



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté de Sciences et Techniques
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Mécanique Énergétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Mohammed Saddek Selami

Le : dimanche 27 juin 2021

Evaluation quantitative des effets de surpression d'une explosion : Cas de phénomène UVCE

Jury :

Pr.	Abdelhafid MOUMMI	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Abdelghani LAKROUNE	MAA	Université de Biskra	Examineur
Dr.	Hefaidh HADEF	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Dédicace

Dédicace

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

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

Ma belle rose maman

Mon cher père

*Mes frères, mes sœurs et toutes mes familles,
À toutes mes amies, À ceux qui m'ont apporté toujours soutien et
bonheur dans la vie,*

Enfin je voudrais me remercier

Selami Mohammed Saddek

Remerciements

Remerciement

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à finir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre reconnaissance à mon encadreur **Mr Hefaidh HADEF** pour ses efforts et conseils précieux, ses remarques ainsi que pour sa compréhension durant la réalisation de ce modeste travail. Nous lui souhaitons également du succès dans sa vie, en espérant qu'il trouve dans ce mémoire l'expression de notre estime et de notre respect les plus profonds.

Nous remercions également nos membres de jury **Professeur Abdelhafid MOUMMI** et **Dr Abdelghani LAKROUNE** pour leurs commentaires et corrections avisés.

Nous remercions **Mr. El Bouti Salami** pour ses précieux conseils, son suivi et son intérêt pour nos travaux.

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 et tous ceux qui se sont intéressés à notre mémoire.

En guise de reconnaissance, nous tenons à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'étude et à l'élaboration de ce travail.

Table des matières

Table des matières

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	9

Chapitre 1: Les risques liés au stockage de GPL

1.1	Introduction	12
1.2	Généralité sur le GPL	12
1.2.1	Historique	12
1.2.2	Définition des GPL	12
1.2.3	Composition chimique	13
1.2.4	Propriétés des GPL	14
1.3	Risques liés aux stockages de GPL	14
1.3.1	Le stockage du GPL	15
1.3.2	Risque des GPL	15
1.4	Le phénomène dangereux lié au stockage de GPL	16
1.4.1	Phénomène BLEVE (Boiling Liquid Vapor Explosion et en français : explosion de vapeur en expansion d'un liquide en ébullition »	16
1.4.2	UVCE : Unconfined Vapeur Cloud Explosion	20
1.4.3	Jet Enflammé	26
1.5	Retour d'expérience sur les accidents impliquant des stockages de GPL	26
1.5.1	Texas City (Etats-Unis), 30/05/1978	26
1.5.2	Izmit (Turquie), 28/07/2002	27
1.5.3	11 décembre 2005, une importante explosion au dépôt de Buncefield en Angleterre	28
1.6	Conclusion	29

Chapitre 2 : modèles utilisée pour la modélisation des effets de surpression

2.1	Introduction	31
2.2	Type d'explosion	31
2.2.1	Méthodes de modélisation des explosions	32
2.3	Modélisation de l'effet de surpression	33
2.3.1	Modèle TNO-Multi-énergie	34
2.3.2	Modèle équivalent TNT	42
2.4	Comparaison de deux modèles	45
2.5	Conclusion	45

Chapitre 3 : étude de cas

3.1	Présentation de l'entreprise	47
-----	------------------------------	----

Table des matières

3.1.1	Description du centre (CSTF)	47
3.1.2	Localisation du site de centre et installations voisines	47
3.1.3	Principales installations de stockage	48
3.1.4	Description du fonctionnement du site de stockage et de transfert du GPL	48
3.1.4.1	Section de stockage et de transfert du GPL	50
3.1.4.2	Section de compression du GPL	50
3.1.4.3	Section de torche	51
3.1.4.4	Section de vide-vite	51
3.1.4.5	Utilités	51
3.2	Présentation de système étudiée : description de zone de stockages GPL + choix d'une sphère à étudiée)	52
3.2.1	Caractéristiques techniques de la sphère 50-T016	52
3.2.2	Equipements de la sphère de stockage GPL 50-T016	52
3.3	Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios UVCE	54
3.3.1	Identification de scénario d'accident	54
3.3.2	Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios d'accidents choisie (UVCE)	55
3.3.2.1	Collecte des données d'entrée	55
3.3.3	Seuils de référence pour les effets de surpression	55
3.3.4	Résultats et discussions de simulation à l'aide de modèle TNO-Multi- énergie	55
3.3.4.1	Calcul de volume explosible	56
3.3.4.2	Calcul de l'énergie de combustion	57
3.3.4.3	Calcul du rayon caractéristique	58
	Le rayon caractéristique est calculé par la formule suivant :	58
3.3.4.4	Détermination du rayon du cercle de dommage	58
3.3.4.5	Calcul de la distance d'effet de surpression	59
3.4	Conclusion	61
	Conclusion générale	62
	Références bibliographique	63

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1 : Étapes de réalisation du BLEVE	17
Figure 1.2 : Principe de phénomène UVCE	21
Figure 1.3 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion accidentelle de Gaz	22
Figure 1.4 : Régimes de combustion UVCE (Image 1, 2, 3, 4)	23-24
Figure 1.5 : Dépôt de Buncefield en Angleterre	29
Figure 2.1 : Typologies des explosions	31
Figure 2.2 : Modélisation des explosions confinée et des explosions non confiné	33
Figure 2.3 : Représentation d'une zone encombrée et zone libre	36
Figure 2.4 : Approche complète selon le guide de l'UFIP	40
Figure 2.5 : Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite	41
Figure 2.6 : Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite	44
Figure 3.1 : Installation voisines de centre	47
Figure 3.2 : Plan synoptique	49
Figure 3.3 : Scénario d'accident retenu pour l'étude	54
Figure 3.4 : Zone de stockage CSTF à Hassi R'mel	56
Figure 3.5 : Abaque pour le calcul de distance réduite	58
Figure 3.6 : Comparaison entre les distances d'effet de surpression pour des différents taux de recouvrement	60

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques des composants des GPL	13
Tableau 1.2 : comparaison entre BLEVE chaud et BLEVE froid	17
Tableau 1.3 : causes de BLEVE	20
Tableau 1.4 : paramètre propre à l'environnement et au mélange gazeux	25
Tableau 2.1 : Donnée nécessaire pour déterminer le volume inflammable dans la zone concernée	35
Tableau 2.2 : Hypothèses sont proposées à l'utilisateur pour définir le taux de recouvrement par le nuage de la zone étudiée.	37
Tableau 2.3 : Correspondance entre les surpressions maximales et les indices de Sévérité	37
Tableau 2.4 : Grille de KINSELLA	38
Tableau 3.1 : Principales installations de stockage	48
Tableau 3.2 : Caractéristiques techniques de la sphère 50-T016	52
Tableau 3.3 : données d'entrée de simulations	55
Tableau 3.4 : Seuils de surpression des effets sur l'homme et des effets dominos	55
Tableau 3.5 : Tableau récapitulatif des résultats de calculs des différents volumes	56
Tableau 3.6 : Résultats de calcul des distances d'effet de surpression	59
Tableau 3.7 : Tableaux récapitulatifs des distances d'effet de surpression pour des différents taux de recouvrement	60

