



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

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

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

**Département : Sécurité industrielle et environnement**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : Hygiène et sécurité industrielle**  
**Spécialité : Sécurité prévention- intervention**

### **Thème**

**L'étude d'un scénario d'explosion BLEVE au  
niveau d'un ballon de stockage**

Présenté et soutenu publiquement par :

RACHED Halima

et

HADDA Fatima Zohra

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Beloufa Khadidja	MAA	IMSI	<b>Président</b>
Talbi Zahera	MCB	IMSI	<b>Encadreur</b>
Lebsir Hayet	Professeur	IMSI	<b>Examineur</b>

**Année 2019/2020**

# Dédicace

A cœur vaillant rien d'impossible

A conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre

Tout vient à point à qui sait attendre

Quand il y a le souci de réaliser un dessein

Tout devient facile pour arriver à nos fins

Malgré les obstacles qui s'opposent

En dépit des difficultés qui s'interposent

Les études sont avant tout

Notre unique et seul atout

Je dédie ce modeste travail à:

Ma mère **BELLAREDJ Kheira**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices

consentis et ses précieux conseils, pour son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A celui ma fait de moi une femme, mon père **RACHED Abdellah**

**A mon fiancé**, et bien sûr A mes frères **RACHED Farid** et sœurs

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes amis **OULHA Samira**, **ZERARGUI Hanane**, à tous ceux qui sèment le bonheur dans mon étude.

A tous les enseignants et A mon professeur de suivi.

A tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin a la réalisation de ce travail

**Halima**

# Dédicace

A cœur vaillant rien d'impossible

A conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre

Tout vient à point à qui sait attendre

Quand il y a le souci de réaliser un dessein

Tout devient facile pour arriver à nos fins

Malgré les obstacles qui s'opposent

En dépit des difficultés qui s'interposent

Les études sont avant tout

Notre unique et seul a tout

Je dédie ce modeste travail à :

A ma mère **SEBBAR FADILA** :

A cette femme exceptionnelle qui m'inspire depuis toujours et à qui je dois tout

A ma meilleure amie toujours disponible et attentive qui ma donne les plus précieux conseils et  
pardonne mes erreurs

A cette mère courageuse et forte qui m'a protégé de toutes ses forces et qui m'a aimé de tout son  
cœur

Merci ma petite Maman, repose en paix et sois certaine de toujours rester vivante en moi

A mon père **HADDA LHADJ** :

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon  
respect

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te préserve et te procure santé et  
longue vie

A toute ma famille, et mes aimables amis, collègues d'études, je vous dis merci

# Remerciements

Tous d'abord on tient remercier dieu tous puissant pour avoir donnée la force, le courage et la chance d'étudier et de suivre la voie de la science de réaliser ce travail.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant ces cinq années d'étude.

Nous remercions notre promoteur Mm. **TALBI Zahera** pour son aide précieuse, ses remarques et ses conseils qui nous ont permis de terminer ce modeste travail.

Enfin nous aimerions remercier tous nos amis et nos collègues pour leur amitié, leur soutien, et à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail.

## Table des matières

Dédicace	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I :

#### Généralités sur le phénomène du BLEVE

I .1 Introduction .....	3
I.2 Définition d'un BLEVE.....	3
I.3 Mécanisme de BLEVE.....	4
I.4.Produits concernés .....	5
I.5 Equipements concernés.....	6
I.6 Les causes de BLEVE.....	6
I.7 Conséquences du B.L.E.V.E .....	6
I.7.1 les ondes de choc.....	7
I.7.2 La formation et la propagation d'un nuage gazeux.....	7
I.7.3 Effet missile .....	8
I.7.4 La boule de feu.....	8
I.8 Effet du BLEVE .....	10
I.8.1 Effet sur les structures .....	10
I.8.2 Effet sur l'homme.....	11
I.9 Prévention contre le BLEVE.....	12

## CHAPITRE II:

### Estimation des effets du BLEVE

II.1 Introduction.....	19
II.2 Equilibre liquide-vapeur et température limite de surchauffe .....	19
II.2.1 Méthode de mesure de la température limite de surchauffe.....	23
II.3 Caractéristique de la boule de feu.....	24
II.3.1 Diamètre de la boule de feu.....	24
II.4 L'estimation des effets de l'explosion.....	25
II.4.1 Radiations thermiques.....	25
II.4.2 Energie générée par l'explosion.....	27
II.4.3 Onde de surpression .....	30
II.4.4 Les missiles.....	31

## CHAPITRE III :

### Partie pratique

III.1 Introduction .....	33
III.2 Scénario .....	33
III.3 Système multi composant réfrigérant MCR .....	34
III.3.1 Rôle du système MCR.....	35
III.4 Description de la boucle MCR.....	35
III.5 Estimation d'un risque BLEVE sur le ballon HP MCR (G-780).....	35
III.5.1 Diamètre de la boule de feu .....	35
III.5.2 Durée de combustion de la boule de feu .....	36
III.5.3 Effet de rayonnement .....	37
III.5.3.1 Distance correspondant au seuil de létalité.....	37

## TABLE DES MATIERES

---

III.5.3.2 Distance correspondant au seuil de brulure significative .....	38
III.5.4 Effet de surpression sur l'être humain .....	38
III.5.4.1 Distance correspondant au seuil de la létalité .....	38
III.5.4.2 Distance correspondant au seuil de brulure significative.....	38
III.5.5 le flux de chaleur .....	38
III.6 Méthode d'intervention .....	42
III.7 Prévention et protection technologique .....	42
Conclusion générale.....	43

## Liste des tableaux

### CHAPITRE I :

**Tableau I.2** : les produits susceptibles de générer le BLEVE.

### CHAPITRE II :

**Tableau II.1** : Température limite de surchauffe de quelques substances.

### CHAPITRE III :

**Tableau III.1** : Caractéristiques du MCR.

**Tableau III.2** : Variation des paramètres de la boule de feu avec le taux de remplissage.

## Liste d'abréviation

**GPL:** Gaz Pétrolier liquéfié.

**UVCE :** Unconfined Vapor Cloud Explosions

**TLS :** La température limite de surchauffe

**T<sub>c</sub> :** Température critique

**D<sub>FB</sub> :** Diamètre de la boule de feu.

**t<sub>FB</sub> :** la durée de la boule de feu

**W :** L'énergie mécanique de la vapeur

**T<sub>c</sub> :** La température critique

**H :** Hauteur

**T :** Température

**P :** Pression

**V :** Volume

**M :** La masse

## Liste des figures

### CHAPITRE I :

**Figure I.1 :** BLEVE d'un réservoir de GPL

**Figure. I.2 :** Evolution de la hauteur du centre de la boule de feu en fonction du temps

**Figure I.3 :** Equipements de sécurité types sur une sphère

**Figure I.4 :** Rampe d'arrosage sur une sphère

**Figure I.5 :** Talutage d'un réservoir cylindrique de gaz liquéfiés

### CHAPITRE II :

**Figure II.1 :** Diagramme de saturation liquide vapeur

**Figure II.2 :** Courbes de tension de vapeur et droite limite de surchauffe du propane

**Figure II.3 :** Appareil d'explosion de gouttelettes pour la mesure du  $T_{LS}$

**Figure II.4 :** Le modèle du point de source

**Figure II.5 :** Abaque donnant la surpression en fonction de la distance réduite

### CHAPITRE III :

**Figure III.1 :** Les étapes de réalisation du BLEVE

**Figure III.2 :** Représentation graphique de la distance  $d$

**Figure III.3:** Variation du flux de chaleur en fonction de la distance.

## Introduction générale

Le développement industriel a pour conséquence, l'accroissement des capacités de production et de stockage des produits dangereux dans l'enceinte des usines.

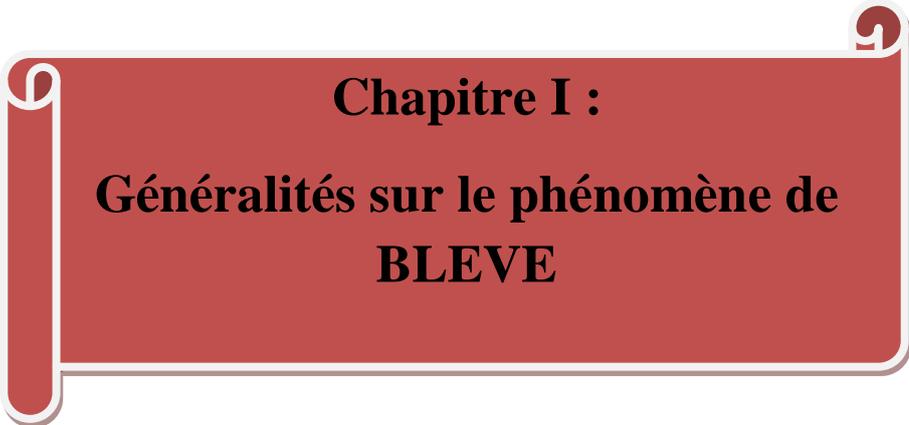
Les récipients sous pression peuvent avoir un contenu énergétique élevé qui, s'il est soudainement libéré, provoque une explosion mécanique. Des exemples d'explosion de cuve sont la rupture soudaine d'une chaudière ou l'explosion d'un réservoir d'air comprimé.

En effet, les accidents liés à l'endommagement d'un réservoir peuvent engendrer des phénomènes accidentels tel que **BLEVE**, **UVCE**, **dispersion atmosphérique** complexes et variés et donne lieu à des évènements non désirés comme incendie, explosion, pollution.

Pour réduire les risques associés à ce type d'accident, des mesures de sécurité de prévention « visant la réduction de la probabilité d'occurrence » et / ou protection « visant la réduction de la gravité des conséquences », doivent être mise en place.

Notre mémoire comporte trois chapitres répartis comme suit :

- Dans le premier chapitre on propose une mise au point bibliographique sur le phénomène du BLEVE, cette partie comprend ; la définition du phénomène, les causes, les conséquences, les effets et enfin le mode de prévention.
- Le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique sur l'estimation quantitative des effets du BLEVE, par des corrélations empiriques. Notamment, l'estimation de l'énergie libérée lors d'une explosion après un BLEVE, basée sur les lois de la thermodynamique.
- Le troisième chapitre concerne la partie pratique de notre mémoire. Nous avons, tout d'abord, imaginé un scénario de BLEVE avec explosion sur un ballon de stockage du mélange réfrigérant le MCR, utilisé pour la liquéfaction du gaz naturel, ensuite nous avons procédé aux calculs des caractéristiques du BLEVE, en particulier la boule de feu. Enfin, nous avons terminé notre travail par quelques recommandations d'intervention en cas d'une explosion.



**Chapitre I :**  
**Généralités sur le phénomène de**  
**BLEVE**

# Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE

---

## I.1.Introduction

Le stockage de GPL est soumis à plusieurs risques potentiels comme le BLEVE, UVCE, fuite de gaz toxique, tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE.

L'occurrence d'un BLEVE est liée à la rupture brutale d'un réservoir de gaz liquéfié, survenant lorsque le réservoir est soumis à une agression thermique ou mécanique. Le phénomène de BLEVE est donc l'effet domino d'un événement précurseur tel que l'impact d'un projectile, l'échauffement par un feu de torche impactant, Sur remplissage[1].

## I.2.Définition d'un BLEVE

**B.L.E.V.E** est l'abréviation anglaise de « **BoilingLiquidVapor Explosion** » qui pourrait être traduit en français par « Explosion de vapeur en expansion d'un liquide en ébullition ».

Le BLEVE peut être défini comme la "**vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un Réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique**".

Désigne un type d'explosion pouvant survenir:

- Sur des réservoirs contenant des liquides (aussi bien de l'eau que du propane ou autre) sous pression
- A une température supérieure à une limite de surchauffe.



**Figure I.1 : BLEVE d'un réservoir de GPL.**

L'un des premiers à proposer l'acronyme BLEVE, comme « une défaillance d'un conteneur majeur en deux ou plusieurs pièces se produisant à un moment où le liquide du récipient est à une température supérieure au point d'ébullition et à la pression atmosphérique normale » Par

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

la suite, Reid [2] a défini les BLEVE comme « le soudain perte de confinement d'un liquide qui est à une température surchauffée pour condition. » [3].

Les effets d'un BLEVE sur l'environnement se manifestent généralement de trois manières :

- **Effets de pression** : propagation d'une onde de surpression,
- **Effets missiles** : projection de fragments à des distances parfois très importantes
- **Effets thermiques** : dans le cas d'un BLEVE de gaz liquéfié inflammable, rayonnement de la boule de feu.

