFTAL) - Centrale électrique (SONELGAZ)
Zone centre	- Modules de traitement de gaz brut (MPP0, MPP1 et MPP4) - Station de Boosting gaz Centre (SBC) - Centre de stockage et transfert du GPL et condensat (CSTF) - Communs (Phase B de MPP0 et MPP1) - Station de compression des gaz associés (SRGA) - Centres de traitement d'huile CTH1-CTH3 - Centre national de dispatching de gaz (CNDG) - Station de compression de gaz GR1/GR2 - Station de compression de gaz (GR3) - Station de pompage (SP4) - Centre de stockage et de prélèvement butane et propane (NAFTAL) - Centrale électrique (SONELGAZ) - Station d'épuration (STEP) - Station de déshuilage
Zone sud	- Modules Traitement de gaz brut (MPP2, DJB et HRSUD) - Station de réinjection gaz HP (SC-Sud) - Unité de traitement d'huile CTH- Sud) - Station de déshuilage

4.3 Présentation du site d'étude « Phase Commune B »

Cette installation a été construite dans le cadre de la **Phase B** du **module 1** et **0**. Son rôle est de maintenir les modules en exploitation grâce à un circuit de réfrigération au propane pour une meilleure récupération du GPL et du condensât.

La mise en marche de la **Phase B** a permis de faire une meilleure production avec une récupération des produits torchés auparavant. Grâce à la boucle de propane qui donne une bonne réfrigération, le condensât est stabilisé et le GPL est récupéré pour la production du propane et du butane. Les C₂ sont déshydratés et comprimés pour être réinjectés dans le pipeline d'expédition. L'unité de la Phase B est alimentée par trois lignes, deux provenant du **module 0** et l'autre du **module 1**.

4.3.1 Différentes sections du commun

Les principales parties de production de la Phase B sont :

- La partie de production du propane qui comprend une colonne de séparation de propane et des auxiliaires pour la production et le stockage de propane réfrigérant et aussi le GPL.
- La partie de réfrigération (trois compresseurs propane dont un de réserve).
- Une partie de régénération du Glycol avec contacteur Gaz Glycol.

4.3.2 Description du procédé de la Phase B

Le gaz en provenance des trois dééthaniseurs (T 201-1, 2, 3) du module 1 est envoyé vers le contacteur Glycol/Gaz T330. La teneur en eau dans ce gaz est réduite à moins de 50 ppm en volume à la sortie de ce contacteur par contact à contre-courant, avec une solution TEG concentrée (Glycol). Ensuite, le gaz sortant de ce contacteur T330 passe par le séparateur du Glycol V330 afin de retenir tous entraînement de TEG avant d'être comprimé et injecté dans le pipeline du gaz de vente. Le Glycol dilué s'écoule vers le système de régénération.

Ainsi, le gaz en provenance des deux dééthaniseurs (T401-1 et 2) du module 0 passe par un circuit parallèle identique au premier circuit précédemment cité.

Une fois déshydraté, les gaz des deux modules sont collectés dans les ballons d'aspiration V308, d'où une partie est prélevée pour être utilisée comme combustible pour les modules 0, 1 et les installations communes. L'autre partie est comprimée dans les compresseurs des vapeurs de tête

C302A/B, puis refroidie dans l'aéroréfrigérant E304 à environ 60 °C. Après sa déshydratation et sa compression, ce gaz est dirigé vers les deux modules (0 et 1) pour être mélangé avec le gaz de vent.

4.4 Présentation du système étudié : Ballon de propane V302

Le ballon V302 fait partie de la boucle de propane des communs qui assure l'alimentation en propane réfrigérant nécessaire pour la réfrigération des têtes des dééthaniseurs des modules MPP-0 et MPP-1 ainsi que pour le traitement du gaz brut de ces modules (cf. **Figure 4-3**). Ce ballon est choisi sur la base de son volume et de sa pression opératoire qui sont importants.