Introduction générale

La production, le stockage et l'utilisation d'une quantité toujours croissante de produits dangereux (produits inflammables comme par exemple le GPL) entraînent dans l'industrie une augmentation considérable des risques des accidents majeurs. Pour maîtriser ces risques et protéger les travailleurs, la population et l'environnement, il est indispensable de mettre en œuvre de façon systématique un ensemble de mesures bien défini sur la base des études de dangers et des études de sécurité.

Pour réduire les risques associés à ce type d'accidents, des mesures de sécurité de prévention, 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.

Dans le cadre de notre mémoire de master académique, nous modélisons les effets de surpression liés à un phénomène accidentel qu'est un nuage de gaz inflammables à l'air libre, phénomène souvent désigné par l'acronyme U.V.C.E. tiré de l'anglais « Unconfined Vapour Cloud Explosion », peut conduire à des pertes en vies humaines et à des dégâts matériels extrêmement importants. A cet égard, les explosions accidentelles survenues en Angleterre à Flixborough en 1974 et en France à La Mède en 1992 sont des exemples particulièrement marquants à ce type d'explosion.

Dès lors, la maîtrise des risques technologiques passe notamment par une évaluation des conséquences potentielles des risques d'explosions de gaz. De nombreux travaux ont été entrepris de par le monde dans ce sens et à ce jour où les scientifiques ont mis au point de nombreuses modèles utilisées pour évaluer la gravité des accidents. Les modèles les plus utilisées sont le modèle TNO-Multi-énergie et le modèle équivalent TNT.

Et en Algérie, le risque majeur de l'entreprise SONATRACH c'est le risque d'explosion avec les différents phénomènes qui peuvent se réaliser dans les différents secteurs d'activité et parmi ces scénarios (ou phénomène). Nous avons pris le phénomène UVCE explosion à l'air libre et on essaye de le modéliser au niveau d'un centre de stockage de GPL à Hassi R'mel.

Et pour atteindre cet objectif, ce mémoire est consistant de trois chapitres comme suivant :

- Chapitre 1: le risque lié au stockage de GPL, a pour objectif de présenter quelque généralité sur le GPL, les risques liés aux stockages de GPL et les phénomènes dangereux liés au stockage de GPL.
- Chapitre 2 : nous présentons les modèles utilisés pour la modélisation des effets de surpression, et particulièrement : l'équivalent TNT et le modèle TNO Multi-énergie.
- Chapitre 3: pour réaliser notre étude de cas, nous présentons le site du stockage de GPL "CSTF" de SONATRACH-DP Hassi R'mel et, nous présentons en détail la sphère de stockage GPL (50/60-T001~006). Puis, nous avons appliqué la méthode TNO-multi-énergie pour calculer les distances d'effets de suppression causée par UVCE.

Chapitre 1 : les risques liés au stockage de GPL

1	CHAPITRE 1 : Les risque lié au stockage de GPL.....	12
1.1	Introduction	12
1.2	Généralité sur le GPL.....	12
1.2.1	Historique	12
1.2.2	Définition des GPL.....	12
1.2.3	Composition chimique.....	13
1.2.4	Propriétés des GPL.....	14
1.3	Risques liés aux stockages de GPL	15
1.3.1	Le stockage du GPL	15
1.3.2	Risque des GPL.....	15
1.4	Le phénomène dangereux lié au stockage de GPL.....	16
1.4.1	Phénomène BLEVE (Boiling Liquid Vapor Explosion et en français : explosion de vapeur en expansion d'un liquide en ébullition)	16
1.4.2	UVCE : Unconfined Vapeur Cloud Explosion.....	20
1.4.3	Jet Enflammé	26
1.5	Retour d'expérience sur les accidents impliquant des stockages de GPL	26
1.5.1	Texas City (Etats-Unis), 30/05/1978.....	26
1.5.2	Izmit (Turquie), 28/07/2002	27
1.5.3	11 décembre 2005, une importante explosion au dépôt de Buncefield en Angleterre ..	28
1.6	Conclusion.....	29

CHAPITRE 1 : Les risque lié au stockage de GPL

1.1 Introduction

Dans le cadre de notre mémoire de master académique, nous allons présenter des généralités sur le GPL et les risques liés aux stockages de GPL à travers les phénomènes dangereux suvenent survenus. Et enfin, nous présentons quelques accidents de références à titre d'exemple.

1.2 Généralité sur le GPL

1.2.1 Historique

La découverte du GPL (gaz de pétrole liquéfié) ou LPG (liquéfié pétroleur ganses) est beaucoup Plus récente que celle du pétrole. En effet elle remonte au 24 décembre 1910 en Virginie (USA), Lorsque l'ingénieur de la Riverside Oïl Compagnie, H. STUKEMAN, réussit pour la première fois à Obtenir les 658 premiers litres de GPL liquide.

C'est en 1912 que fut expérimentée la première installation domestique au GPL. Dans la même année, la carburation automobile au GPL fit ses premiers pas. Le pré-développement de cette invention prit cependant une dizaine d'années. En 1922, les statistiques officielles font état de 417 tonnes de GPL vendues dans l'ensemble des États-Unis. Les compagnies pétrolières commencent à s'intéresser au GPL et le commercialisent dès 1927, l'impulsion est alors donnée et en 1930, vingt ans après leur découverte, la consommation de GPL aux États-Unis atteignait 32200 tonnes.

En Algérie, suite à une phase d'étude et d'expérimentation entamée en 1977, la décision d'introduire le GPL carburant « Sirghaz » est intervenue en 1983 avec l'adoption de la bicarburation et la mise en place de la réglementation liée aux conditions d'utilisation et de distribution du GPL. [1] [2]

1.2.2 Définition des GPL

Le GPL est un mélange d'hydrocarbures composé essentiellement de butane et du propane à température ambiante et pression atmosphérique, et peut passer à l'état liquide sous les conditions suivantes :

- Pression relevée à la température ambiante.
- Pression atmosphérique et basse température.
- Pression modérée et température pas tellement basse.