### **I.3 Mécanisme de BLEVE**

Si un réservoir contenant un liquide sous pression est chauffé, par exemple en raison d'un incendie, la pression à l'intérieur augmenté.

A un certain moment, le chauffage n'étant pas homogène, une fissure peut être initiée à un endroit chaud. Ceci est le plus susceptible de se produire dans la section supérieure du récipient, où les parois ne sont pas en contact avec le liquide et donc pas refroidie par celui

-ci ; la température des murs augmentera et leur résistance mécanique diminuera.

En revanche, la paroi en contact avec le liquide transfèrera de la chaleur au liquide, maintenant ainsi une température beaucoup plus basse. De plus, si une soupape de sécurité s'ouvre, le liquide bouillant aura une action de refroidissement plus forte, en raison de la chaleur de l'évaporation : généralement, la soupape de sécurité est conçue en tenant compte de l'action du feu et sa capacité de libération doit être capable de maintenir la pression à l'intérieur. Une fois que la fissure est initiée, elle progressera probablement « bien que dans des cas exceptionnels cela ne se produise pas » conduisant à la défaillance catastrophique de réservoir.

En cas de panne, du fait de la dépressurisation instantanée, la température du liquide sera supérieure à celle correspondant à la nouvelle pression selon la courbe de saturation du diagramme (PT). Dans cette condition instable, on parle de liquide «surchauffé».

Les liquides peuvent résistent normalement à une petite quantité de surchauffe, qui, dans certaines conditions expérimentales, peut être étendue bien au-dessus du point d'ébullition à pression atmosphérique [4].Ainsi, au moment de la dépressurisation, un éclair soudain d'une fraction du liquide se produira; un mélange liquide / vapeur bi phasique sera alors libéré.

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

Ce phénomène se produit dans un laps de temps très court. L'augmentation significative du volume du liquide lors de sa vaporisation - 1750 fois dans le cas de l'eau et 250 fois dans le cas du propane ; plus l'expansion de la vapeur préexistante n'entraînera la rupture du contenant en plusieurs morceaux (explosion, éclatement du contenant) qui peut être propulsé sur des distances considérables, provoquant également une forte onde de pression.

Travaux expérimentaux réalisés avec de petits récipients de 1 L a montré qu'en cas de rupture de la cuve, la pression baisse légèrement puis monte jusqu'à un maximum; la dépressurisation initiale amène le fluide près de la coupure à un état surchauffé, provoquant ainsi une explosion locale [5].

### **I.4.Produits concernés**

Il s'agit des gaz liquéfiés combustibles tel que montrer sur le Tableau I.2 :

**Tableau II.2** : les produits susceptibles de générer le BLEVE.

Nature	Température d'ébullition en c°	TLS(température limite de surchauffe) en c°	Pression à TLS en Bars
Ammoniac	-33	83	43,5
Dioxyde de carbone	-79	-6	25,5
Eau	100	280	62,6
Propane	-42	53	18,4
Butane	-1	105	16,7
Ethylène	-104	-24	22,4
Propylène	-48	52	21,4
Isobutane		95	17
Butadiène	-4	104	18,7
Cyclohexane	81	220	18,0
Diméthyle éther	-24	78	21,1
Acide chlorhydrique	-85	11	34,7
Chlorure de méthyle	-29	95	30
Chlorure de vinyle	-13.4	105	25

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

### **I.5 Equipements concernés**

Le BLEVE concerne les équipements aériens contenant tous les gaz liquéfiés sous pression cités dans la section I.4, qui sont :

- Stockage fixe : cigare, sphère
- Engins de transport : camions, wagons, navires
- Tuyauteries
- Bouteilles d'échantillon, bouteilles petit vrac, .....

Les réservoirs cryogéniques des gaz liquéfiés ne sont pas sujet de BLEVE, car rarement à une pression supérieur de la pression atmosphérique et de plus ils sont protégés soit, par le calorifuge « froid » lorsqu'ils sont métalliques ou bien, par l'enveloppe extérieure en béton précontraint.

Les chaudières et en particulier les ballons supérieurs sont aussi concernés par le BLEVE.

### **I.6 Les causes de BLEVE**

Ce phénomène peut se produire principalement lorsqu'une source de chaleur intense rayonne sur les parois d'un réservoir contenant un produit sous pression.

L'incendie peut avoir plusieurs origines :

- La formation d'un feu de nappe provenant de la combustion d'un produit inflammable répandu sur le sol, soit à proximité d'un réservoir, soit dans son propre bac de rétention.
- L'apparition d'une perte de confinement (fuite au niveau d'un repiquage). Dans ces conditions, le fluide s'enflamme au contact de l'air en enveloppant le réservoir.
- La rupture d'une canalisation provoquant un jet de flammes qui vient chauffer localement la paroi externe d'un stockage.

Dans tous les cas, la rupture mécanique de l'enveloppe se produit lorsque la pression interne dépasse la limite admissible par le matériau.

Il est à noter qu'un projectile et un choc violent peuvent être également à l'origine de ce phénomène.

### **I.7 Conséquences du B.L.E.V.E**

Le BLEVE produit les conséquences suivantes :

# **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

## **I.7.1 les ondes de choc**

L'explosion résultant de la dépressurisation quasi instantanée d'un stockage produit, dans le cas d'un B.L.E.V.E., une détonation qui crée des ondes de choc pouvant être ressenties jusqu'à plusieurs kilomètres (toutes les façades vitrées de la région sud de Lyon ont été brisées après l'accident de Feyzin en 1966).

Pour modéliser et quantifier ce phénomène, WIEKEMA propose une approche intéressante et relativement simple, basée sur la détermination du profil de surpression en fonction de la distance par rapport au centre de l'événement. En définissant la longueur caractéristique de l'explosion  $L_0$  en mètre:

$$L_0 = \left( \frac{V_0 E_c}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots \mathbf{I.1}$$

$V_0$  : rapport: volume du mélange de combustion / volume du combustible avant la combustion.

$E_c$  : énergie dégagée par la combustion du produit évacué dans l'atmosphère (J).

$P_0$ : pression du nuage avant la combustion (égale à la pression atmosphérique) (Pa).

## **I.7.2 La formation et la propagation d'un nuage gazeux**

De même que pour les ondes de souffle, la formation d'un nuage gazeux repose sur une théorie complexe faisant ressortir les paramètres prépondérants pour son développement; à savoir les conditions atmosphériques, le type de gaz en présence, sa quantité et l'ampleur de la dépressurisation.

Ainsi, un gaz lourd se répand sur le sol et se loge dans toutes les cavités qu'il rencontre, alors qu'un gaz léger, par grand vent, peut former un nuage qui se propage dans l'atmosphère sans pouvoir être maîtrisé. Ce gaz, qui ne s'enflamme pas forcément lors de la perte de confinement, peut être toxique, inflammable ou radioactif.

Les conséquences peuvent devenir dramatiques non seulement sur le site de stockage mais également sur l'environnement.

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

### **I.7.3 Effet missile**

C'est le phénomène le plus aléatoire. Les comptes rendus d'accidents sont très significatifs à ce propos: un morceau de paroi pesant plusieurs tonnes et provenant d'un réservoir qui subit un B.L.E.V.E. peut être projeté jusqu'à plus d'un kilomètre du lieu de l'explosion.

HOLDEN et REEVES proposent une analyse statistique très détaillée concernant la répartition des projectiles dans l'espace, en fonction de la géométrie initiale du réservoir.

Cependant, bien qu'aucun modèle d'application directe ne semble envisageable, on peut déterminer une distance à partir de laquelle la probabilité de trouver un projectile est nulle, ou inférieure à un seuil donné.

Le nuage formé à la suite de la rupture mécanique d'un stockage, peut s'enflammer soit s'il a atteint son point d'auto-ignition, soit s'il existe à proximité une source d'ignition (incendie, étincelle..).

C'est l'événement le plus redouté de par son ampleur et sa vitesse d'exécution. Un énorme champignon apparaît dans l'atmosphère et la combustion résultante dégage un rayonnement de chaleur de haute intensité (jusqu'à 300 kW/m<sup>2</sup> à une température pouvant atteindre 2000°C).[6]

### **I.7.4 La boule de feu**

Lorsque le réservoir est muni d'une valve de surpression, et que le BLEVE est due au feu, la pression régnant à l'intérieur du réservoir au moment de l'explosion est environ 20 % supérieure à la pression de déclenchement de la valve (l'évacuation des gaz par la valve n'est pas assez rapide ne suffit pas à empêcher l'augmentation de pression ; par ailleurs, le réservoir est affaibli par la chaleur et rompt plus facilement).

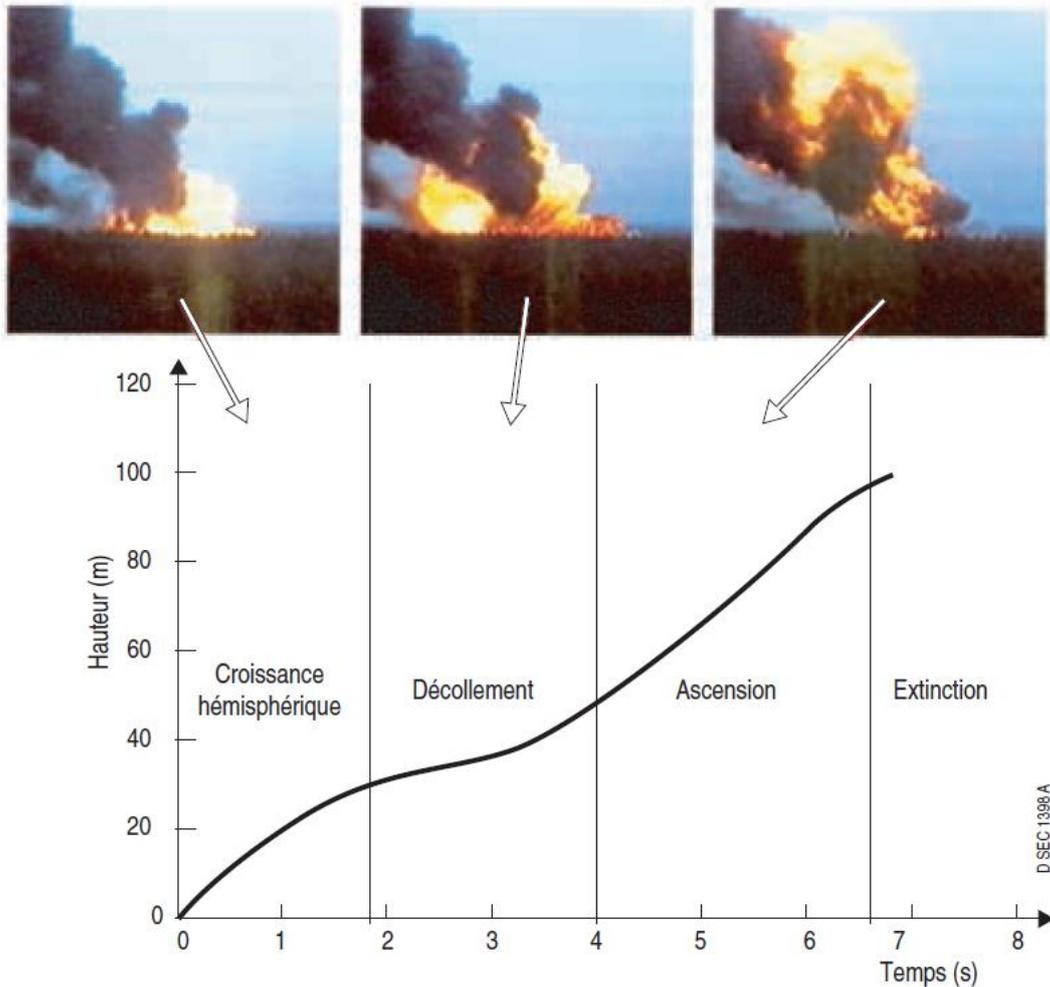
Si le liquide impliqué dans le BLEVE n'est ni combustible ni toxique, comme c'est le cas avec l'eau, l'onde de pression et les missiles du navire qui se brisent sont les seuls effets dangereux de l'explosion. Cependant, si le liquide est inflammable, comme c'est souvent le cas, le mélange liquide/ gaz libéré par l'explosion prend feu générant un boule de feu. Des analyses de BLEVE réels ont montré que plus des deux tiers impliquaient des produits chimiques inflammables.