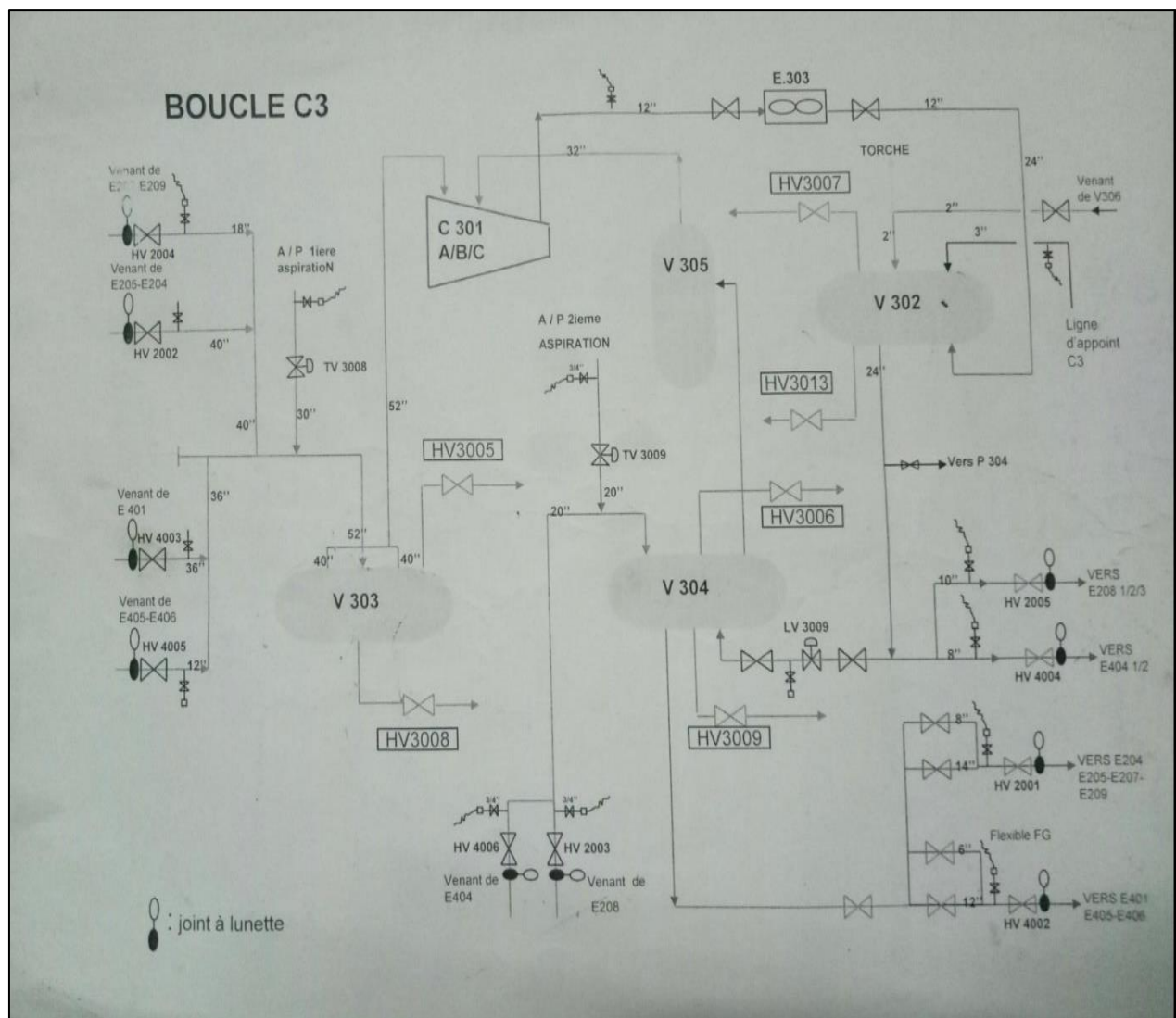


FIGURE 4-3 : BOUCLE DE PROPANE DE LA PHASE COMMUNE B

Les caractéristiques techniques et opératoires du ballon V302 sont reprises dans le **Tableau 4-2**.

TABLEAU 4-2 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU BALLON V302 [SONATRACKH ; HSR]

Caractéristiques	Valeurs
Type d'installation	Accumulateur de propane réfrigérant
Substance	Propane
T service (°C)	50
T calcul (°C)	80
P service (barg)	20
P d'épreuve (barg)	42
Volume (m ³)	209.6.
Densité (kg/m ³)	431.6

Le ballon accumulateur de propane réfrigérant V302 est doté des accessoires suivants :

- LAH3006 : alarme de niveau haut reportée en salle de contrôle ;
- LAHH3057 : alarme de niveau très haut reportée en salle de contrôle ;
- LSHH3057 : switch de niveau très haut qui déclenche le compresseur ;
- PAHH3004 : alarme de très haute pression (consigne 25 barg) ;
- HV3001 : vanne commandée à distance pour décharge vers torche ;
- PSHH3004 : alarme de très haute pression reportée en salle de contrôle ;
- PSV3003 : soupape de décharge vers torche s'ouvre à 28 barg ;
- PAL3004 : alarme de basse pression reportée en salle de contrôle ;
- LAL3006 : alarme de bas niveau reportée en salle de contrôle ;
- LSL3006 : switch de bas niveau qui déclenche les pompes P304A/B.

4.5 Identification des scénarios de dangers

Dans cette étude, l'identification des scénarios dangereux liés au ballon V302 est faite à l'aide de la méthode **HAZOP**. Un exemple des déviations relatives au paramètre pression est donné par le **Tableau 4-3**.

TABLEAU 4-3 : APPLICATION DE LA METHODE HAZOP : CAS DU PARAMETRE "PRESSION"

Paramètre	Mot-clé	Déviations	Causes possibles	Conséquences possibles	Sécurités existantes	Recommandations
Pression	Plus	Haute pression	– Feu de la zone des ballons V302, V303 et V304	– Fuite du propane au niveau de la partie vapeur suivie par une rupture catastrophique des ballons – Explosion (BLEVE) des ballons avec nombreuses fatalités (suite à l'ignition immédiate)	– Opérateurs – Décompression par HV3013 et HV3007 pour le V302 – Décompression par HV3005 et HV3008 pour le V303 – Décompression par HV3009 et HV 3006 pour le V304 – PSV sur chaque capacité vers torche – Equipe d'intervention sur site – Détecteurs de gaz dans la zone de la sphère – Moyens de lutte contre incendie (fixes et mobiles) – Plans d'urgence (POI, PPI, ORSEC, etc.)	– Assurer une bonne formation pour l'équipe d'intervention sur les techniques d'atténuation des effets générés par ces phénomènes – Voir la pertinence d'installer des détecteurs de flamme dans la zone des ballons V302, V303 et V304 qui déclenchent un système de déluge – Voir la pertinence d'ignifuger les parois des V302, V303 et V304 pour retarder les affects d'un éventuel feu sur les capacités

On constate clairement à travers cette analyse que plusieurs incidents et/ou accidents peuvent avoir lieu, et que l'événement le plus redouté dans le cas de l'accumulateur de propane V302 est le phénomène BLEVE. Dans ce qui suit, on procédera à une étude d'impact de ce phénomène.