Cette qualité permet d'être conservée dans un volume réduit (**250 Litres** de GPL gazeux égale à un litre de GPL liquide). La composition des GPL est variable selon les normes et ses utilisations dans différents Pays. Il peut contenir ; le propylène, butène, une faible quantité de méthane, éthylène,

Pentane, exceptionnellement des hydrocarbures comme le butadiène, l'acétylène et le Méthylacrylique.

Les GPL sont utilisés dans les secteurs tertiaires et industriels en tant que combustibles, dans la pétrochimie en tant que charge, dans le secteur de transport en tant que carburant et pour la production d'électricité. [3] [4]

1.2.3 Composition chimique

La composition chimique d'un gaz c'est la nature des hydrocarbures et les autres constituants qu'il renferme, leur importance relative dans le mélange et leur fraction volumique où Moléculaire. La composition chimique d'un gaz est utilisée pour étudier la vaporisation et Calculer certaines de ces propriétés en fonction de la pression et la température. [5]

Tableau 1.1 : Caractéristiques des composants des GPL [6, 7]

	Propane	Isobutane	N-butane
Formule chimique	C3H8	iC4H10	nC4H10
Tension de vapeur à 10°C (kg/cm2)	6,2	1,3	1,5
Point d'ébullition à 760mm Hg (°C)	-42	-11,7	-0,5
Densité du liquide à 15°C	0,51	0,56	0,58
Litres de gaz obtenus à partir d'un litre de Liquide	272,7	229,3	237,8
Densité de la vapeur à 15°C	1,86	2,45	2,45
Pouvoir calorifique supérieur (kcal/kg)	11 980	11828	11 586
Température d'auto inflammation (°C)	480	480	420
Kg d'air comburant par kg de gaz	15,8	15,6	15,6
Nombre d'octane	96	97	89
Limite d'explosion (%)	2,2 à 9,4	--	1,9 à 8,5
TVR à -20°C	2,6	0,6	0,5
TVR à 0°C	5	1,7	1,1
TVR à +20°C	9	2,3	2,2

TVR à +40°C	14,5	5,7	4
-------------	------	-----	---

1.2.4 Propriétés des GPL

- **Densité** : dans l'état gazeux il est plus lourd que l'air : La densité du propane est de 0.51 et celle du butane est de 0.58.
- **Dilatation** : à l'état liquide, il a un coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors leur stockage, car les sphères ne doivent jamais être remplies complètement.
- **Tension de vapeur** : Le GPL à une tension de vapeur à 20°C :
 - ✓ égale à 2 bars pour le butane.
 - ✓ et 8 bars pour le propane.
- **Température d'ébullition** : les températures d'ébullition à la pression atmosphérique sont de :
 - ✓ -6°C pour le butane
 - ✓ 42°C pour le propane
 - ✓ 25°C pour le GPL.
- **Pouvoir calorifique** : le pouvoir calorifique du GPL est élevé, il est égal à :
 - ✓ Butane = 29460 (i-C4) ; 29622 (n-C4)
 - ✓ Propane = 22506
- **Odeur et couleur** : GPL est incolore et pratiquement inodore, pour des raisons de sécurité on lui donne une odeur particulière au moyen de substances appropriées (mercaptans),,,,
- **Toxicité** : GPL s'enflamme dans l'air, il émet un gaz considéré comme toxique. Le gaz en question dénommé le monoxyde de carbone est formé suite à une combustion
- **Explosibilité et inflammabilité** : GPL est un gaz explosif lorsqu'il se mélange avec l'air ou l'oxygène. La limite d'inflammabilité inférieure du GPL est très basse et comme le point d'éclair des GPL est très bas, il s'enflamme facilement en cas de fuite.

1.3 Risques liés aux stockages de GPL

1.3.1 Le stockage du GPL

Le gaz de pétrole liquéfié est stocké sous pression dans des réservoirs de stockage sphériques. Au cours du processus de stockage, la vapeur de gaz de pétrole liquéfié est émise par ébullition dans les conditions suivantes :

- La convection et la radiation de chaleur atmosphérique.
- L'échauffement dû à la friction des GPL produits dans les canalisations.
- La différence de la température entre le liquide stocké et celui à introduire dans le réservoir.

Afin d'éviter la perte de ces vapeurs, les paramètres de stockage doivent être maintenus dans Une plage bien déterminée. Pour cette raison, un système de réfrigération par compression, Refroidissement et détente des vapeurs sont utilisés.

Ces vapeurs sont comprimées de 5.3 bars à 19.0 bars, 115 °C par un compresseur alternatif Puis condensées à 54 °C dans un aéroréfrigérant et enfin détendues à 5 bars. Ceci permet le refroidissement de la sphère et par conséquent la réduction de sa pression. [8]

Il est à noter que certaines unités utilisent d'autres technologies de stockage, à savoir

- Stockage dans des sphères protégées par des pare-soleil des pressions variables entre 12.5 et 14.5 bars.
- Stockage sous pression de fuel gaz dans des cigares.

1.3.2 Risque des GPL

Le GPL peut constituer une source de danger dans la mesure où les précautions suivantes n'ont pas été prises en considération : [9]

- GPL peut présenter un risque d'incendie dès qu'une fuite se produit ou dès que le gaz S'échappe dans l'atmosphère.
- GPL ne jamais remplir dans les réservoirs à plus de 85 %.
- leur vapeur est plus lourd que l'air, ce qui provoque son accumulation dans les points les Plus bas, donc il faut éviter les cavités, aérer et ventiler les endroits pollués.
- Il à une viscosité faible, ce qui le rend un fluide qui présente beaucoup de fuite, donc il faut Éviter au maximum les assemblages non soudés.
- Purger les canalisations de liquide après dépotage afin d'éviter les risques de rupture des Réservoirs s'ils sont sur remplis.

1.4 Le phénomène dangereux lié au stockage de GPL

1.4.1 Phénomène BLEVE (Boiling Liquid Vapor Explosion et en français : explosion de vapeur en expansion d'un liquide en ébullition »

1.4.1.1 Définition du BLEVE

Le BLEVE est un acronyme qui signifie "Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion".

- BLEVE est un type d'explosion qui se produit à la rupture d'un équipement contenant un liquide dont la tension de vapeur est très supérieure à la pression atmosphérique.

- Est une explosion du résultat Rupture catastrophique du réservoir de gaz liquéfié comprimé. La rupture de la cuve expose le gaz liquéfié directement à l'environnement environnant. La chute de pression soudaine provoquera une évaporation très explosive de la majeure partie du liquide. L'onde de souffle et même l'onde de choc peuvent être créées pour avoir un effet dévastateur sur l'environnement, les corps humains [1].