La forme et la taille de la boule de feu, ainsi que la charge thermique qu'elle produit, dépendant de plusieurs facteurs. Au départ, la masse de carburant expulsée ne peut brûler qu'à sa périphérie car il n'y a pas suffisamment d'air à l'intérieur de la masse, c'est-à-dire que le

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

rapport de mélange carburant/air est supérieur à la limite supérieure d'inflammabilité. De plus, tout le carburant initialement contenu dans le réservoir peut ne pas être impliqué dans l'incendie primaire. Une partie du liquide peut fuir vers l'environnement avant l'explosion via une fissure ou une autre ouverture dans le récipient. En variante, une partie du liquide être entraînée dans le sillage formé par les fragments volants. Lors de la catastrophe de Mexico en 1984, des fragments de navires ont brisée ont emporté avec eux des parties du liquide inflammable, ce qui a en soi provoqué la propagation des incendies. Au fur et à mesure que la boule de feu principale d'un BLEVE se développe, la turbulence de la flamme entraîne l'air dans la boule de feu. En même temps, le rayonnement thermique de la flamme vaporise les gouttelettes de liquide et chauffe le nuage combustible. En raison de tous ces processus, le nuage entier augmente de volume, monte et atteint une forme approximativement sphérique. En fonction de la quantité de matériaux combustibles impliqués, ces boules de feu peuvent devenir très volumineuse et provoquer un rayonnement thermique très intense. La taille, la durée de vie et l'intensité de rayonnement d'un boule de feu peut également dépendre la température initiale du liquide contenu à l'origine dans le récipient. La question de savoir si la perte de confinement du liquide s'est produite alors que la pression à l'intérieur du vaisseau était toujours en augmentation est un autre facteur. Bien que les boules de feu BLEVE soient sphériques lorsqu'elles sont complètement développées, elles acquièrent une forme de champignon pendant le décollage. Les boules de feu résultant de BLEVE en deux étapes peuvent être de forme approximativement ellipsoïdale. Selon Lees « 1996 », il peut arriver que des BLEVE impliquant des matières combustibles ne soient pas enflammés au point de rejet, mais à un stade ultérieur. Dans de tels cas, l'événement qui en résultera peut être soit un incendie éclair majeur, soit une explosion de nuage de vapeur.[7]



**Figure. I.2 :** Evolution de la hauteur du centre de la boule de feu en fonction du temps (capacité de 5000Kg de GPL) [8]

### I.8 Effet du BLEVE

#### I.8.1 Effet sur les structures

➤ **Les effets des explosions de gaz ou de vapeur :**

Les effets des explosions de gaz ou de vapeur sur les bâtiments, constructions et structure peuvent être estimés. Plusieurs types de classification existent :

- TNO Green Book propose un dégrossissage à l'aide d'un tableau. Une classification des dégâts aux bâtiments est faite (destruction totale, important, moyen, faible) et elle en fonction de la surpression aérienne incidente (kPA).
- Baily et al. (1995) propose une classification aux constructions en utilisant une meilleure résolution de l'influence de la pression (mbar)

- Mouilleau and Lechaudel (1999) propose de joindre les dégâts aux structures en fonction de la surpression statique et de l'impulsion positive.

### **I.8.2 Effet sur l'homme**

- **Les effets des explosions de gaz ou de vapeur**

Les conséquences d'une explosion sur l'homme sont dues aux effets de l'onde de surpression aérienne, de la pénétration des fragments, de l'impact des missiles et de la projection des personnes sur des surfaces dures. L'équation de probit Y d'un facteur causal X donné sous la forme :

$$Y = K_1 + K_2 \ln X$$

Où :  $K_1$  et  $K_2$  sont des constantes.

On distingue 2 types d'effets :

1. Les effets directs ou primaires (l'homme sera soumis à l'onde de surpression aérienne)

Tel que : lésions aux tympans. L'oreille est très sensible à la pression. Le seuil de rupture du tympan constitue la référence de gravité des lésions à l'oreille. TNO Green Book(1989) propose un graphe représentant la probabilité de rupture de tympan d'une population exposée à une surpression aérienne. L'équation de probit correspondante de a rupture de tympan est :

$$Y = -12,6 + 1,524 \ln P_s$$

Où

$P_s$  = surpression incidente en Pascal.

Blessures aux poumons: les poumons eux aussi sont très sensibles à la pression. TNO GreenBook(1989) a aussi présenté un graphe représentant la probabilité de survie aux effets sur les poumons d'une surpression aérienne qualifiée par les valeurs  $P_s$  et de la durée d'application positive ( $i^+$ ) d'une personne adulte de 70 kg en position debout à la pression atmosphérique.

2. Les effets indirects secondaires et tertiaires (l'éventualité de la possibilité des conséquences sur l'homme est potentielle) tel que : effets des fragments tranchants pénétrant, effets des missiles contondants. Ils dépendent de la masse du fragment et de sa vitesse d'impact sur le corps humain.

3. Les effets indirects tertiaires : TNO Green Book propose deux diagrammes fournissant les coordonnées surpression  $P_s$  et impulsion  $i_s$  les probabilités létales des effets dus à la projection respectivement pour une fracture du crâne et pour le corps humain. Pour Baker et al. (1983), la vitesse d'impact est en fonction de la surpression  $PS$  et du rapport de l'impulsion  $i_s$  à la masse  $m$  du corps humain à la puissance  $1/3$ .

### ➤ **Les effets du rayonnement thermique**

Les effets du rayonnement thermique sur l'homme sont les brûlures à des degrés différents, les effets sur la peau varient selon le temps d'exposition, l'âge de la personne...

De nombreux modèles existent, les effets dépendent simultanément de la densité de flux thermique ( $kW/m^2$ ) et du temps d'exposition(s) [9].

### **I.9 Prévention et précaution contre le BLEVE**

On rappelle ci-dessous, en premier lieu, un ensemble de fonctions de sécurité à mettre en œuvre et qui dépasse d'ailleurs le cas particulier de la prévention du BLEVE. C'est ainsi qu'il convient de développer une culture sécurité dans l'entreprise, notamment :

- En affichant clairement la priorité à la sécurité sur la production,
- En décentralisant, autant que faire se peut, les responsabilités,
- En s'assurant que les risques sont identifiés et connus des personnels,
- .En mettant en œuvre une politique d'analyse systématique des incidents qui se produisent,
- De développer et maintenir la compétence des équipes, par exemple par des actions de formation, et en consignnant les procédures dont l'Industriel s'assurera qu'elles sont claires et connues des opérateurs,
- De simplifier au maximum les mesures d'urgence à appliquer le cas échéant,
- De coordonner la liaison entre les services de secours internes et externes,
- D'effectuer des audits périodiques de tout ce qui concerne la sécurité,
- D'effectuer, autant que faire se peut, une gestion préventive de la maintenance des installations.



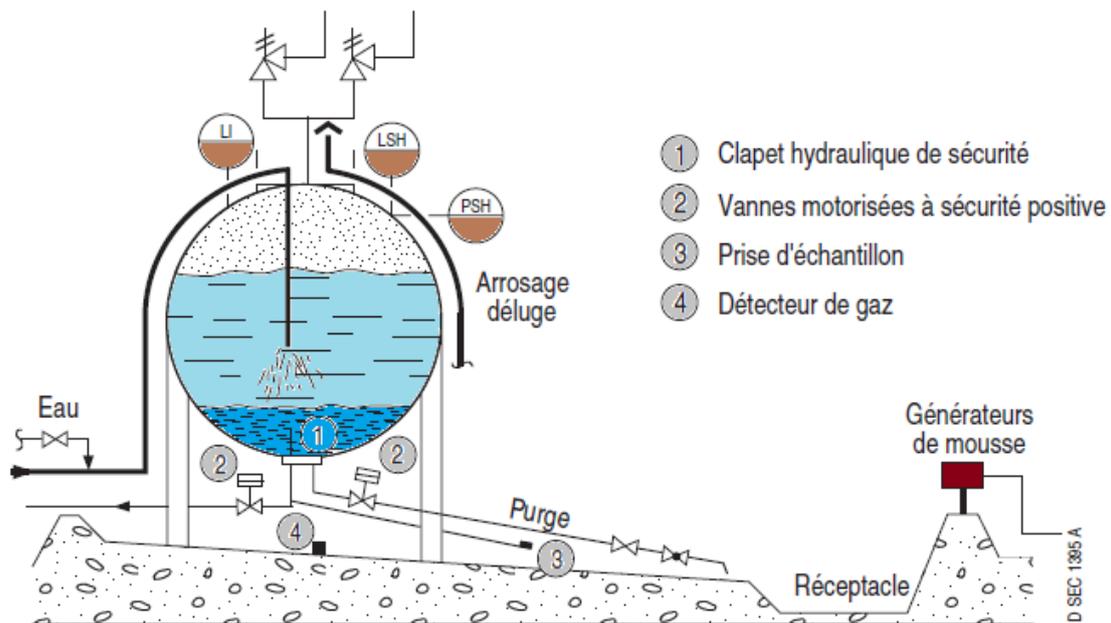
**Figure. I.3**Démonstration du fonctionnement d'une explosion de fumée organisée par des pompiers aux Etats en 2007

Bien évidemment les installations devront en outre être conformes à la réglementation en vigueur. D'une manière générale, en ce qui concerne la prévention, visant à éviter l'occurrence d'une situation dégradée susceptible de conduire à un BLEVE, il convient notamment :

- De prévenir et limiter les fuites des produits inflammables stockés,
- De prévenir l'inflammation d'une éventuelle atmosphère explosive susceptible d'être formée.

## Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE

Les schémas ci-dessus représentent les équipements de sécurité type sphère (Figure I.3) :



**Figure I.3 :** Equipements de sécurité types sur une sphère.

Afin de prévenir et limiter les fuites des produits inflammables stockés, il y a lieu de protéger les équipements susceptibles de contenir de tels produits contre :

- Les agressions mécaniques,
- La corrosion,
- Le gel.
- De mettre en œuvre des équipements surdimensionnés par rapport aux contraintes d'utilisation,
- De prévenir les sur-remplissages par la mise en œuvre de procédures et de détections de niveau haut et très haut redondées de manière indépendante entraînant automatiquement, le cas échéant, la mise en sécurité des installations (fermeture des vannes, arrêt des pompes et compresseurs, ...)
- De prévenir les surpressions par des dispositifs limiteurs de pression correctement dimensionnés et des détecteurs de pression haute, entraînant automatiquement la mise en sécurité des installations.

## **Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE**

---

- Disposer des détecteurs d'atmosphère explosive. Ici encore, en cas de détection, il convient de mettre l'installation en sécurité,...

Bien évidemment les équipements de sécurité seront de type à sécurité positive et, pour les plus importants d'entre eux, redondés. Les fonctions de sécurité seront, autant que possible, automatisées.

Par ailleurs l'Industriel s'assurera, par des moyens à définir (tels, par exemple, des essais périodiques, des études a priori de la fiabilité des composants et de l'architecture,...) de la fiabilité et de la disponibilité de tous les équipements associés à la sécurité.

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

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

Bien évidemment d'interdire de fumer dans les zones susceptibles d'être explosives et même, sauf nécessité justifiée, d'interdire le port et la mise en œuvre de toute source d'inflammation potentielle (briquet, allumettes, ...).

Malgré tout, il est nécessaire d'envisager le cas où une situation dégradée est matérialisée.

Il convient alors de donner l'alarme au plus tôt. On conçoit que la mise en place de détecteurs de fumées ou de flammes judicieusement disposés contribue à permettre l'activation rapide d'une alarme.

Afin de pourvoir au cas, qu'il n'est pas possible d'exclure a priori, où l'incendie ne serait pas maîtrisé dans les délais les plus brefs, il y a lieu de prendre des mesures visant à limiter la température et la pression à l'intérieur du réservoir.

Il s'agit donc de protéger thermiquement le réservoir, de retarder l'échauffement du produit qu'il contient et ainsi de laisser du temps pour lutter contre l'incendie ou, si cela est possible, faire évacuer les environs.