4.6 Analyse quantitative de l'effet de surpression

4.6.1 Scénario d'accident : défaillance au niveau du ballon de propane V302

Pour l'analyse de ce scénario, on considère une rupture catastrophique au niveau de l'accumulateur de propane V302. Ce dernier est choisi sur la base de son volume et de sa pression opératoire. La hauteur de libération a été prise à 1 mètre.

La modélisation de l'effet de surpression est élaborée à l'aide du code PHAST 6.5 [DNV Software, 2006] qui est un logiciel très utilisé dans le secteur chimique et pétrochimique. A noter que la simulation avec le code PHAST a été effectuée au cours du stage pratique au niveau de la Division Production SONATRACH HRM. L'ANNEXE détaille la méthodologie de calcul des conséquences avec ce code.

4.6.2 Données d'entrée et conditions initiales

Dans cette étude, les simulations ont été effectuées en utilisant les données d'entrée présentées dans le **Tableau 4-4**. Les résultats sont indépendants des conditions météorologiques.

TABLEAU 4-4 : DONNEES D'ENTREE POUR LE PHAST

Caractéristiques		Valeurs
Paramètre communs	Substance	Propane
	Température de service	50 °C
	Pression de service	20 barg
	Masse	90463.3 kg
	Scénario	Rupture catastrophique
	Élévation de point de rupture	1 m
Equivalent TNT	Rendement	4%
TNO Multi-énergie	Degré de sévérité	4

4.6.3 Résultats et discussion

4.6.3.1 Simulation à l'aide du modèle TNT

La **Figure 4-4** montre les distances d'effets de surpression associées au phénomène de BLEVE suite à une rupture catastrophique du ballon V302. Les contours d'effets des différents seuils références issus du modèle TNT sont illustrés sur la carte satellite du complexe industriel RM.

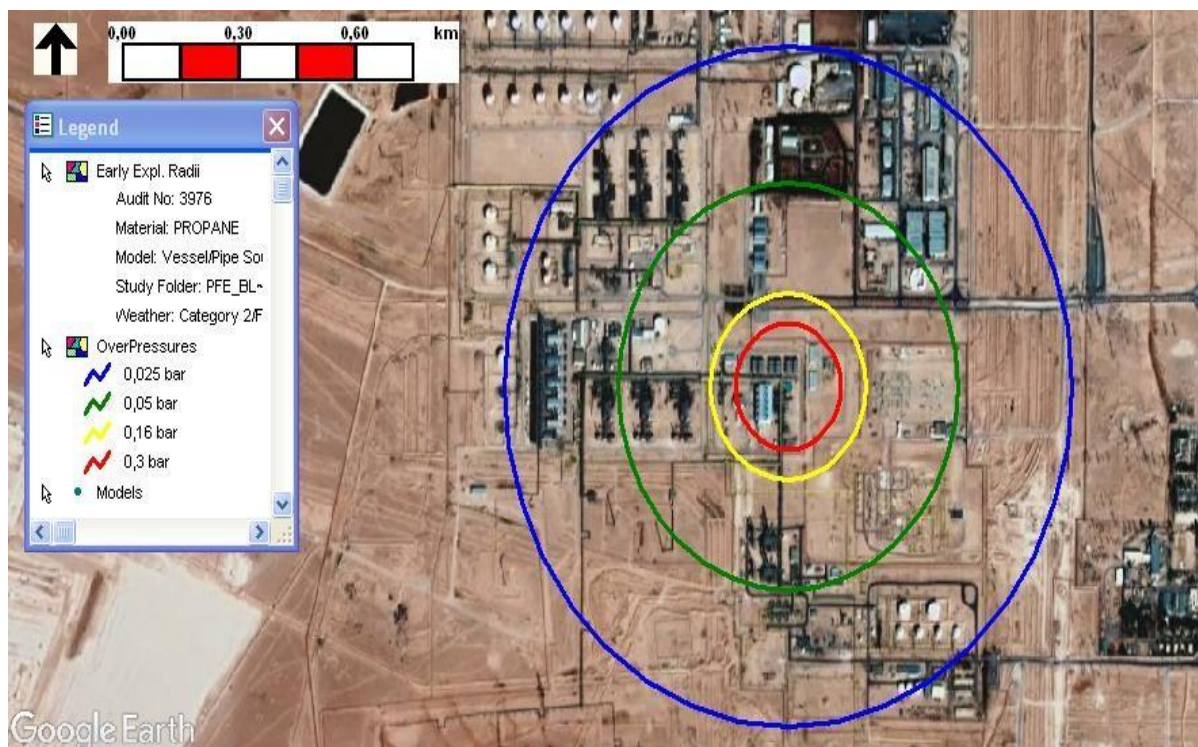


FIGURE 4-4 : CONTOURS D'EFFETS DE SURPRESSION OBTENUS A L'AIDE DE L'EQUIVALENT TNT

En se basant sur ces résultats, on constate que pratiquement tous les opérateurs de Phase B ainsi que ceux travaillant au niveau des trains des modules MPP-0 et MPP-1 sont exposés à des effets corporels irréversibles/létaux (rayon d'effet atteint les 436 m pour le seuil 50 mbar). Ainsi, la majorité des équipements de la Phase B (3 turbocompresseurs de propane, 6 ballons pressurisés de propane, unité Glycol, blocs d'aéroréfrigérants, salle de contrôle, blocs administratifs) sont exposés à des dégâts matériels significatifs avec des effets dominos générés par le BLEVE (distance d'effet atteint les 199 m pour le seuil 160 mbar, cf. [Tableau 4-5](#)).