Ce phénomène de BLEVE peut être divisé en plusieurs étapes successives

- 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).

1.4.1.2 Processus de réalisation du BLEVE

Un BLEVE se produit lorsqu'un réservoir contenant un gaz liquéfié est cassé, entraînant une libération immédiate de la vapeur, du liquide bouillant, des missiles (fragments de réservoir) et de la vague de souffle. Le type de BLEVE le plus courant se produit lorsque la paroi extérieure du réservoir est exposée au feu. Le transport de la chaleur de la chaleur continue sur la paroi du réservoir augmente la température et la pression dans le réservoir jusqu'à ce que le réservoir soit cassé. Cette défaillance soudaine du réservoir provoque une vaporisation explosive de son contenu.

Lorsque la structure du réservoir se fragilise, la vapeur essaie d'échapper ou de fuir l'ouverture, entraînant une diminution de la pression à l'intérieur du réservoir. Cette baisse drastique de la pression de la pression dans le réservoir provoque une ébullition rapide du fluide et une augmentation de la formation de la vapeur. La pression de vapeur qui s'échappe

devient trop élevée et conduit à une explosion détruisant complètement la structure du réservoir et des zones environnantes [3.4]

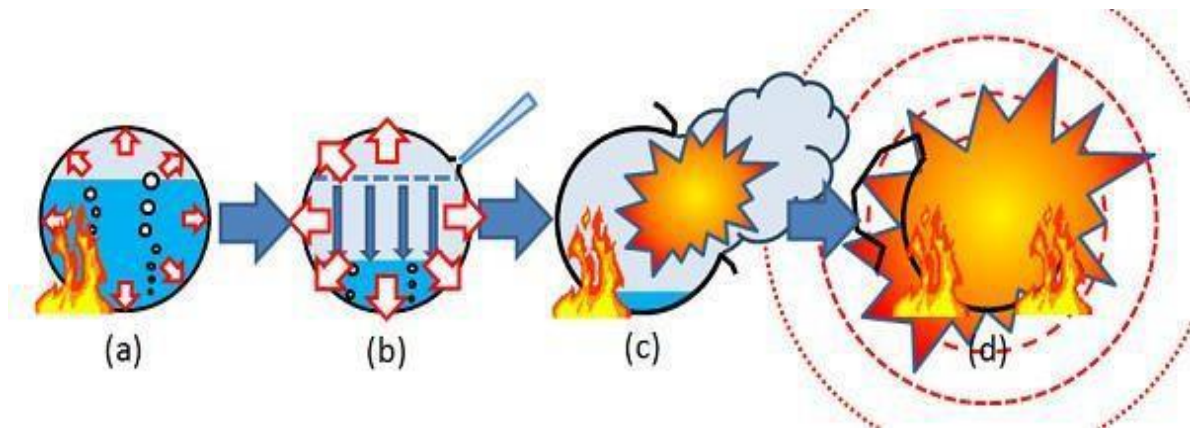


Fig. 1.1. Étapes de réalisation du BLEVE [3.4]

1.4.1.3 Types de phénomène BLEVE

Pour les BLEVE de réservoirs contenant du GPL 2 notions deux BLEVE sont définies. La notion de BLEVE froid ou chaud se réfère uniquement à la température limite de surchauffe (TLS) du produit : [11]

- 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 16 ci-dessous propose une comparaison synthétique entre les BLEVE "froids" et "chauds" d'après.

Tableau 1.2 : comparaison entre BLEVE "chaud" et BLEVE "froid" [10]

	BLEVE "chaud"	BLEVE "froid"
<i>Instants initiaux</i>	1) Température du liquide initialement au-dessus de la température limite de surchauffe 2) Le réservoir se rompt localement 3) Formation d'un jet 4) Dépressurisation 5) Remontée en pression du	1. Liquide en dessous de la limite de surchauffe 2. Ruine du réservoir due à des effets essentiellement mécaniques

	<p>réservoir du fait de l'ébullition</p> <p>6) 6. Ruine du réservoir</p>	
<i>Durée entre la rupture initiale et le rejet à caractère explosif</i>	<p>Quelques dixièmes de secondes après la formation d'une fissure de 20 cm</p>	<p>Quelques centièmes de secondes</p>
<i>Géométrie du réservoir après le BLEVE</i>	<p>Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles</p>	<p>Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles</p>
<i>Mode de rejet</i>	<p>Tout ou majeure partie du liquide est vaporisée instantanément</p>	<p>Une partie du liquide se vaporise instantanément, le reste est dispersé sous forme de gouttelettes</p>
<i>Boule de feu</i>	<p>Boule de feu classique ascendante</p>	<p>Nuage d'aérosol en feu au niveau du sol avec une boule de feu ascendante</p>
<i>Effets de surpression</i>	<p>Le bruit de l'onde de choc suggère d'importantes surpressions</p>	<p>Apparaissent relativement réduits d'après le niveau sonore de ce type de BLEVE</p>
<i>Projectiles</i>	<p>De grandes pressions de rupture ont le potentiel d'envoyer des projectiles sur d'importantes distances</p>	<p>Les faibles pressions de rupture limitent probablement la distance parcourue par les projectiles</p>
<i>Conditions nécessaires</i>	<p>Liquide chaud et rupture locale afin de déclencher une explosion par surchauffe</p>	<p>Réservoir peu résistant conduisant à sa ruine totale</p>

1.4.1.4 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 est la suivante : [13]

- 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 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 résolue 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 pic : détente brutale
- Deuxième pic : vaporisation explosive du liquide (selon Shield) / premier et deuxième pic associés au même phénomène (selon Birk)
- Troisième pic : combustion de la boule de feu

c) Missile

Lors de la rupture d'un réservoir des fragments peuvent être projetés à des distances élevées. [11].

1.4.1.5 Causes du BLEVE

Trois principales causes du BLEVE ont été identifiées, dont deux sont liées à des agressions externes : [12]

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 dû à un incendie voisin entraînant une rupture du métal sous l'action de la chaleur). Ce type de causes contribue pour 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.¹

Il est clair que le chauffage externe (EF) et les dommages mécaniques (MI) 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 [1].

Tableau 1.3 : causes de BLEVE [1].

Nature du réservoir	Impact mécanique	Agression thermique	Surremplissage 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 »	

1.4.2 UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion

1.4.2.1 Principe

L'UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) désigne une explosion de vapeurs non confinées. C'est l'explosion de nuages de gaz ou vapeurs dans l'atmosphère. Suite à une fuite de gaz inflammable (ex : rupture d'un réservoir de stockage), le mélange du gaz et de l'air

¹ Avec l'amélioration des normes de protection contre la surpression, on pourrait s'attendre à ce que la fréquence des accidents due aux phénomènes BLEVE provoqués par un remplissage excessif diminue considérablement.

forme un nuage explosible qui se diffuse. L'UVCE se produit quand ce nuage rencontre une source d'inflammation.