On peut ainsi avoir recours à :

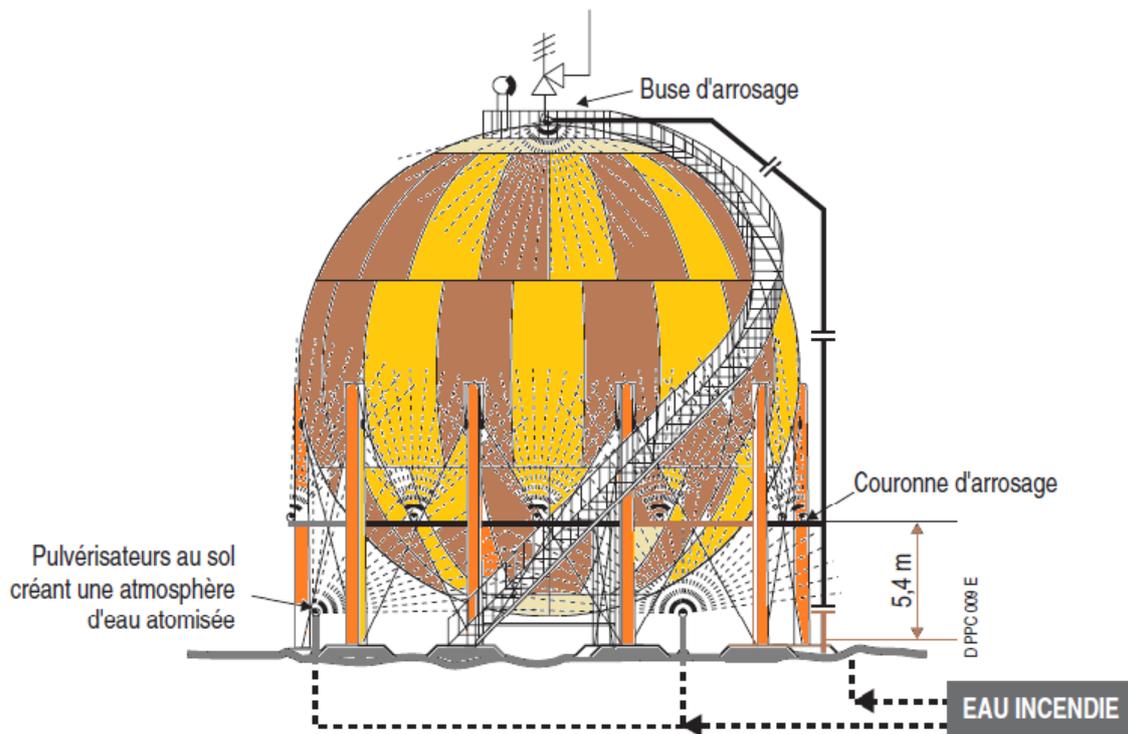
- La protection par un écran liquide.

## Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE

Ce type de dispositif devra être fiable, disponible et mis en œuvre suffisamment rapidement pour prévenir tout échauffement excessif de la paroi du réservoir, ce qui, par caléfaction, pourrait nuire à l'efficacité du système.

Il existe trois dispositifs de ce type :

- l'arrosage par ruissellement d'eau (**Figure I.4**) qui consiste à maintenir un film d'eau liquide au contact de la paroi du réservoir,
  - la protection par pulvérisation qui consiste à interposer un brouillard d'eau susceptible d'atténuer le flux thermique entre l'incendie et le réservoir,
  - la mise en œuvre de rideaux d'eau.
- La protection par un écran solide.



**Figure I.4** : Rampe d'arrosage sur une sphère.

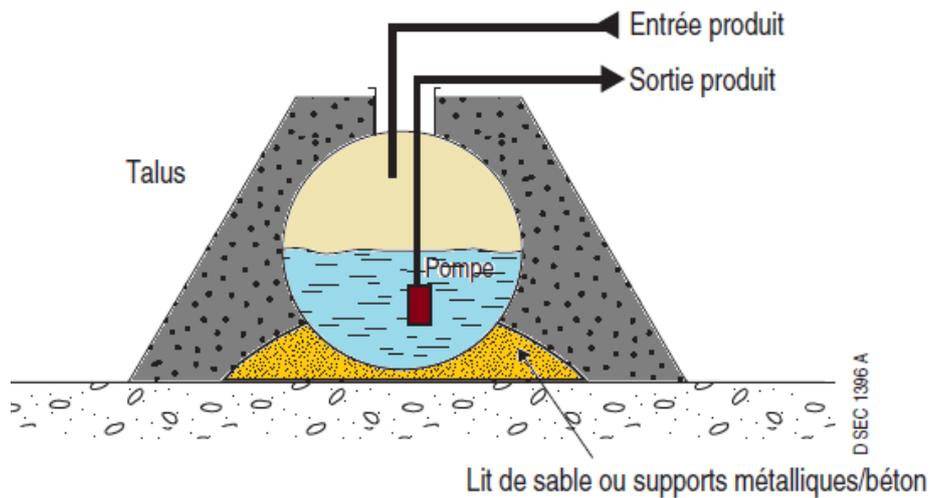
On indique ici :

- les revêtements de type ignifuge
- la mise sous talus.
- La protection mixte par écrans solide et liquide.

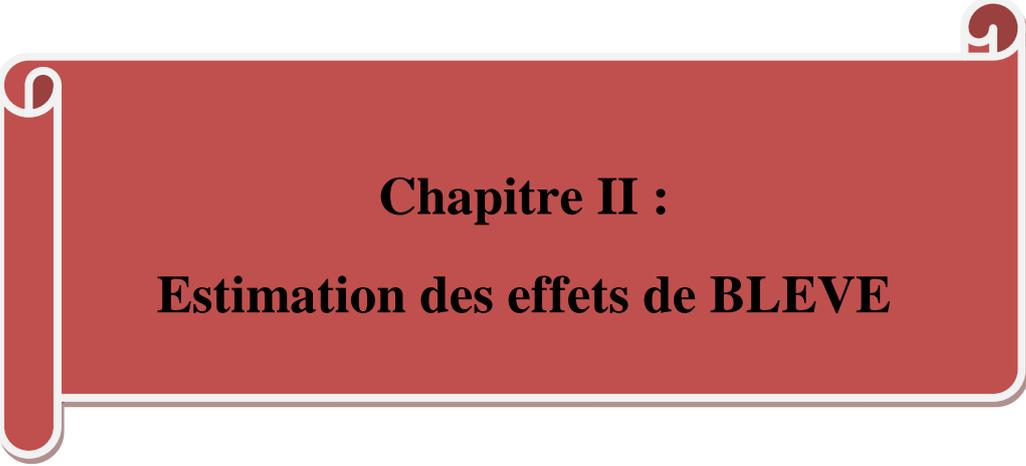
## Chapitre I : Généralités sur le phénomène de BLEVE

Il convient dans ce cas d'éviter que le revêtement soit endommagé, par exemple, par l'impact d'une lance à incendie.

Une autre forme de protection envisagée consiste à disposer les réservoirs sous une enveloppe béton dimensionnée pour résister aux agressions mécaniques prévisibles et d'inertier l'espace libre à l'azote afin de prévenir la formation d'une atmosphère explosible ou inflammable au sein de l'enveloppe béton. [10].



**Figure I.5 :** Talutage d'un réservoir cylindrique de gaz liquéfiés

A red scroll banner with a white border and decorative scroll ends on the left and right sides. The text is centered within the banner.

**Chapitre II :**  
**Estimation des effets de BLEVE**

### **II.1 Introduction**

Dans le cas d'un BLEVE mettant en jeu un produit inflammable, la boule de feu peut être le phénomène ayant les conséquences les plus importantes, notamment du fait de ses effets radiatifs.

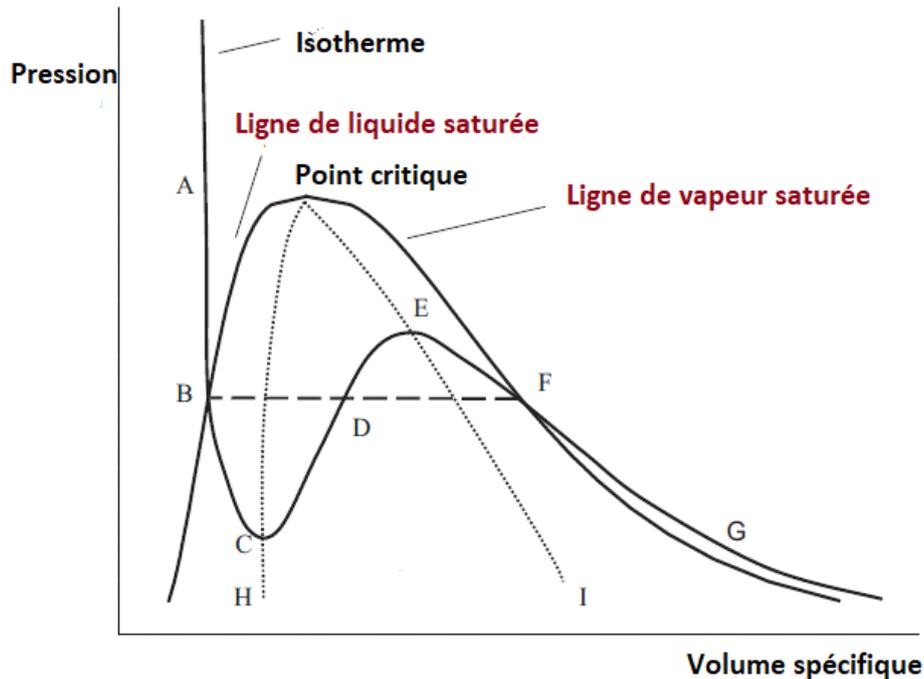
Plusieurs théories ont été développées pour déterminer les effets des boules de feu. Elles procèdent toutes selon une démarche similaire et s'articulent autour des étapes suivantes :

- 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 l'énergie libérée suite à l'explosion générée par un BLEVE.
  - détermination des effets sur l'homme.

Il est à signaler que les différentes formules de calcul sont basées sur des corrélations empiriques qui parfois pour estimer le même effet, les résultats obtenus sont différents c'est pourquoi nous avons pris en comptes uniquement les relations qui ont été citées dans plusieurs articles.

### **II.2 Equilibre liquide-vapeur et température limite de surchauffe**

En thermodynamique classique, la phase de transition lors d'un changement d'état est considérée comme un état d'équilibre. Cependant, dans le cas réel un écart par rapport à l'équilibre apparaît dans les conditions tel que : une surchauffe du liquide au-dessus de son point d'ébullition qui survient soit par chauffage rapide à pression constante soit, par dépressurisation rapide à température constante, la **Figure II.1** représente le diagramme (P, V) liquide/vapeur. La courbe sinusoïdale représente la courbe de saturation dans laquelle, l'ensemble des points B forment la courbe d'ébullition et l'ensemble des points F forment la courbe de rosée, les deux courbes se rejoignent au point critique C [11] [12], à l'intérieur de la courbe (BCDF) il existe un équilibre liquide-vapeur.



**Figure II.1** : Diagramme de saturation liquide vapeur [11].

La limite de surchauffe est la température maximale que peut atteindre un liquide chauffé avant sa vaporisation spontanée.

Considérons, par exemple, un gaz liquéfié pur à l'équilibre thermodynamique dont l'état est présenté par le point A de la **Figure II.2** précédente. Si on lui fournit de la chaleur, le point représentatif de son état se déplace sur la courbe de tension de vapeur saturante jusqu'à rejoindre le point B. Le gaz peut alors passer, par dépressurisation brutale, à l'état représenté par le point E en restant, au moins momentanément, surchauffé, à l'état liquide avant de se vaporiser plus ou moins rapidement. En revanche, du gaz dont l'état est représenté par le point C de la courbe de tension de vapeur, ne peut subir une dépressurisation brutale amenant la droite verticale représentative de cette transformation à couper la droite limite de surchauffe sans subir une vaporisation homogène et rapide, pouvant même avoir un caractère explosif, dans ce cas de figure le BLEVE peut se déclencher [13] [14].

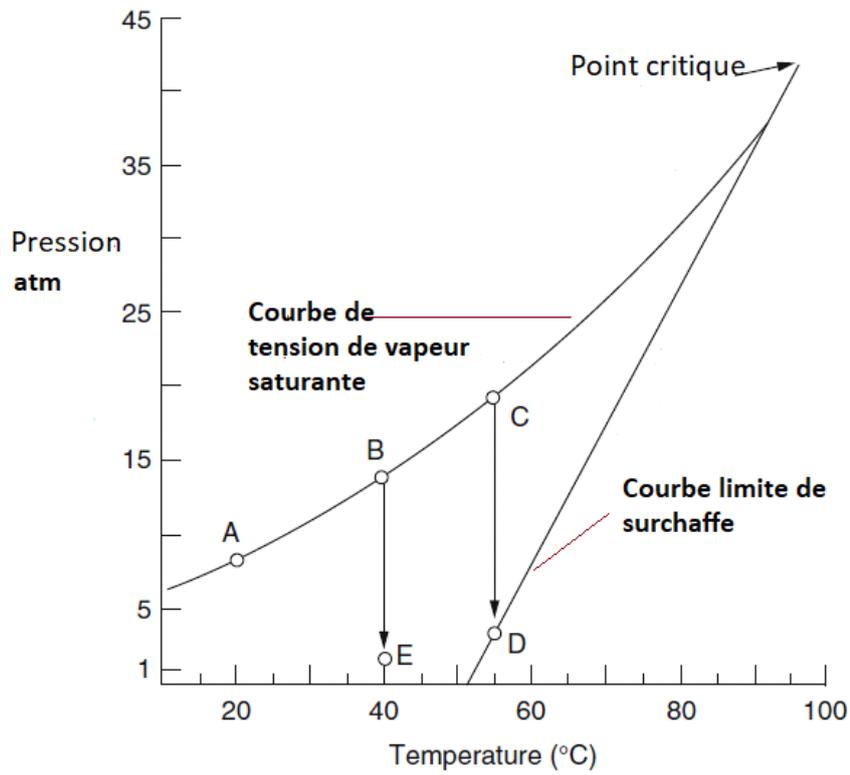


Figure II.2 : Courbes de tension de vapeur et droite limite de surchauffe du propane.