Suite aux effets dominos, il est possible d'avoir une perte de confinement de certains équipements suivi par l'ignition immédiate des produits inflammable relâchés. En effet, ce phénomène est un évènement de caractère soudain et les possibilités d'intervention après son occurrence sont limitées. Par conséquent, il est nécessaire de renforcer les barrières et les mesures préventives afin d'empêcher la survenance de tel évènement.

4.6.3.2 Simulation à l'aide du modèle TNO

Les résultats de la simulation du phénomène BLEVE sur la base du modèle TNO Multi-énergies sont présentés à la [Figure 4-5](#) en prenant en considération les différents seuils références de surpression.

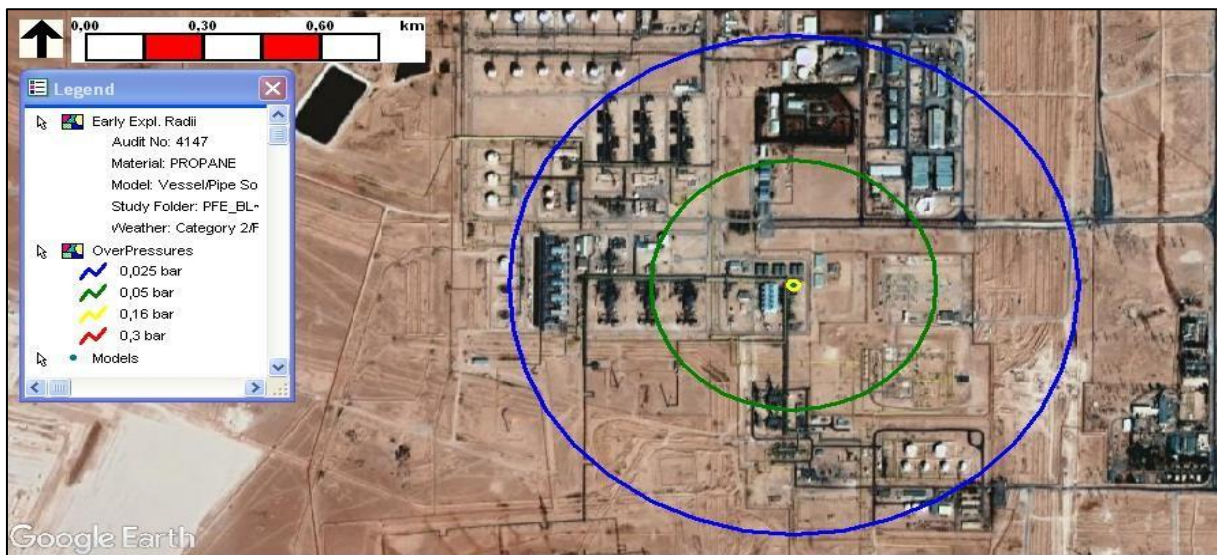


FIGURE 4-5 : CONTOURS D’EFFETS DE SURPRESSION OBTENUS A L’AIDE MODELE TNO MULTI-ENERGIE

Comme le montre la **Figure 4-5**, tous les opérateurs de la Phase B et ceux travaillant au niveau des trains adjacents des modules MPP-0 et MPP-1 sont exposés à des effets irréversibles/létaux (rayon d’effet atteint les 396 m pour le seuil 50 mbar). Cependant, les prédictions de ce modèle montrent que l’effet domino est très faible vis-à-vis de ce scénario.

4.6.4 Comparaison des simulations précédentes

Le **Tableau 4-5** présente une comparaison entre les prédictions des modèles TNT et TNO pour les distances d’effets associés aux différents seuils références. Les résultats montrent clairement une convergence (similarité) entre les prédictions des modèles et les données de l’étude de danger fournies par la SONATRACH HRM pour les seuils d’effets sur l’homme [[SONATRACH](#), [HSR](#)].

TABLEAU 4-5 : RESULTATS DE LA MODELISATION OBTENUS PAR PHAST

Seuils de surpression	Distances d’effet (m)	
	Modèle TNT	Modèle TNO
25 mbar	730	720
50 mbar	436	396
160 mbar	199	
300 mbar	135	