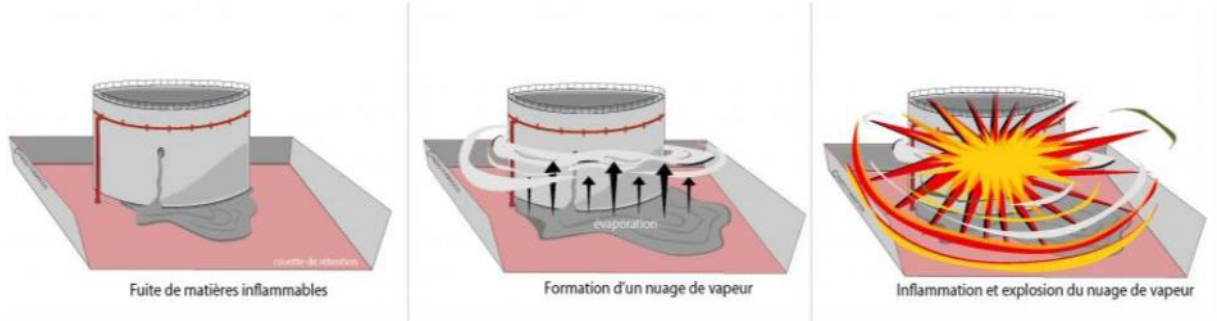


Fig 1.2..Principe de phénomène UVCE [14]

Le gaz peut avoir deux origines : fuite d'un gaz combustible liquéfié ou évaporation d'une flaque de liquide inflammable.²

- Conditions d'apparition

Un nuage de gaz combustible répondant aux critères d'explosibilité (les concentrations des combustibles est entre LI³ et LSI⁴) à l'air libre rencontre un point chaud.

Il est à noter qu'une très faible énergie est suffisante pour initier l'explosion (étincelle lorsqu'on bascule un commutateur électrique, ...). Par ailleurs, l'allumage peut se produire à une certaine distance du lieu de la fuite.

1.4.2.2 Description du phénomène

Les explosions de type VCE, constituent un des événements les plus redoutés dès lors qu'est considérée la sécurité des activités associées aux gaz inflammables. Ce type d'accident dû à l'explosion UVCE comprend généralement les étapes suivantes [15]:

1. rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible : le produit étant en phase gaz ou en phase liquide; les combustibles liquides rejetés peuvent rester en suspension (formation d'aérosols) ou se disperser au sol pour former une flaque qui en s'évaporant conduit à son tour à un rejet diffus de gaz,

² Un aérosol est un ensemble de fines particules, solides ou liquides, d'une [substance chimique](#) ou d'un mélange de substances chimiques, en suspension dans un milieu [gazeux](#)

³ Limite Inférieure d'Inflammabilité

⁴ Limite Supérieure d'Inflammabilité

2. Mélange de combustible avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable (les concentrations des combustible est entre LII et LSI)
3. De manière concomitante, dispersion⁵ et advection⁶ du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
4. Inflammation de ce volume,
5. Propagation d'un front de flamme au travers de la ou des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés ; dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de °C et jusqu'à 2000 °C environ ;
6. Enfin, le mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Et on peut résumer ces étapes par le processus présenté par la Fig. 1.3

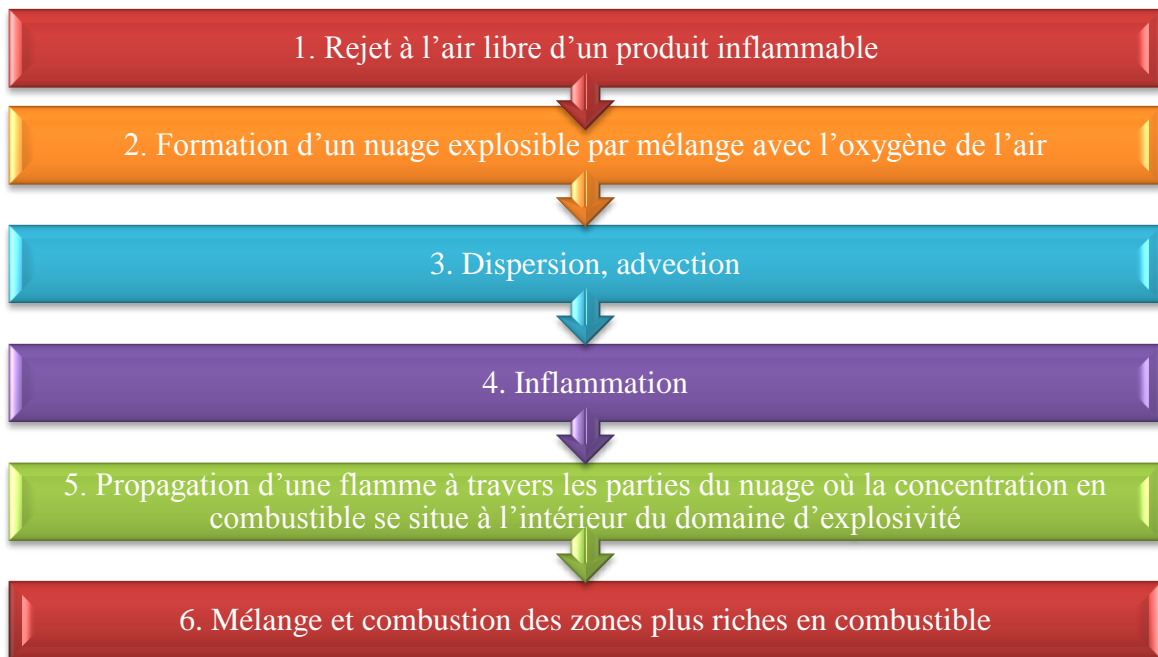


Fig. 1.3. Principales étapes dans le déroulement d'une explosion accidentelle de Gaz [16]

Remarque : Les conséquences de l'UVCE dépendent de :

- La masse de gaz combustible concerné, c'est à dire du volume du nuage.

⁵ En chimie des interactions intermoléculaires.

⁶L'advection est le transport d'une quantité telle que la chaleur, l'énergie interne, un élément chimique arbitraire, les charges électriques par le mouvement (et donc la vitesse) du milieu environnant.

- La composition du nuage de gaz.
- L'encombrement de l'espace.