Tableau II.1 : Température limite de surchauffe de quelques substances [15].

Substance	T <sub>ébullition</sub> (K)	T <sub>critique</sub> (K)	P <sub>critique</sub> (atm)	T <sub>LS</sub> (K)
Eau	373,2	647,0	217,7	579,0
CO <sub>2</sub>	194,7	304,0	73,0	272,0
Ammoniaque	239,8	406,0	112,3	363,4
Méthane	111,6	191,0	45,8	170,9
Ethane	184,6	305,0	48,8	273,0
Ethylène	169,3	282,7	50,9	253,0
Propane	231,1	369,8	43,0	333,0
Propylène	225,5	365,3	45,0	327,0
n-Butane	272,7	425,8	37,5	381,1
n-Pentane	309,2	470,2	33,0	420,8
n-Hexane	341,9	507,8	29,5	454,5
n-Heptane	371,6	539,8	26,8	483,1
n-Octane	398,8	569,2	24,7	509,4
Chlore	238,4	419,0	93,5	375,0

**La température limite de surchauffe** à la pression atmosphérique est estimée par la formule suivante qui est largement utilisée :

$$T_{LS} = 0,885 T_c \dots \dots \dots \text{II.1}$$

Avec

T<sub>LS</sub> = température limite de surchauffe en K.

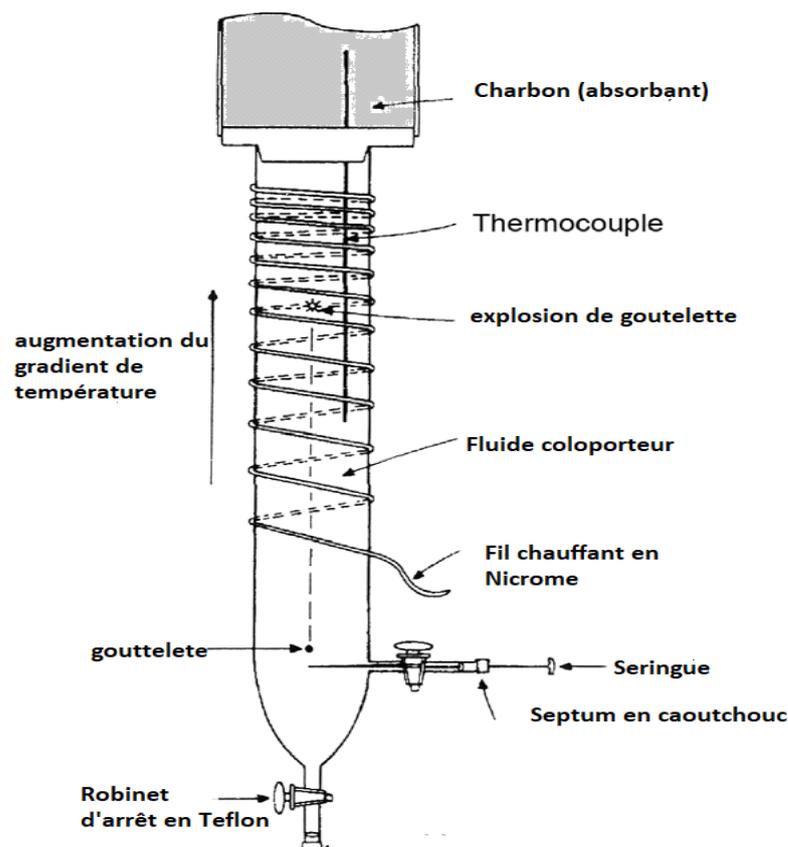
T<sub>c</sub> = température critique en K.

### II.2.1 Méthode de mesure de la température limite de surchauffe

La méthode la plus utilisée pour déterminer la  $T_{LS}$  est la méthode d'explosion de gouttelette montrée sur la **Figure II.3**.

Une petite gouttelette du liquide à analyser est introduite au fond d'un tube vertical rempli d'un liquide d'une densité plus élevée [16]. En plus, ce liquide doit être non miscible avec le liquide à analyser et doit avoir une température d'ébullition bien au-dessus du  $T_{LS}$  de ce dernier.

Au moyen d'un système de chauffage spécialement conçu, un gradient de température vertical est établi dans la colonne, la température la plus basse étant en bas de colonne et la plus haute en haut. Au fur à mesure que la gouttelette monte à travers la colonne sa température augmente progressivement. Au moment où elle atteint sa température limite de surchauffe, une évaporation explosive se produit. La lecture se fait au moyen d'un thermocouple qui peut être positionné à n'importe quel point souhaité dans la colonne.



**Figure II.3** : Appareil d'explosion de gouttelettes pour la mesure du  $T_{LS}$  [17].

### II.3 Caractéristique de la boule de feu

#### II.3.1 Diamètre de la boule de feu

Afin de prédire les effets de la boule de feu, il est nécessaire d'évaluer ses caractéristiques comme : diamètre, durée et hauteur de la boule de feu.

Plusieurs auteurs ont proposés des corrélations pour prédire le diamètre et la durée de vie de la boule de feu [18,19,20,21,22,23]. Ces corrélations ont une forme générale qui s'écrit :

$$D_{FB} = a_1$$

$$t_{FB} = a_2$$

D'où :

$D_{FB}$  : Diamètre de la boule de feu (m).

$t_{FB}$  : la durée de la boule de feu (s).

$M$  ; la masse du liquide (Kg).

$a_1, a_2, b_1, b_2$  sont des constantes.

Une étude comparative de 16 corrélations a été réalisée par (Satyanarayana et al. (1991)) [24] qui a abouti à la relation suivante :

$$D_{FB} = 6,14M^{0,325} \dots\dots\dots II.2$$

$$t_{FB} = 0,41M^{0,340} \dots\dots\dots II.3$$

L'estimation de la hauteur du centre de la boule de feu jusqu'au sol s'écrit sous la forme [25] :

$$H = 4,35 M^{0,333} \dots\dots\dots II.4$$

### II.4 L'estimation des effets de l'explosion

### II.4.1 Radiations thermiques

La boule de feu est suivie d'une radiation thermique intense. Généralement cette énergie se propage dans toutes les directions d'où l'élaboration du modèle de la source ponctuelle qui suppose que le feu peut être représenté par un point qui irradie une énergie thermique dans toutes les directions.

Pour atteindre une cible donnée, l'intensité du rayonnement ( $I$ ) est inversement proportionnelle au carré de la distance ( $L$ ) entre le centre de la boule de feu et la cible [26].

$I$  : l'intensité du rayonnement en  $\text{KW.m}^{-2}$

$Q_r$ : est la chaleur dégagée sous forme de rayonnement thermique par unité de temps (kW).

$L$  : est la distance entre le centre de la boule de feu et la cible (m).

$Q_r$  est fonction du taux de combustion  $m'$  (%), la chaleur de combustion  $\Delta H_c$  et la fraction radiative ou fraction de chaleur rayonnante  $\eta_{\text{rad}}$  en d'autres termes ; c'est la fraction de l'énergie de combustion transférée sous forme de rayonnement thermique [27].

$$Q_r = \eta_{\text{rad}} \cdot m' \cdot \Delta H_c \dots\dots\dots \text{II.5}$$

La fraction radiante dépend de plusieurs paramètres tels que : le type de combustible, la température et le type de la flamme, la quantité de fumée formée lors de la combustion...etc. des valeurs compris entre 0,1 et 0,4 ont été obtenus expérimentalement dans le cas des hydrocarbures. Il est assez difficile d'estimer la valeur théoriquement, et c'est en fait l'une des limites du modèle. La relation qui suit a été proposée par Eckholff, Rolf [15].

$$\eta_{\text{rad}} = 0,35 e^{-D} \dots\dots\dots \text{II.6}$$

$D$  : est le diamètre de la boule de feu (m).

Le modèle du point de source (**Figure II.3**) suppose que la surface de la cible est en face du rayonnement de tel sorte qu'elle reçoit la totalité du flux thermique pour l'estimation de l'intensité du rayonnement thermique, la relation précédente est modifiée et comprend deux autres facteurs, l'expression devient [28] :

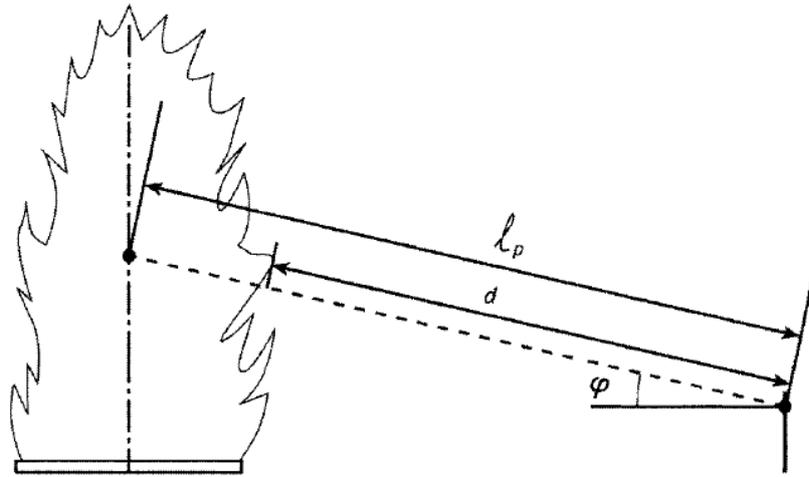


Figure II.4 : Le modèle du point de source.

$\tau$  est la transmissivité atmosphérique est un paramètre qui prend en compte l'absorption des rayonnements thermiques par l'atmosphère, essentiellement par le dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau, cela diminue l'intensité des rayonnements, elle dépend aussi de la distance entre les flammes et la cible, la transmissivité est exprimée par les relations suivantes :

$$\tau = 1.53 \cdot (P_w \cdot d)^{-0.06} \dots\dots\dots \text{II.7}$$

Pour  $P_w \cdot d < 10^4$  (Nm<sup>-1</sup>).

$$\tau = 2.02 \cdot (P_w \cdot d)^{-0.09} \dots\dots\dots \text{II.8}$$

Pour  $10^4 < P_w \cdot d < 10^5$  (Nm<sup>-1</sup>).

$$\tau = 2.85 \cdot (P_w \cdot d)^{-0.12} \dots\dots\dots \text{II.9}$$

Pour  $P_w \cdot d > 10^5$  (Nm<sup>-1</sup>).

$P_w$  est la pression partielle de l'eau dans l'atmosphère (Nm<sup>-2</sup>),  $d$  est la distance entre le centre de la flamme et la cible.  $P_w$  est exprimé par :

$$P_w = P_{wa} \frac{H_R}{100} \dots\dots\dots \text{II.10}$$

$P_{wa}$  est la pression de la vapeur saturée (Nm<sup>-2</sup>).

H<sub>R</sub> est l'humidité relative de l'atmosphère (%).

$$\ln P_{wa} = 23.18986 - \frac{3816.42}{(T - 46.13)} \dots\dots\dots \text{II.11}$$

La température en K.

**II.4.2 Energie générée par l'explosion**

L'énergie nécessaire pour générer un BLEVE est fournie par les phases vapeur et liquide. Alors que l'énergie de la phase vapeur est disponible dès le début du processus de défaillance, l'énergie du liquide n'est disponible qu'après un changement de phase [29]. En cas de dépressurisation rapide, de grandes surchauffes peuvent se produire, entraînant une ébullition très énergétique. Selon Birk et coll[30] . Dans ce cas, l'énergie interne du système se transforme en énergie mécanique.

$$W = m_g \cdot (U_2 - U_1) \dots\dots\dots \text{II.12}$$

W est l'énergie mécanique de la vapeur (travail de dilatation en KJ).

m<sub>g</sub> est la masse de la vapeur (Kg).

U<sub>1</sub> est l'énergie interne de la vapeur dans les conditions initiales c'est-à-dire au moment de l'explosion, U<sub>2</sub>( KJ.Kg<sup>-1</sup>) l'énergie interne de la vapeur après dilatation jusqu'à la pression atmosphérique.