- Au contraire des résultats obtenus à partir du modèle TNT, les résultats issus du modèle Multi-énergie montrent que l'effet domino est uniquement limité aux équipements adjacents du ballon V302 (rayon d'effet de quelques mètres). En effet, ce résultat est dû à la prise en compte des obstacles et du degré de confinement dans le modèle TNO. En se basant sur ce résultat, on peut dire que le modèle TNO est le plus proche à la réalité et à la physique de propagation de l'onde de choc dans les sites industriels complexes (encombrés), tandis que l'équivalent TNT surestime la surpression à cause de la subjectivité dans l'estimation du rendement de l'explosion et de sa simplicité (supposant que l'explosion se propage dans un environnement constitué par une surface horizontale sans obstacles).
- Par ailleurs, il y a un certain degré de difficulté dans l'application de ces méthodes. Dans le cas de la méthode d'équivalent TNT, il est nécessaire de spécifier un rendement d'explosion et le résultat changera en fonction de la valeur sélectionnée. Dans la méthode Multi-énergie, le degré de sévérité initial doit être choisi en fonction du degré de congestion dans la zone ou des zones couvertes par le nuage inflammable.
- En effet, il est difficile de comparer les résultats des deux méthodes, car elles sont fonction de l'hypothèse susmentionnée. Cependant, plusieurs auteurs ont tenté de faire une comparaison en appliquant les méthodes à un cas donné [Casal, 2008], Dans notre cas, les méthodes d'équivalent TNT et Multi-énergie ont été comparées avec l'hypothèse suivante : rendement de 4% pour la méthode TNT et degré de sévérité de 4 pour la méthode TNO.

4.7 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons opté pour une approche quantitative d'évaluation des conséquences qu'on a appliquée à un système opérationnel (Accumulateur de propane **V302**). Cette application nous a permis de montrer l'impact des conséquences dangereuses engendrées par l'effet de surpression du BLEVE et de visualiser les différents contours d'effets associés en utilisant le logiciel **PHAST 6.5**. De plus, une comparative entre des prédictions des modèles a été réalisée.

Conclusion générale

Il ne fait aucun doute que l'explosion qui s'est le risque majeur pour l'industrie de pétrole et gaz qu'il faut le prendre en charge convenablement. En effet, lorsque les mesures sécuritaires (de prévention et/ou protection) efficaces ne sont pas prises, ils peuvent enregistrer des catastrophes avec des dégâts immenses. Sachant que ces explosions peuvent survenue selon plusieurs phénomènes dangereux selon les circonstances de l'accident comme par exemple, le BLEVE, VCE, Pool de feu.....etc.

Dans le cadre de ce mémoire de master académique, nous avons abordé la problématique d'Analyse quantitative de risque pour protéger les entreprises pétrolières et pétrochimiques, Et pour illustrer notre démarche de modélisation, nous avons choisi le phénomène **BLEVE** (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Ainsi que l'analyse des déviations des différents paramètres de fonctionnement du ballon V302.

Le phénomène BLEVE a fait l'objet d'une présentation détaillée dans le troisième chapitre. Une attention particulière à l'effet de surpression du BLEVE est portée, car la propagation d'une onde de choc peut devenir prépondérante en termes de conséquences dans le cas d'un BLEVE issu d'un équipement de haute pression.

À cet effet, dans ce **chapitre 3** et dans notre étude, l'effet de surpression a été examiné selon deux modèles de quantification souvent utilisés, à savoir : l'équivalent **TNT** et le modèle **TNO** Multi-énergie. Le logiciel **PHAST** a été utilisé pour obtenir les différents résultats de simulation avec plus de précision. Cependant, l'emploi du PHAST présente des limites car il nécessite des données fiables et des utilisateurs apprentis afin d'obtenir des bons résultats.

Par ailleurs, l'étude comparative des résultats issus des deux modèles proposés nous a montré que le modèle **TNO** est plus ou moins proche à la réalité et à la physique de propagation de l'onde de choc dans les sites industriels encombrés, tandis que l'équivalent **TNT** surestime souvent la surpression à cause de la subjectivité dans la détermination du rendement de l'explosion et de sa simplicité (supposant que l'explosion se propage dans un environnement ouvert sans obstacles).

De plus, les résultats obtenus ont montré que l'effet de surpression peut entraîner des atteintes fatales et des dégâts catastrophiques avec des effets dominos sur des grandes superficies. C'est pourquoi il est nécessaire d'investissement en matière de réduction des risques associés à ces phénomènes, par optimisation de la performance des systèmes de sécurité existants ou l'implémentation de nouveaux systèmes plus fiables.

Perspectives

Dans cette étude, les résultats obtenus peuvent être considérés comme une première étape. Il sera nécessaire de prendre en compte, dans un travail futur, la combinaison des différents effets (thermique, surpression et missiles) afin de modéliser d'une manière plus complète les impacts du phénomène BLEVE. Ainsi, une comparaison entre différents codes numériques d'analyse des conséquences serait intéressante afin d'identifier le comportement de chacun sur la prédiction de ce type de phénomène.