Plus le nuage est important et plus on se rapproche d'une composition combustible/comburant idéale, plus les conséquences sont importantes. Par ailleurs, plus l'espace est encombré (tuyaux, véhicules, convoyeurs, ...), plus l'explosion sera violente.

1.4.2.3 Régimes de combustion UVCE

Une UVCE présente deux régimes principaux de propagation possibles du front de flamme : la déflagration et la détonation [15-17]

La déflagration est le régime de combustion le plus courant observé lors d'une UVCE. Plus rarement, il se produit le phénomène de détonation qui est défini par une source d'inflammation forte, une vitesse de l'onde de combustion supersonique (supérieure à la vitesse du son, de l'ordre de 1800 m/s) et par la propagation d'une onde de choc.

La vitesse du front de flamme est donc bien plus importante dans le cas d'une détonation : le front de flamme est alors le front de l'onde, il progresse plus vite que le sont dans le milieu, alors que dans le cas de la déflagration, la vitesse est limitée par la conduction thermique et la diffusion.

Lorsqu'une UVCE produit une déflagration, on observe successivement différents régimes de combustion au cours du temps. Pour expliquer ces différents régimes, nous allons modéliser les régimes de combustion en considérant un mélange gazeux initialement au repos contenu dans un cylindre possédant une extrémité ouverte. L'inflammation se déroule au centre de la section fermée.

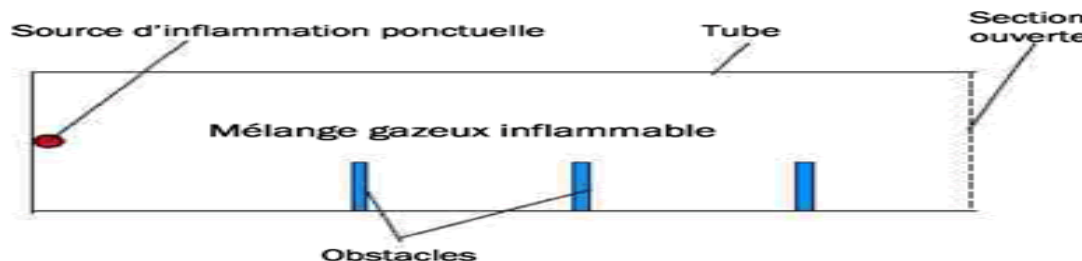


Fig. 1.4. Régimes de combustion UVCE (Image 1)

L'inflammation de la source se produit. On observe dès lors un front de flamme possédant une forme sphérique. On parle de combustion laminaire. Ce front de flamme est une interface réactive qui transforme les gaz frais (le mélange gazeux inflammable) en gaz brûlés.

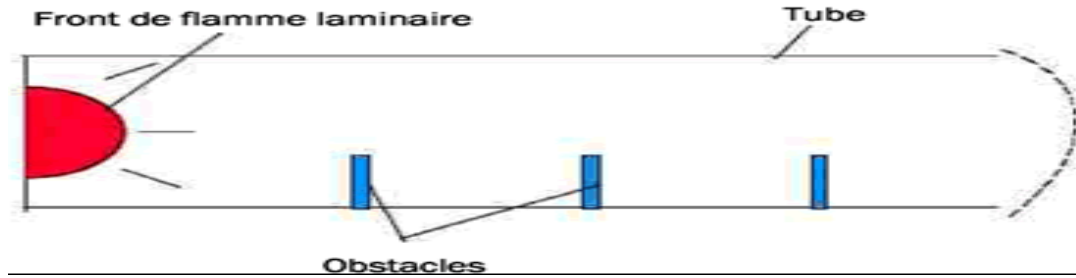


Fig. 1.4. Régimes de combustion UVCE (Image 2)

Le front de flamme prend ensuite une apparence dite cellulaire. En effet, le front de flamme laminaire vu précédemment, est très sensible aux perturbations (variation de la vitesse des gaz, interaction avec des ondes de pression, variation locale de la concentration du mélange) ce qui engendre cette nouvelle forme.

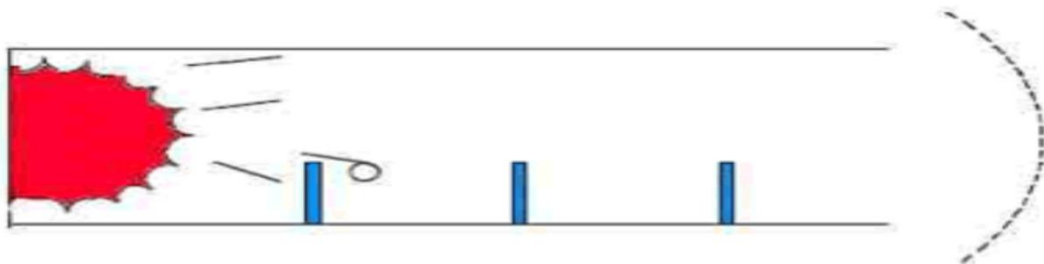


Fig. 1.4. Régimes de combustion UVCE (Image 3)

On atteint alors le régime de déflagration turbulente. Ce sont principalement les obstacles qui sont à l'origine de ce nouveau régime de combustion.

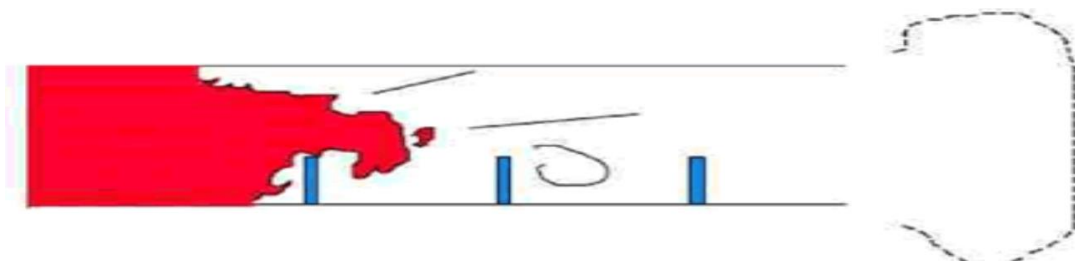


Fig. 1.4. Régimes de combustion UVCE (Image 4)

Remarque : gaz brûlés ont une densité moindre que le mélange gazeux initial, si bien qu'il s'ensuit une brusque expansion volumique. Capable de mettre en mouvement les gaz frais, situés en aval, devant les flammes. Ces dernières agissent comme un piston sur les gaz réactifs et provoquent leur écoulement (images n°3 et 4).

1.4.2.4 Descriptions des effets UVCE

Les effets générés par UVCE (effet thermique, effet de surpression) sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a lieu : conditions du mélange gazeux et conditions de l'environnement.