Connaissant la loi du travail qui est égale à :

$$W = - \int P dV$$

En considérant que la dilatation est isentropique, on peut introduire PV<sup>γ</sup> = constant et après intégration, on obtient :

$$W = 10^2 \cdot \left( \frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \dots\dots\dots \text{II.13}$$

P<sub>0</sub> est pression atmosphérique (bar)

V est le volume initial de la vapeur (m<sup>3</sup>).

P est la pression dans le réservoir juste après l'explosion (bar).

Cette énergie est exprimée en TNT équivalent masse en utilisant le facteur de conversion d'énergie adéquat qui est approximativement égale à 4680 KJ.Kg<sup>-1</sup> de TNT :

$$W_{\text{TNT}} = 0.021 \cdot \left( \frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \dots\dots\dots \text{II.14}$$

Si le fluide est un liquide surchauffé comme dans le cas d'une explosion d'un BLEVE, L'énergie libérée est calculée de la même méthode sauf qu'il est nécessaire de connaître le volume de la vapeur généré par la vaporisation partielle du liquide surchauffé [31], dans ce cas :

$$W_{\text{TNT}} = 0.021 \cdot \left( \frac{P \cdot V^*}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)$$

$$V^* = V + V_l \cdot f \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)$$

V est le volume de la vapeur dans le réservoir avant l'explosion (m<sup>3</sup>).

V<sub>l</sub> est le volume du liquide dans le réservoir avant l'explosion (m<sup>3</sup>).

f : est la fraction vaporisée.

$$f = \frac{c_{pl} \cdot (T - T_0)}{\Delta h_{vT_0}}$$

Où T est la température du fluide au moment de l'explosion,

T<sub>0</sub> est la température d'ébullition à la pression atmosphérique (K)

Δh<sub>vT<sub>0</sub></sub> est la chaleur de vaporisation du liquide à T<sub>0</sub> (kJ kg<sup>-1</sup>).

Ou bien, avec cette équation, qui est plus précise :

$$f = 1 - e \left[ -2.63 \frac{c_{pl} T_0}{H_{vT_0}} (T_c - T_0) \left( 1 - \left( \frac{T_c - T}{T_c - T_0} \right)^{0.38} \right) \right]$$

Où T<sub>0</sub> est la température d'ébullition de la substance à la pression atmosphérique (K),

$T_c$  est la température critique (K),

$C_{p,T_0}$  est la chaleur spécifique du liquide ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) à  $T_0$ ,

$\Delta h_{v,T_0}$  est l'enthalpie de vaporisation de la substance à  $T_0$  ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ).

Pour une dilatation adiabatique irréversible, le travail est égal à l'énergie interne suivant l'équation :

$$-P_{atm}\Delta V = \Delta U$$

Cette équation est résolue graphiquement, en traçant sur le même graphe la variation de travail ( $P_{atm}\Delta V$ ) et la variation de l'énergie interne ( $\Delta U$ ) pour différentes conditions d'équilibre liquide-vapeur correspondant à différentes valeurs de fraction de vapeur [31]. L'équation II.14 peut également être résolue analytiquement en utilisant des bilans massiques et énergétiques.

$$-\Delta U = x M_{total} (u_{liq} - u_{gas}) - M_{total} u_{liq} + U_i$$

$$-P_{atm}\Delta V = P_0(x(v_{liq} - v_{gas})M_{total} + M_{total} v_{liq} - V_i)$$

Où  $x$  est donné par la relation suivante :

$$x = \frac{P_{atm} v_{liq} M_{total} - V_i P_{atm} + M_{total} u_{liq} - U_i}{[(u_{liq} - u_{gas}) - (v_{gas} - v_{liq})P_{atm}]M_{total}}$$

Avec :

$U_{liq}$  et  $U_{gaz}$  sont respectivement, l'énergie interne du liquide et de la vapeur à l'état final du processus irréversible ( $\text{kJ / kg}$ );

$V_{liq}$  et  $V_{gaz}$  sont respectivement, le volume spécifique du liquide et de la vapeur à l'état final de l'irréversible processus ( $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$ );

$M_{total}$  la masse totale du réservoir (kg);

$U_i$  est l'énergie interne globale du système juste avant l'expansion (kJ);

$V_i$  est le volume du réservoir ( $\text{m}^3$ ).

Les deux relations précédentes nous permettent d'estimer la variation de l'énergie interne, la TNT équivalent masse est donnée par :

$$W_{TNT} = \beta \frac{1}{4.68} \Delta U$$

$\beta$  est la fraction de l'énergie libérée convertie en onde de souffle.

### II.4.3 Onde de surpression

L'évolution de la surpression issue de l'explosion d'un liquide surchauffé et la vapeur présentent généralement deux pics de surpression séparés par un temps très court. Le premier pic correspond à l'expansion de la vapeur et le second à une violente vaporisation du liquide.

Birk et coll. ainsi que le «Livre jaune» [32] propose une procédure pour déterminer la surpression du souffle.

- Energie efficace des ondes de souffle, la libération d'énergie devrait être corrigée pour ne tenir compte que de l'énergie convertie en travail. Elle est calculée par la formule suivante :

$$E_{\text{eff}} = \varepsilon E_{\text{libérée}}$$

Où  $\varepsilon = 1$ , si le réservoir est en haut par rapport au sol et  $\varepsilon = 2$ , si le réservoir est à une hauteur de 15 ° au-dessus du sol.

- Estimation de la distance réduite  $\bar{R}$

$$\bar{R} = r \left( \frac{P_{\text{atm}}}{E_{\text{ex}}} \right)^{1/3}$$

$r$  est la distance en m entre le centre du nuage et le seuil de surpression (m).

- Estimation de la surpression du souffle, est déterminée graphiquement (**Figure II.4**)

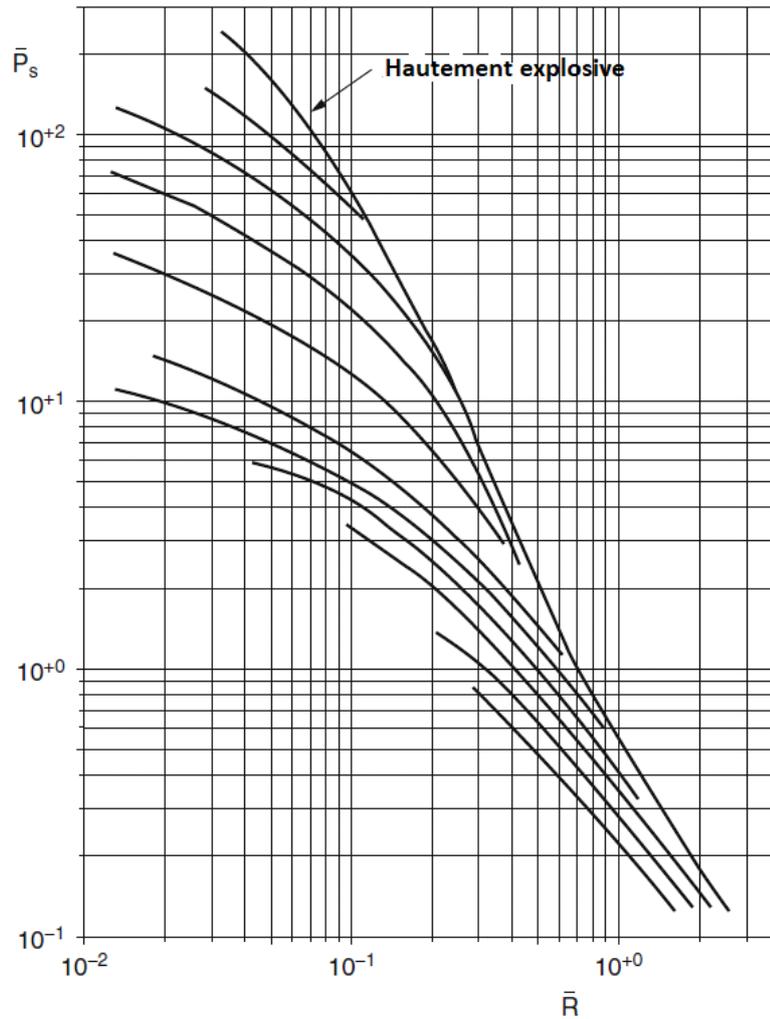


Figure II.5 : Abaque donnant la surpression en fonction de la distance réduite [12].

**II.4.4 Les missiles**

La distance atteinte par les projectiles est liée la vitesse initiale et la masse du fragment. La vitesse initiale peut être considérablement affectée par la forme du fragment et les conditions de rupture du vaisseau. Cela dépend également du pourcentage de l'énergie d'explosion qui est transférée aux fragments sous forme d'énergie cinétique; valeurs allant entre 5% et 20% ont été suggérés [33].

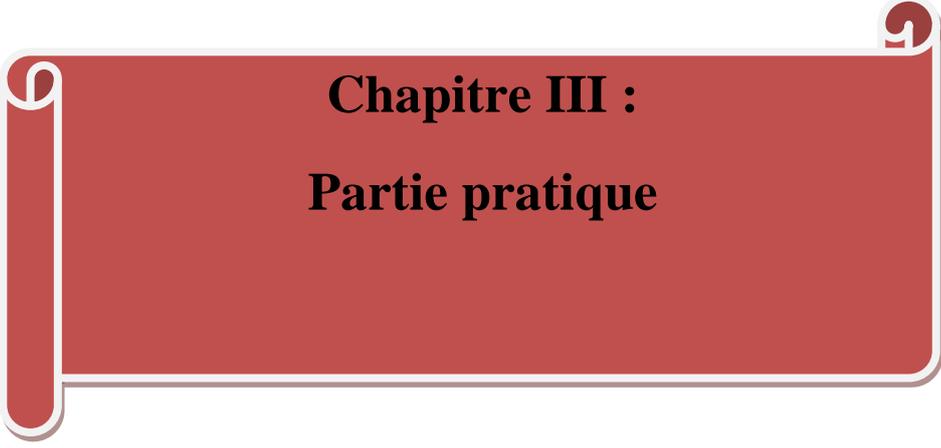
- Pour un réservoir de capacité  $< 5m^3$ , la distance est calculée à partir de :

$$L = 90 M^{0,33} \dots \dots \dots \text{II.15}$$

- Pour un réservoir de capacité  $> 5m^3$ , la distance est égale à :

$$L = 465 M^{0,1}$$

**M** est la masse de la substance (Kg).

A red scroll banner with a white border and decorative scroll ends on the left and right sides. The text is centered on the banner.

**Chapitre III :**  
**Partie pratique**

### III.1 Introduction

Le BLEVE est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion comme c'est le cas des explosions de nuages gazeux, Il survient dans tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression, Il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour parler de BLEVE. Comme c'est un risque potentiel dans l'industrie de liquéfaction de GNL, notre étude portera sur l'évaluation de ce phénomène et ses conséquences sur les installations.

Pour cerner son impact sur la zone process, on a pris comme exemple un ballon de stockage HP MCR(G-780) du complexe GL1/Z.

### III.2 Scénario

Nous avons un ballon de MCR dont la paroi extérieure est exposée à un incendie. Le transfert continu de chaleur du feu à la paroi du ballon augmente la température et la pression à l'intérieur, jusqu'à ce que le réservoir se rompt. Cette défaillance soudaine du réservoir entraîne une vaporisation explosive de son contenu.

Lorsque la structure du ballon 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 ballon. 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 ballon et les zones environnantes.