Références bibliographiques

- [Anousone ; 2014] Anousone C. 2014. Exemple d'application : BLEVE - Méthodes de modélisation des effets. Technique de l'ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/risques-d-explosion-42157210/bleve-se5061/exemple-d-application-se5061niv10005.html>
- [Casal, 2008] J. Casal, Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants, Industrial Safety Series, 8 (2008).
- [CCPS, 1995] CCPS, Understanding atmospheric dispersion of accidental release, Center for Chemical Process Safety – AIChE, (1995).
- [CCPS, 2000] CCPS, Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, (2000).
- [CCPS, 2001] CCPS, Layer of protection analysis: simplified process risk assessment, (2001).
- [CCPS, 2009] CCPS, Guidelines for developing quantitative safety risk criteria, (2009).
- [CCPS, 2010] CCPS, Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards, (2010).
- [CCPS, 2014] CCPS, Guidelines for determining the probability of ignition of a released flammable mass, (2014).
- [Chakrabarty, 2016] A. Chakrabarty, S. Mannan, T. Cagin, Multiscale modeling for process safety applications, (2016).
- [Champassith, 2014] A. Champassith, BLEVE Méthodes de modélisation des effets, réf. Article : se5061, in : Techniques de l'ingénieur Risques d'explosion, Editions T.I., Paris, 2014.
- [Comité Français ; 2010] Comité Français Butane Propane, GPL carburant historique, site web www.cfbp.fr, (Date de consultation : avril 2010).
- [CPR 14E, 1999] TNO, Methods for the calculation of physical effects (yellow book): CPR 14E, (2005).
- [CPR 18E, 1999] TNO, Guidelines for quantitative risk assessment (purple book): CPR 18E, (1999).
- [CRC : 2009] LACHTAR. 2009. Sécurité des procédés chimique. Paris : CRC.
- [Desroches, 1995] Alain Desroches. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Lavoisier, France, 1995.
- [Dziubiński, 2006] M. Dziubiński, M. Frątczak, A.S. Markowski, Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19 (2006) 399- 408.
- [Griot et Ayral, 2002] Chloé Griot et Pierre-Alain Ayral. Terminologie en science du risque. Groupe des Ecoles des Mines, 2002.
- [Hellas M.S., chaïb r. (2018b)] QRA approach to model consequences of fireball accident scenarios and VCE case LPG storage tank In Aminasalgerien. International conference of energy, materials, applied energetics and pollution (ICEMAEP, 2018); 29-30 april 2018, université frères mentouri constantine1, Algérie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Hellas M.S., Chaib.R. (2020a)] Fuzzy LOPA for the evaluation of accident scenarios and risk reduction measures in supplier manner. Algerian Journal of Signals and Systems.
- [Hellas, M. S., & Chaib, R. (2021b)] Contribution à l'application des techniques de l'intelligence artificielle à l'analyse quantitative des risques industriels (Doctoral dissertation, جامعة الإخوة منتوري قسنطينة).
- [Hellas, M. S., Chaib, R., & Verzea, I. (2018a)] Quantitative risk analysis detailed study of thermal and overpressure risks case study. Journal of RECENT, 19(3), 56.
- [Hellas, M. S., Chaib, R., & Verzea, I. (2020b)] Abacus to determine the probability of death or glass breakage to the overpressure effect by two methods: TNT and TNO Multienergy. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 1. pp.239-254.
- [Hellas, M. S., Rachid, C., & Verzea, I. (2021a)] Modelling of accidental phenomena related to leakage and tank rupture of a vehicle converted to LPG. World Journal of Engineering.
- [Hellas, M.S., Chaib, R. & Verzea, I. (2019a)] Artificial intelligence treating the problem of uncertainty in quantitative risk analysis (QRA). Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 18 No. 1, pp. 40-54
- [IEC 61511, 2003] IEC 61511. Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector. International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.
- [IEC 61882, 2001] IEC 61882. Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – guide d'application. International Electrotechnical Commission (IEC), 2001.
- [INERIS DRA-35, 2003] INERIS DRA-35. Méthodes d'analyse des risques générées par une installation industrielle. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2003.
- [INERIS, OMEGA, 2002] INERIS, OMEGA 5 - Le BLEVE : phénoménologie et modélisation des effets thermiques, in, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2002.
- [INERIS-DRA-2002] INERIS-DRA-2002. BLEVE : phénoménologie et modélisation des effets thermiques. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA- 006).
- [ISO/CEI 51, 1999] ISO/CEI. Aspects liés à la sécurité - Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation, 1999.
- [ISO/CEI 73, 2002] ISO/CEI. Management du risque - Vocabulaire - Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. Organisation Internationale de normalisation, 2002.
- [Kirchsteiger, 1999] Christian Kirchsteiger. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 12, pp. 399-419, 1999.
- [Mannan, 2012] S. Mannan, Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control, (2012).
- [SAFEGE, 2013] SAFEGE, Généralités sur l'évaluation des effets de surpression liés aux phénomènes d'explosion in, SAFEGE Unité Industrie, Nanterre, 2013.
- [Sellami, 2018] I. Sellami, R. Nait-Said, K. Chetehouna, C. de Izarra, F. Zidani, Quantitative consequence Analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry, Process Safety and Environmental Protection, 116 (2018) 771-779.
- [Villemeur, 1988] Alain Villemeur. Sécurité de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, n° 67, Eyrolles, Paris, 1988.

ANNEXE

Présentation générale du logiciel «PHAST»

Généralités

Le PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel développé et commercialisé par la boîte d'expertise DNV (Det Norske Veritas). Il est largement utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique pour l'évaluation des conséquences d'accidents (telles que les fuites du gaz, les explosions, les incendies, la toxicité, etc.). En effet, l'évolution d'un rejet accidentel d'un produit toxique et/ou inflammable est simulée par PHAST, de la fuite initiale jusqu'à la dispersion atmosphérique dans un champ lointain, incluant la modélisation de l'épandage et de l'évaporation de flaque.

Avantages de l'outil PHAST

- Il modélise l'ensemble des phénomènes dangereux de référence ;
- Il fournit des résultats fiables avec très bonne précision ;
- Il permet d'obtenir une réponse rapide en cas d'incidents à haut risques ;
- Les mises à jour régulières du logiciel incorporent les expériences et les expertises les plus récentes dans l'industrie.