Tableau 1.4 : paramètre propre à l'environnement et au mélange gazeux

Paramètres propres au mélange gazeux	Paramètre propres à l'environnement
-Réactivité (vitesse fondamentale de combustion, taux d'expansion)	-Source d'inflammabilité (position par rapport au nuage, énergie)
-Concentration et homogénéité	-Encombrement (nombre, position, taille des obstacles)
-Turbulence propre du rejet	-Confinement partiel

a) Effets Thermiques

L'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie, ou être suivi d'une feu torche, dont les effets thermiques sont à redouter.

b) Effets De Surpression

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde de choc dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacles.

Le calcul d'un scénario d'explosion d'un nuage est réalisé en plusieurs temps :

- a) Détermination du terme source,
- b) Un calcul de dispersion du nuage inflammable,
- c) Un calcul d'explosion.

d) Les distances d'effets sont déduites du calcul de dispersion (effets thermiques) et du calcul d'explosion (effets de pression).

1.4.3 Jet Enflammé

Lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme par l'intermédiaire d'une source quelconque, le jet enflammé prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion. Le jet turbulent combustible émerge d'une canalisation ou d'un orifice et entre en interaction avec l'air ambiant qui est en général au repos. Le jet combustible se mélange à l'air par entraînement et par diffusion et, à l'aide d'une source d'inflammation, se met à brûler seulement aux endroits où les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie dans ses limites d'inflammabilité

1.5 Retour d'expérience sur les accidents impliquant des stockages de GPL

1.5.1 Texas City (Etats-Unis), 30/05/1978

Vers 2h du matin, dans une zone de stockage de GCL1 de l'unité d'alkylation d'une Raffinerie (3 sphères, 4 cylindres verticaux et 5 cylindres horizontaux), une sphère De 800 m³ d'isobutane est sur-remplie (de même qu'un des cylindres verticaux) à Partir d'un pipeline et se fissure le long d'une ligne de soudure.

Très rapidement la fuite s'enflamme et un feu chalumeau est allumé à la source. Moins d'une seconde après, la sphère bleve et une énorme (mais dimension non connue) boule de feu se forme : la sphère se rompt en 3 morceaux principaux connue) boule de feu se forme : la sphère se rompt en 3 morceaux principaux connue) boule de feu se forme : la sphère se rompt en 3 morceaux principaux 120 m dans une unité gaz, où elle endommage un échangeur à tubes, provoquant un incendie généralisé de l'unité.

Des cylindres verticaux et horizontaux blèvent tour à tour ; 20 secondes après la première, une seconde sphère de 800 m³ d'un mélange butane-butylène (butène) BLEVE et génère une boule de feu d'environ 335 x 200 m. Des fragments sont projetés à 190 m et une soupape à 500m. Les explosions se poursuivent jusqu'à 6h.

De nombreux autres effets missiles sont constatés : certains provoquent de gros dégâts voire des effets dominos dans les autres unités ou les matériels de protection (destruction d'une réserve d'eau et d'une pompe incendie par un fragment de la 2ème sphère).

Des effets thermiques importants sont rapportés (selon un témoin, effet moins intense pour la 2ème sphère que pour la 1ère). Des vitres situées face au sinistre sont brisées jusqu'à 3,5 km. L'incendie généralisé nécessite plus de 12 h d'intervention.

Au final, seul 1 réservoir vertical cylindrique n'a pas explosé ; il sera retrouvé renversé à quelques mètres. 7 employés sont tués et 10 autres blessés. Le coût global est estimé à 100 M\$ (1986).

Le sur-remplissage de la 1ère sphère serait dû à la défaillance d'un détecteur de niveau : une indication en salle de commande est relevée bloquée à 76 % alors qu'un accroissement brusque de la pression de 16,5 à 23,5 bar a été détecté à la station de pompage de la pipe. L'estimation de la pression dans la sphère pleine serait de près de 21 bar. Le mauvais fonctionnement d'une soupape serait également en cause. L'administration relève à l'époque 27 'violations' de la réglementation. [15]

Enseignements

Les défaillances identifiées lors de l'analyse de l'accident sont relatives à la défaillance des mesures de sécurité :

- *Moyens de mesure et de détection : défaillance du système de jauge, des soupapes et du suivi de la pression,*
- *Aménagement du site : stockage important de cylindres et bouteilles de GPL sur une faible surface, d'où des distances d'isolement insuffisantes entre réservoirs.*

1.5.2 Izmit (Turquie), 28/07/2002

Une explosion suivie d'un incendie se produit dans un centre emplisseur de gaz vers 8h un dimanche matin, lors du chargement d'une semi-remorque. Seuls le chauffeur et un garde sont présents sur le site. Le nuage résultant de la fuite aurait explosé suivi par un premier BLEVE quelques minutes plus tard (camion) puis 4 autres (capacité de 115 m³), par la suite. Un certain nombre de bouteilles, prises dans l'incendie, ont également explosé et été projetées à l'extérieur du hangar. Le sinistre s'étend très rapidement à 7 maisons voisines. Les autorités demandent à 5000 riverains d'évacuer leur logement, par précaution. Les pompiers, aidé d'avions militaires et d'hélicoptères, luttent pendant 3 h avant de maîtriser le sinistre. Le bilan provisoire de 2 blessés (le gardien légèrement brûlé, le chauffeur du camion-citerne grièvement blessé) semblerait s'être alourdi dans les jours suivants (un mort).

Le site est limitrophe de la plus grande raffinerie du pays, qui n'a pas été menacée. Selon l'exploitant, des vitres ont toutefois été brisées sur ce site. Plusieurs sites industriels proches ont été brièvement et légèrement touchés par les flammes, sans dommage important. Les

observations sur place mettent en évidence la présence de feux torches ainsi que d'importants panaches de fumée noire. Selon des témoins sur place, les effets se situeraient dans un périmètre de 100 m. Les causes de l'accident ne sont pas connues avec précision. Selon la Presse, l'accident aurait occasionné des dommages d'un montant de 2,5 millions de dollars. La zone industrielle où sont implantées la raffinerie, l'entreprise gazière ainsi que d'autres usines, est très proche de quartiers habités avec une forte densité de population. [15]

Enseignements

Les défaillances identifiées lors de l'analyse de l'accident sont relatives à l'aménagement du site et à l'absence de moyens de protection :

- *Aménagement du site : stockage important de cylindres et bouteilles de GPL sur une faible surface, d'où des distances d'isolement insuffisantes entre réservoirs*
- *Isolement : absence de vannes de fermeture automatiques côté site*
- *Moyens de lutte contre l'incendie : absence d'un réseau d'hydrants sur site et d'un système d'extinction du type rampe d'arrosage ou de refroidissement.*