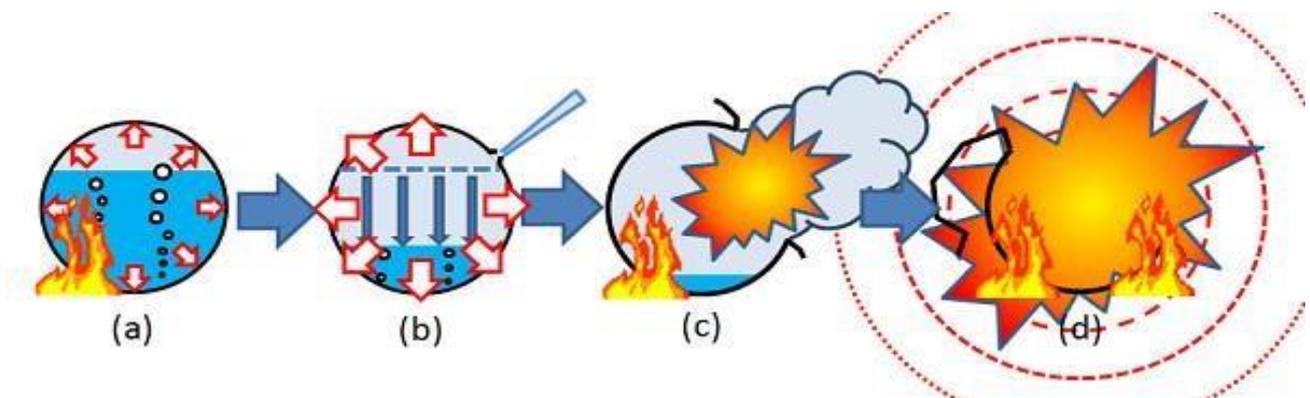


Figure III.1 Étapes de réalisation du BLEVE

## Chapitre III :Partie pratique

---

D'après les caractéristiques techniques [Fiche technique originale du ballon HP MCR (G-780)] on a :

- Poids au montage (vide) = 33792.45 kg ;
- Poids de tour de remplissage d'eau = 64228.34 kg ;
- Taux de remplissage = 70%
- Densité = 410.8 kg/m<sup>3</sup> ;

### III.3 Système multi composant réfrigérant MCR

Dans un procédé de liquéfaction avec pré-refroidissement au propane, le MCR (Réfrigérant à composants multiples ou mixtes) se compose de quatre constituants :

**Tableau III.1** : Caractéristiques du MCR.

Composants	Pourcentage massique(%)	Enthalpie (Kj/Kg)
Ethane	54,4	47.2345
Méthane	40,7	49.476
Propane	2,2	46.107
Azote	2,7	0

L'azote est le composant le plus léger qui permet d'obtenir une variation de température  $\Delta t$  suffisante lors de son passage à travers la vanne Joules Thompson à l'extrémité froide de l'échangeur principal.

Le propane est le composant le plus lourd qui permet d'établir un point de rosée dans la calandre, donc une  $\Delta t$  à l'extrémité chaude de l'échangeur.

Quant aux composants C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>, qui constituent le plus grand pourcentage dans le MCR, assurent une  $\Delta t$  entre les fluides côté tube et calandre de l'échangeur.

## Chapitre III :Partie pratique

---

### III.3.1 Rôle du système MCR

Le MCR fournit à l'échangeur principal la quantité de froid nécessaire à la liquéfaction du gaz naturel (GN) et la condensation des vapeurs de tête de la tour de lavage .Le principe utilisé est celui d'une boucle frigorifique classique basée sur le cycle « CARNOT ».

### III.4 Description de la boucle MCR

Le cycle de réfrigérant mixte est le cycle a basse température qui est utilisé principalement comme moyen final de refroidissement pour provoquer la liquéfaction du gaz naturel. Le réfrigérant au propane et l'eau de mer sont utilisés pour dissiper la chaleur de compression du flux de MCR. Le flux de MCR est un mélange de plusieurs composants, d'où son nom de réfrigérant mixte ou a composants multiples (MCR). Le flux se compose d'azote, de méthane, de propane et de traces de butane.

### III.5 Estimation du BLEVE sur le ballon HP MCR (G-780)

#### III.5.1 Diamètre de la boule de feu ( $D_{BF}$ )

La relation du diamètre de la boule de feu est égale à :

$$D_{BF} = 6.14 * M^{0.325} \dots\dots\dots [24]$$

#### ❖ Calcul du poids de (MCR)

Connaissant la masse du ballon rempli d'eau et sa masse lorsqu'il est vide, on peut déduire le volume d'eau nécessaire pour le remplissage :

$$P_{rempli-eau} = P_{eau} + P_{vide} \Rightarrow P_{eau} = P_{rempli-eau} - P_{vide}$$

$$P_{eau} = 64228,34 - 33792,45 \Rightarrow P_{eau} = 30435,89 Kg$$

$$\rho_{eau} = \frac{m_{eau}}{V} \Rightarrow V = \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}}$$

$$V = \frac{30435,89}{1000} = 30.435 m^3.$$

Donc le volume du ballon HP MCR (G-780) est 30,435 m<sup>3</sup>.

Ceci est valable pour un taux de remplissage de 100% ; Dans notre cas on a un taux de remplissage de 70 % , donc le volume devient :

## Chapitre III :Partie pratique

---

$$V = 21,305 \text{ m}^3$$

### Calcul de la masse de MCR dans le ballon à 70 % de remplissage

A partir de la relation de la masse volumique :

$$\rho_{\text{MCR}} = \frac{m}{V}$$

Comme le MCR est un mélange, la masse volumique est calculée à partir de la relation suivante :

$$\rho_{\text{MCR}} = \sum \rho_i \cdot y_i$$

$y_i$  sont les fractions massiques de chaque constituant,

Les masses volumiques des composants du MCR à leur température de liquéfaction et à pression atmosphérique sont :

$$\rho_{\text{éthane}} = 544,1 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{méthane}} = 422,62 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{propane}} = 581,2 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{azote}} = 1249,82 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\rho_{\text{MCR}} = 544,1 \times 0,544 + 422,62 \times 0,407 + 581,2 \times 0,022 + 1249,82 \times 0,027.$$

$$\rho_{\text{MCR}} = 511,56 \text{ Kg/m}$$

**La masse du MCR :**  $m_{\text{MCR}} = \rho_{\text{MCR}} \cdot V = 511,56 \cdot 21,305$

$$m_{\text{MCR}} = 10898,785 \text{ Kg.}$$

Donc le diamètre de la boule de feu est égale à :

$$D_{\text{BF}} = 266,264 \text{ m}$$

### III.5.2 Durée de combustion de la boule de feu

$$t_{\text{BF}} = 0.852 * M^{0.26} \dots\dots\dots [24]$$

$$t_{\text{BF}} = 0.852 * (10898,785)^{0.26}$$

$$t_{\text{BF}} = 21,15 \text{ sec.}$$

### ❖ Hauteur de centre de la boule de feu ( $H_{\text{BF}}$ ) :

$$H_{\text{BF}} = 4,35 M^{0,333} \dots\dots\dots [25]$$

$$H_{\text{BF}} = 4,35 (10898,785)^{0,333}$$

## Chapitre III :Partie pratique

$$H_{BF} = 206,98 \text{ m}$$

A présent, nous allons varier le taux de remplissage qui correspond à des différentes masses de MCR et on calcul les paramètres précédents, les résultats de calculs sont représentés sur le **Tableau III.2**.

**Tableau III.2** : Variation des paramètres de la boule de feu avec le taux de remplissage.

Taux de remplissage	$M_{MCR}$ (Kg)	$D_{BF}$ (m)	$t_{BD}$ (m)	$H_{BF}$ (m)
70	108985,3	266,264	21,158	206,982
65	101200,636	259,927	20,632	201,936
60	93415,9716	253,253	20,0783	196,625
55	85631,3073	246,192	19,493	191,009
50	77846,643	238,682	18,871	185,042

On remarque, que lorsque le taux de remplissage diminue, tous les autres paramètres diminuent au même temps, dans ce cas on peut dire que le taux de remplissage est proportionnel aux paramètres de la boule de feu. Ceci est évident car l'augmentation de la masse du MCR dans le ballon de stockage génère après explosion un diamètre et une hauteur plus importante et un temps plus long.

### III.5.3 Effet de rayonnement

#### III.5.3.1 Distance correspondant au seuil de létalité

**Nous avons :** (5 KW/m<sup>2</sup> = Mortalité de 1% par brûlures).

A partir de la formule suivante, on calcul  $d_L$  :

$$d_L = 3.12 * M^{0.425} \dots\dots\dots[34]$$

$$d_L = 3.12 * (10898,785)^{0.425}$$

$$d_L = 147.76 \text{ m}$$

### III.5.3.2 Distance correspondant au seuil de brulure significative

$$d_S = 4.71 * M^{0.405} \dots\dots\dots [34]$$

$$d_S = 4.71 * (10898,785)^{0.405}$$

$$d_S = 186.03 \text{ m}$$

### III.5.4 Effet de surpression sur l'être humain

#### III.5.4.1 Distance correspondant au seuil de létalité : (140 mB)

$$d_L = 3.84 * M^{0.33} \dots\dots\dots [34]$$

$$d_L = 3.84 * (10898,785)^{0.33}$$

$$d_L = 76.77 \text{ m}$$

#### III.5.4.2. Distance correspondant au seuil de brulure significative (50 mB)

$$d_S = 8.7 * M^{0.33}$$

$$d_S = 8.7 * (10898,785)^{0.33}$$

$$d_S = 173.95 \text{ m}$$

#### ❖ Vitesse de propagation

$$V = D_{BF} / t_{BF}$$

$$V = 266,264 / 21.15$$

$$V = 12.58 \text{ m/sec}$$

### III.5.5 le flux de chaleur

Le flux de chaleur est calculé à partir de la relation [35][36] :

$$\dot{q}_r'' = E_p \cdot F_v \cdot \tau_{atm}$$

$q_r$  est le flux de chaleur

$E_p$  : l'énergie de la surface émissive (KW/m<sup>2</sup>).

## Chapitre III :Partie pratique

---

$F_v$  : facteur de vue.

$\tau_{\text{atm}}$  : la transmissivité.

$$E_p = \frac{\chi_r M \Delta H_c}{\pi D_{FB}^2 t_{FB}}$$

$\chi_r$  : la fraction radiante ;

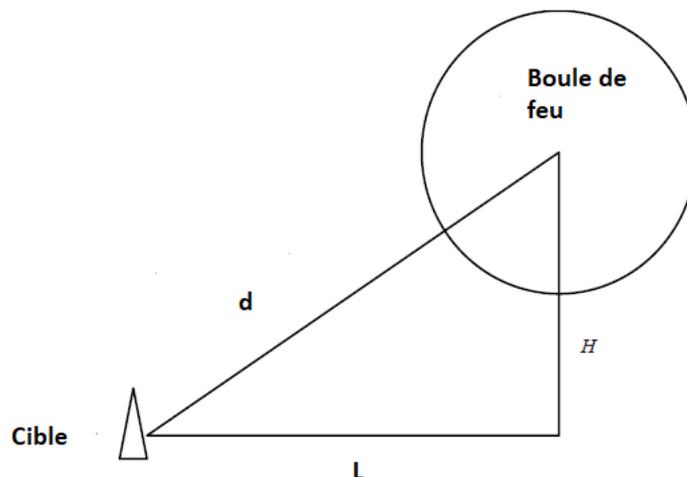
$$\chi_r = 0.27 P_0^{0.32}$$

$P_0$  est la pression du ballon.

$$F_v = \frac{D_{FB}^2}{4(H_{FB}^2 + d^2)}$$

$$\tau = 2.02 \cdot (P_w \cdot d)^{-0.09}$$

$P_w$  est la pression partielle de l'eau dans l'atmosphère ( $\text{Nm}^{-2}$ ),  $d$  est la distance entre le centre de la flamme et la cible, comme montrer sur la **Figure III.2**.



**Figure III.2** : Représentation graphique de la distance  $d$ .

Avec :  $d = \sqrt{H^2 + L^2}$

L'équation du flux de chaleur en remplaçant chaque terme par sa relation, on obtient :

$$q_r = \frac{\chi \cdot M \cdot \Delta H_c}{\Pi \cdot D_{FB}^2 \cdot t_{FB}} \cdot \frac{D_{FB}^2}{4(H_{FB}^2 + d^2)} \cdot 2,02 (P_w \cdot d)^{-0,09}$$

Si on considère que l'explosion conduit à une combustion totale du MCR, on peut par conséquent calculer la chaleur de combustion du MCR.