Inconvénients du PHAST

- Caractérisation simple du milieu récepteur (terrain plat, de rugosité uniforme et non encombrée d'obstacles, conditions météo fixes, vitesse du vent au moins égale à 1m/s pour avoir des résultats plausibles, etc.) ;
- Prix élevé.

Définition des scénarios et simulation

- Dans l'onglet **Models** de l'arbre d'étude, choisir **Study** et sélectionner ensuite **Vessel/Pipesource** à partir du menu **Insert**.

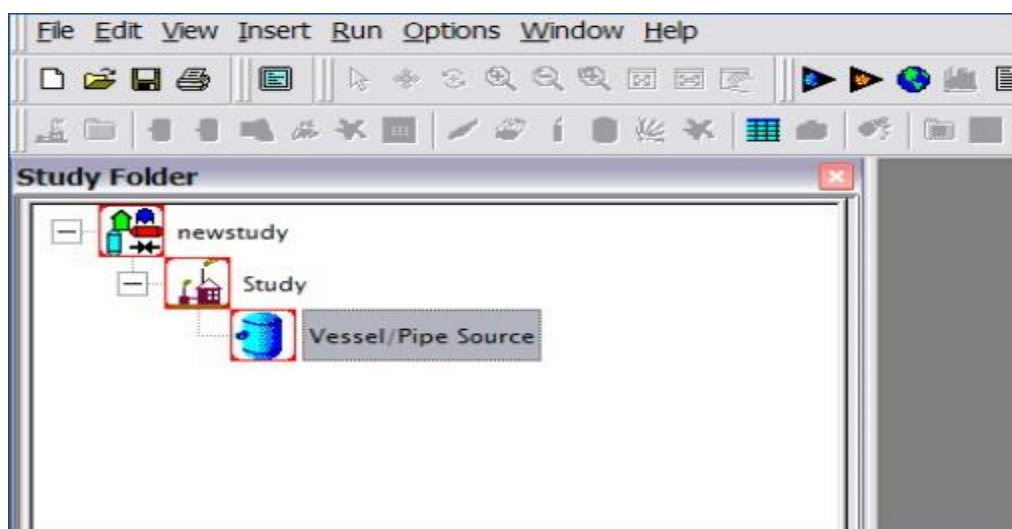


FIGURE I : Définition du Modèle

- Donner un nom descriptif au nouveau modèle.
- Cliquer deux fois sur le modèle pour ouvrir la boîte de dialogue.
- Dans l'onglet **Material**, choisir la substance impliquée dans le système.

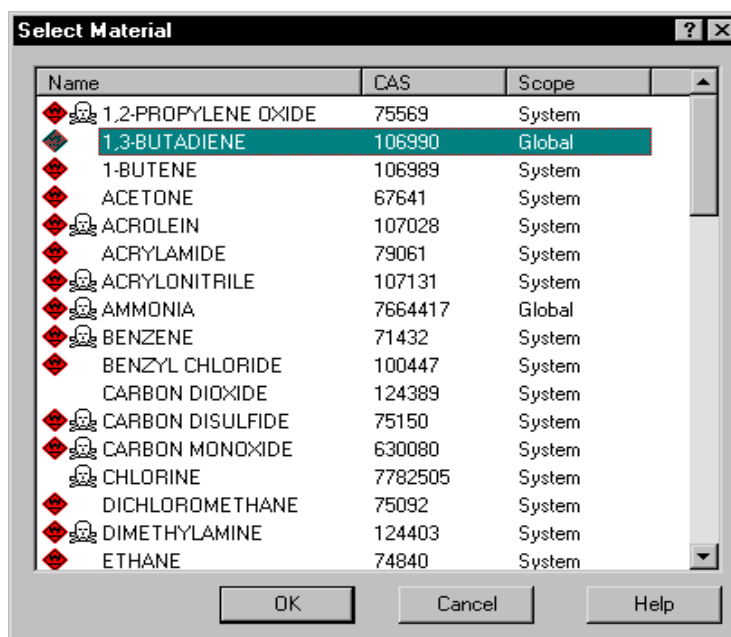


FIGURE II : BOITE DE DIALOGUE PERMETTANT LE CHOIX DES MATIERES

- Introduire les conditions opératoires (température et pression du procédé/système ou de stockage).

Process Conditions

Temperature degC

Pressure bar

Phase: Fluid Type:

FIGURE III : PARAMETRES DU PROCEDE

- Cliquer sur l'onglet **Scenario** et choisir le scénario à modéliser (rupture ligne, fuite, rupture catastrophique, ...).

Vessel/Pipe : Vessel/Pipe Source

Material Scenario Pipe Vessel Location Geometry Bund Data Indoor/Outdoor

Scenario Type

☒ Catastrophic Rupture

☐ Line Rupture

☐ Disc Rupture

Outdoor / In-Building Release

☒ Outdoor Release

☐ In-Building Release

Phase to be Released

☐ Vapor

☒ Liquid

☐ Two-Phase

Basic scenario data

Hole Diameter mm

Pump Head m

Vessel burst pressure used in fireball calculations (q) bar

Scenario Type

☐ Leak

☐ Fixed Duration

☐ Relief Valve

☐ Vent from Vapor Space

☐ Long Pipeline

☐ Tank Roof Failure

Building Wake Effect

☐ Boat/Lake Effect

☐ Chimney Effect

Tank/Roof Effect

☐ Roof Collapsed

☐ Roof Removed

Model Effect:

Notes:

OK Cancel Help

FIGURE IV : DEFINITION DU TERME SOURCE

- Accomplir les données d'entrée du modèle. Dans cette étape, il est nécessaire d'introduire les données suivantes : quantité, paramètres du procédé, température, pression, position, hauteur, géométrie, direction de rejet, etc. Cliquer ensuite sur **OK** pour fermer la boîte de dialogue et sauvegarder les changements.
- Lancer les calculs en cliquant sur **Run** et visualiser ensuite les résultats obtenus. Ces résultats peuvent être affichés sous deux formes : (1) **Rapports détaillés** et (2) **Graphiques**.

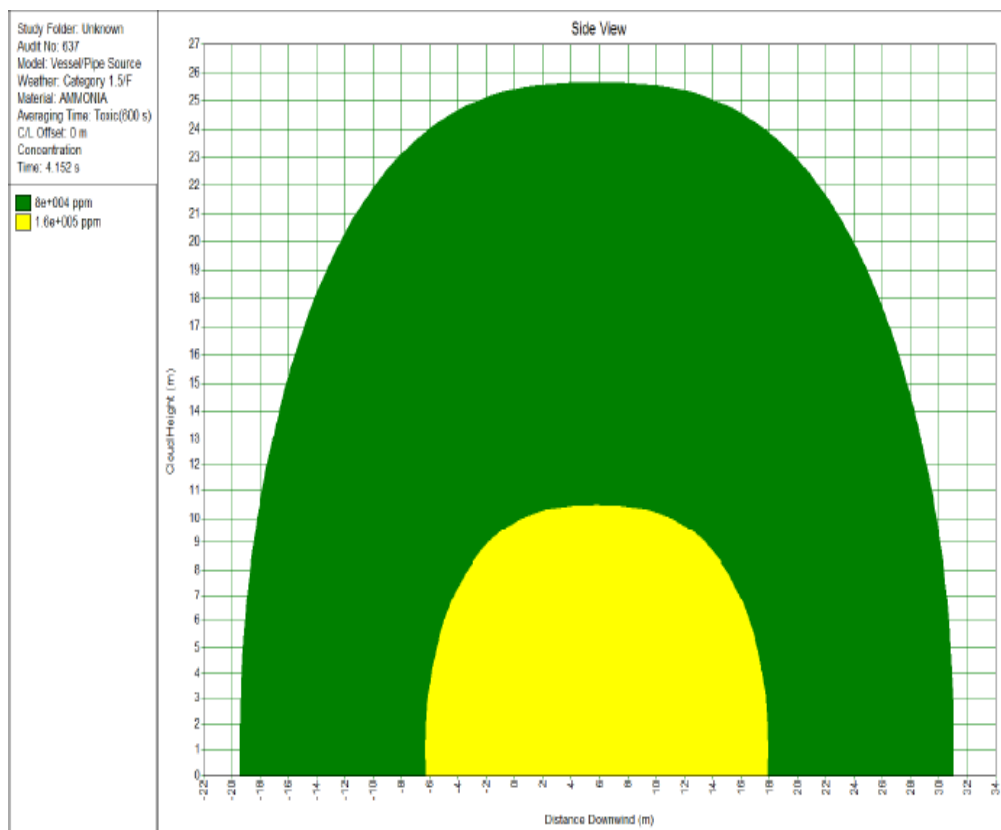


FIGURE V : Exemple d'une présentation graphique des effets

Abstract: Quantitative Risk Analysis (QRA) is a rigorous and advanced approach aimed at a safer industry and is essential and necessary for a good estimation and control of risks. This study mainly aims to identify potential or representative accident scenarios, estimate their frequency and analyze their consequences. Using quantitative risk analysis models to reduce and minimize the consequences of potential accidents and avoid them in the future.

Keywords : Quantitative Risk Analysis (QRA), potential accident scenarios, quantitative risk analysis models.

Analyse quantitative de risque pour protéger les entreprises pétrolières et pétrochimiques

Résumé : L'analyse quantitative des risques (QRA) est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette étude vise principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences. En utilisant des modèles quantitatifs d'analyse des risques pour réduire et minimiser les conséquences d'accidents potentiels Et les éviter à l'avenir.

Mots-clés : Analyse quantitative des risques (QRA), scénarios d'accidents potentiels, modèles quantitatifs d'analyse des risques.

التحليل الكمي للمخاطر لحماية شركات النفط والبتروكيماويات

ملخص: يعتبر التحليل الكمي للمخاطر (QRA) نهجا صارما ومتقدما يهدف إلى جعل البيئة الصناعية أكثر أمانا، كما أنه يعد ضرورة لا غنى عنها من أجل التقييم والتحكم الجيد في المخاطر، تهدف هذه الدراسة بشكل أساسي إلى تحديد سيناريوهات الحوادث الصناعية المحتملة وتقدير تردداتها وتحليل نتائجها وعواقبها، وذلك بإستخدام نماذج التحليل الكمي للمخاطر للحد والتقليل من نتائج الحوادث المحتملة وتجنبها في المستقبل.

كلمات مفتاحية: التحليل الكمي للمخاطر (QRA)، سيناريوهات الحوادث الصناعية، نماذج التحليل الكمي للمخاطر.