### Le calcul de la chaleur de combustion du MCR :

Comme il était mentionné précédemment sur les caractéristiques du MCR (Tableau III.1)

La chaleur de combustion d'un mélange est donnée par la formule suivante:

$$\Delta H_C = \sum y_i \cdot H_{Ci}$$

D'où :

$$\Delta H_C = 72.071 \text{ kJ/kg.}$$

### Calcul de la surface émissive :

Pour un  $D_{BF} = 266,264\text{m}$ ,  $t_{BF} = 21,158 \text{ s}$ , *on obtient* :

La fraction radiante est prise généralement  $\chi = 0,4$ . [35]

$$E_p = \frac{0,4(10898,785) \cdot (72,07)}{3,14 \cdot (266,264)^2 \cdot (21,158)}$$

$$E_P = 0,0665 \text{ Kw/m}^2$$

### Calcul du facteur de vu :

$$F_v = \frac{(266,264)^2}{4(206,982^2 + d^2)}$$

### Calcul de la transmissivité :

En considérant que l'humidité est à 60% à 20 °C, on peut calculer la pression de la vapeur saturée  $P_{wa}$  à partir de la relation suivante :

$$\ln P_{wa} = 23,18986 - \frac{3816,42}{(T - 46,13)}$$

$$\ln P_{wa} = 23,18986 - \frac{3816,42}{(297 - 46,13)}$$

## Chapitre III :Partie pratique

---

$$P_{wa} = 7,977 \text{ N/m}^2.$$

On peut par conséquent calculer  $P_w$  selon l'équation suivante :

$$P_w = P_{wa} \frac{H_R}{100}$$

$$H_R = 60 \%$$

$$P_w = (7,977) \frac{60}{100}$$

$$P_w = 4,786 \text{ N/m}^2.$$

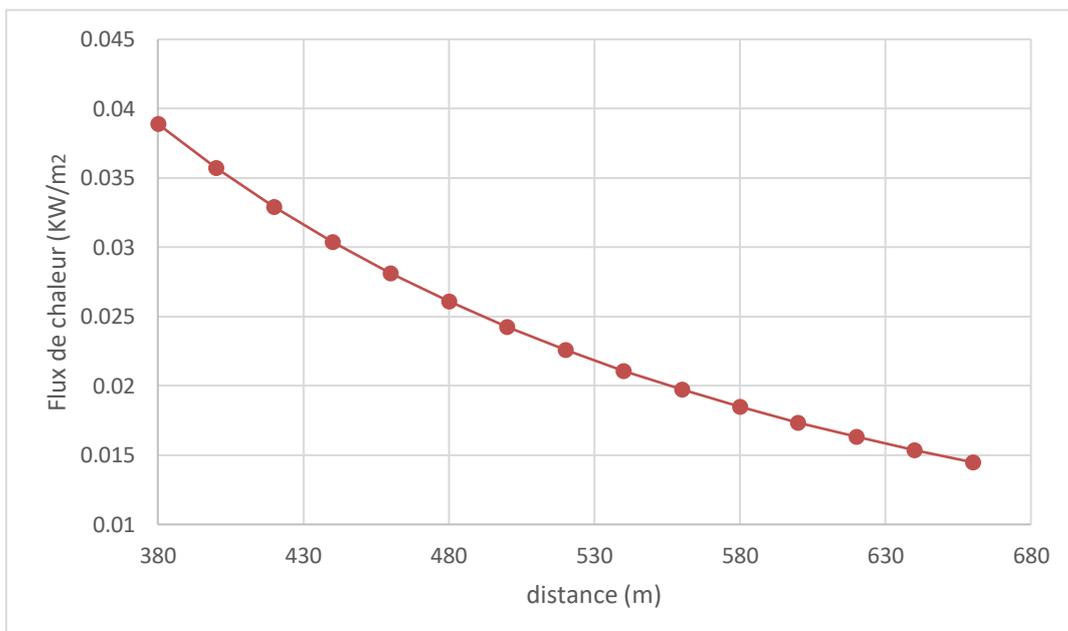
Donc la transmissivité est égale à :

$$\tau = 2,02 (4,786 \cdot d)^{-0,09}$$

L'équation du flux de chaleur devient:

$$q_r = \frac{12430,711 \cdot d^{-0,09}}{(206,982^2 + d^2)}$$

Le flux de chaleur est en fonction de la distance, en faisant varier la distance  $d$  (m), on obtient le graphe de la **Figure III.3**.



**Figure III.3:** Variation du flux de chaleur en fonction de la distance.

## **Chapitre III :Partie pratique**

---

On Remarque que le flux de chaleur est inversement proportionnel à la distance de la cible. En effet, au fur à mesure que la cible est éloignée de l'explosion, le flux de chaleur est moins important.

### **III.6 Méthode d'intervention**

Il est nécessaire pour nous de connaître les actions à entreprendre en cas d'une catastrophe tel qu'une explosion. En arrivant sur les lieux d'une intervention, on doit demeurer loin et utiliser des jumelles pour évaluer la situation au besoin. Il est bon d'établir un poste d'observation du réservoir afin de déterminer l'ampleur de la situation. Ce poste devrait être situé au-delà de la distance minimale d'approche, préférablement être dos au vent.

### **III.7 Prévention et protection technologique**

- Respect des règlements et codes de construction (calculs, matériaux, épreuves, distances de sécurité),
- Cuvette en pente avec réceptacle déporté et générateurs de mousse moyen foisonnement pour limiter l'évaporation des gaz liquéfiés après une fuite ;
- Limitation du nombre de piquages en phase liquide ;
- Injection d'eau dans l'équipement (technique provisoire);
- Ligne de purge d'eau en pente, calorifugée et tracée ( à la vapeur ou à l'électricité) avec robinetterie adéquate ;
- Instrumentation suffisante et adaptée (contacteurs de niveaux, de pression, de débit,..) ;
- Vanne de dépressurisation pour diminuer la pression et se décaler de la droite limite de surchauffe ;
- Protection thermique : calorifuge, ignifuge, peinture intumescente, mur écran (contre flux thermique d'un feu voisin), talutage ;

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

L'estimation des caractéristiques du phénomène du BLEVE sur un ballon de stockage de MCR dont le volume est de 30,435 m<sup>3</sup> avec un taux de remplissage de 70% en réfrigérant, nous a permis de tirer quelques conclusions :

La boule de feu générée lors du BLEVE du ballon de stockage étudié possède un diamètre de 266,26 m et une hauteur de 206,98m, la boule de feu a une durée de 21,15s.

La variation du volume du MCR dans le ballon de stockage influe de manière proportionnelle sur les autres paramètres de la boule de feu. En effet, un volume plus important en MCR produit une boule de feu de dimensions plus grandes dans un temps plus long.

L'estimation des effets du rayonnement thermique sur l'être humain est un facteur très important, la distance qui correspond au seuil de létalité est estimée à 147,76 m, inférieur à la distance au seuil de brûlures significatif qui est de 186,03m.

L'énergie libérée de la boule de feu lors du BLEVE du ballon de stockage est considérable, le flux de chaleur dégagée est en fonction de la distance de la cible, plus cette dernière est éloignée, plus le flux de chaleur est moins important.

Au final, le meilleur moyen de prévenir un **BLEVE** est d'empêcher qu'une situation potentielle ne survienne. Le territoire devrait être étudié et les endroits afin de procéder à une planification stratégique.

## **Résumé de mémoire :**

Le stockage de produit liquéfier telle que GPL sa compagnie des accidents majeurs comme l'explosion de BLEVE qui cause des effets grave sur la santé humaine, l'installation et l'environnement, c'est pour ça les entreprises pétroliers donnent beaucoup d'importance aux mesures de sécurité, le but principal de notre projet de fin d'études est l'étude des mesures de sécurité mise en place, , et nous avais du la priorité pour proposer des mesures de prévention, de protection et d'intervention et les comparaisons avec les mesures existant et finalement les recommandations.

### **التلخيص:**

يصاحب تخزين الغازات البترولية المميعة أخطار عدة، منها خطر الانفجار الذي يصاحبه أثار كارثية على صحة الانسان، وكذلك تأثير على المنشأة بحد ذاتها، لذلك تولي الشركات البترولية الناشطة في مجال البترول أهمية كبيرة لمقاييس الأمان، والهدف الرئيسي من هذا العمل دراسة مقاييس الأمان للشركة وذلك من خلال محاكاة لسيناريو انفجار في الخزان، وكانت الاولوية في إعطاء تعليمات في الوقاية والحماية والتدخل، ثم مقارنتها بالمقاييس الموجودة في المنشأة وفي الأخير الخروج بتوصيات ونصائح.

## **Bibliographie :**

- [1] Mémoire 2011 de **BENYAMINA NOURREDINE** « Etude et modélisation des effets thermiques de BLEVE sur la sphère de stockage de GOL au niveau de GP2/Z »
- [2] R. C. Reid, Science 203 « 1979 » 1263
- [3] CCPS, Center for chemical process safety, « Guideline for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVEs », AIChE New York, 1994
- [4] R. W. Prugh Chem. Eng. Progr. « 1991 » 66 Febr
- [5] CA Mcdevitt, CK Chan, FR délégué syndical, KN Tennankore, J. Hazard. Mater. 25 (1990) 169. CM Pietersen, S. Cendejas, Analysis of the LPG accident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, TNO, Report 85-0222, La Haye, 1985.
- [6] REMI GUILLEMENT- thèse doctorat « protection des réservoirs de stockage sous pression dans les flammes : l'arrosage par ruissellement d'eau et l'ignifugation » -SAINT ETIENNE Novembre 1992.
- [7] Site of the Mexico City BLEVE catastrophe. From Marshall, V.C., 1987. Major Chemical Hazards, Ellis Horwood Series in Chemical Engineering, Ellis Horwood Ltd/Halsted Press, A Division of John Wiley & Sons, Chichester/ New York, ISBN:0-470-20813-9.
- [8] ENSPM formation industrie, IFP training « Phénomène de BLEVE », 2005.
- [9] LACHTAR CRC 27/03/2009. Document USTO de Sécurité des Procédés Chimiques
- [10] Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques INERIS-DRA-2002. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006).
- [11] « Evaluation of the effect and consequences of major accidents in industrial plant » Volume 8. Industrial safety series.
- [12] J. M. Salla, M. Demichela, J. Casal. Journal of Loss Prevention in industry. Proc. Ind, 19 (2006) 690.
- [13] Morgan J Hurley « SFPE Handbook of protection fire engineering », fifth edition. Springer, 2016

- [14] R. C. Reid, "Possible mechanism for pressurized liquid tank explosions or BLEVEs," *Science*, vol. 203, p. 1263–1265, 1979.
- [15] Casal Joaquim « Evaluation of the effect and consequences of major accidents in industrial plant » Chapitre 5. Industrial safety series. Elsevier, 2008.
- [16] Eckholff, Rolf, K. « Explosion hazard in the process industries- Boiling liquid expanding vapor explosions » Chapitre 3.
- [17] Patrick-Yeboah, J.R., Reid, R.C., « Superheat-limit temperatures of polar liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* », 20, 315-317. 1981.
- [18] CCPS, « Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, 2nd ed. American Institute of chemical engineering ».2000.
- [19] CCPS. « Guidelines for consequence analysis of chemical releases. American Institute of Chemical Engineers », New York.1999.
- [20] Chakrabarty, A., Mannan, S., Cagin, T. « Multiscale modeling for process safety applications. Butterworth-Heinemann ». 2016.
- [21] Mannan, S. « Lee's loss prevention in the process industries : hazard identification, assessment, and control », 4th ed. Butterworth-Heinemann Elsevier, Amsterdam. 2012.
- [22] Papazoglou, I.A., Aneziris, O.N. « Uncertainty quantification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapour explosion phenomenon ». *J. Hazard. Mater.* 67.1999
- [23] Roberts, A.F., « Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage ». *Journal of Fire Safety*.4, 197–212. 1981.
- [24] TNO, 2005. « Methods for the calculation of physical effects (yellow book): CPR 14<sup>E</sup> », third edition.
- [25] Satyanarayana, K., Borah, M., Rao, P.G. « Prediction of thermal hazards from fireballs ». *Journal of Loss Prevention industry Process Ind.* 4, 344–347. 1991.
- [26] McGrattan, K. B., Baum, H. R., Hamins, A. *Thermal Radiation from Large Pool Fires*. NISTIR 6546. NIST, 2000.
- [27] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Sherwood T. K. « *The Properties of Gases & Liquids* ». McGraw Hill. New York, 1977.
- [28] CCPS. « Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety », American Institute of Chemical Engineers, New York, 1989.
- [29] A. M. Birk and M. H. Cunningham, "Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards," *J. Hazard. Mater*, vol. 48, p. 219–237, 1996.

- [30] E. Planas-Cuchi, J. Salla and J. Casal, "Calculation overpressure from BLEVE explosions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 17, p. 431–436, 2004.
- [31] C. v. d. Bosch and R. Weterings, "CPR 14E Yellow Book – Methods for the Calculation of Physical Effects," Committee for the Prevention of Disasters, The Hague, 2005.
- [32] T. Roberts, H. Beckett. « Hazard Consequences of Jet Fire Interactions with Vessels Containing Pressurized Liquids: Project Final Report ». HSL Report R04.029, PS/96/03, Buxton, 1996.
- [33] A. Tugnoli, G. Gubinelli, G. Landucci, V. Cozzani, *Journal Hazardous Mater.* 279 ,p 418\_427.2014
- [34]
- [35] ZHANG Qian, « Thermal radiation and impact assessment of the LNG BLEVE fireball», *Journal Procediaengineerig.* p 602-606, 2013.
- [36] Sellami.J, « BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry » *Journal lossprevention.* 2018.