1.5.3 11 décembre 2005, une importante explosion au dépôt de Buncefield en Angleterre

L'explosion a eu lieu le 11 décembre 2005 vers 6h30 sur le dépôt pétrolier de Buncefield. Le débordement par le toit d'un bac d'essence entraîne le déversement de 180 tonnes d'essence qui parvient à s'échapper de la cuvette de rétention. Ce déversement s'accompagne de la formation d'un aérosol et d'une nappe de liquide s'évaporant sur une grande surface. L'atmosphère est très stable avec une vitesse de vent inférieure à 1 m/s. La surface au sol du nuage inflammable a été estimée à 120 000 m², soit environ un rayon de 200 m autour du Point de fuite. La hauteur estimée du nuage est de l'ordre de quelques mètres. Les témoignages, des éléments visuels (vidéo surveillance) et l'examen de la chronologie

Des évènements suggèrent fortement que l'inflammation aurait eu lieu dans la pomperiez incendie adjacente au réservoir « fuyard » au moment du démarrage des pompes. L'environnement dans lequel se développe l'explosion est relativement dégagé avec un faible taux d'encombrement comprenant les bacs d'hydrocarbures, 2 rangées de taillis bordant une route, quelques bâtiments et un parking de quelques voitures. [16]



Fig. 1.5. Dépôt de Buncefield en Angleterre

1.6 Conclusion

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) qui est l'explosion d'un stockage de gaz et l'UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) qui est l'explosion d'un nuage de gaz sont quelques-uns des risques fréquemment associés aux dépôts de GPL. Lorsque des mesures efficaces ne sont pas prises en amont pour prévenir leur survenance, ils peuvent engendrer des catastrophes avec des dégâts immenses.

Et dans le cadre de cette mémoire de master académique, nous avons choisi le phénomène UVCE afin de quantifier les effets de surpression et par conséquent, nous avons présenté les différentes méthodes et modèles de calcul des effets de surpression dans le chapitre 2.

Chapitre 2 : modèles utilisée pour la modélisation des effets de surpression

2.1	Introduction	31
2.2	Type d'explosion.....	31
2.2.1	Méthodes de modélisation des explosions.....	32
2.3	Modélisation de l'effet de surpression	33
2.3.1	Modèle TNO-Multi-énergie	34
2.3.2	Modèle équivalent TNT	42
2.4	Comparaison de deux modèles.....	45
2.5	Conclusion.....	45

2.1 Introduction

Il est important d'estimer les dommages potentiels qui pourraient être causés par une telle explosion. Cependant, dans le cas d'une explosion de type UVCE issu d'un équipement de sous pression, la propagation d'une onde de surpression peut devenir prépondérante en termes de conséquences. Et dans le cadre de notre mémoire de master académique, nous essayerons par le présent chapitre d'illustrer les différents modèles traitant l'effet de surpression associé à ce phénomène comme un exemple d'application. Sachant qu'il ya d'autre phénomène peut se produire dans ce type de équipements de stockage (sous pression) des substances inflammable.

2.2 Type d'explosion

Une explosion est une évolution rapide d'un système, avec libération brutale d'énergie et production d'effets mécaniques (surpression) et éventuellement thermiques. Une explosion peut être de plusieurs natures (voir Fig. 2.1). [17].

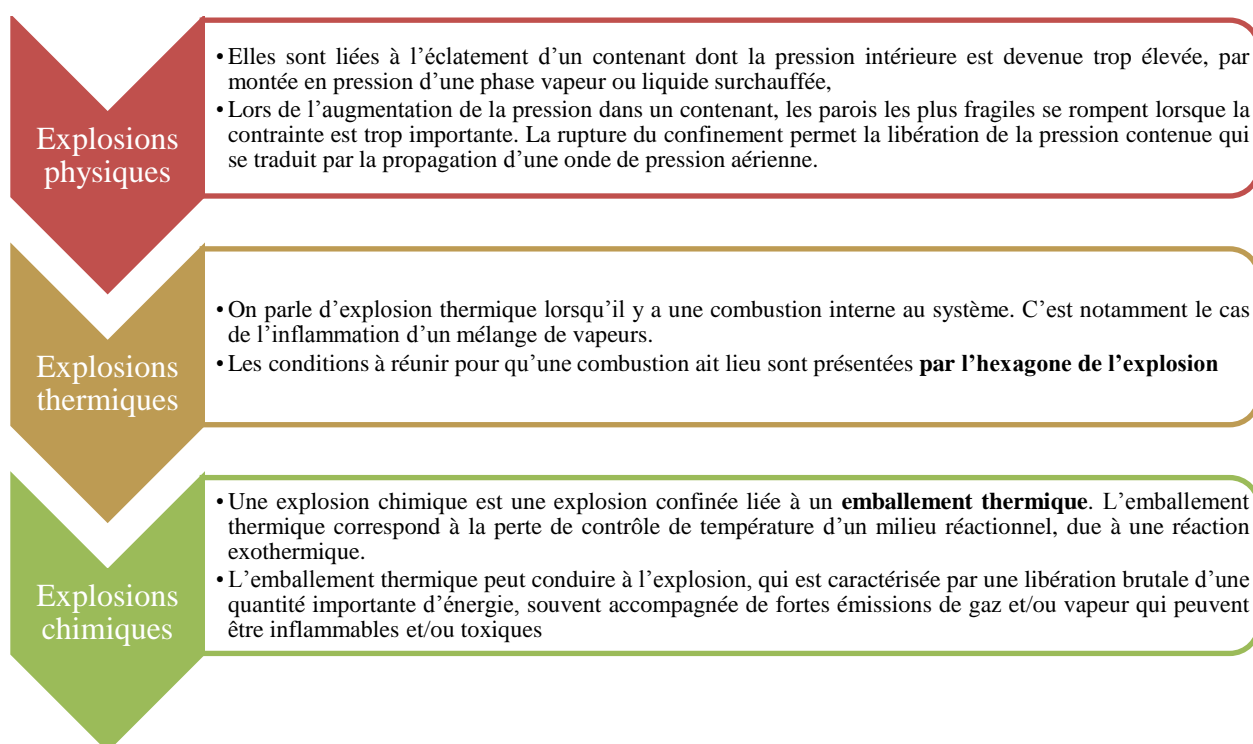


Fig. 2.1. Typologie des explosions [17]

On s'attachera à donner, pour chaque type d'explosion, les méthodes de calcul des distances de surpression. Les différentes méthodes se basent sur le même principe :

- 1- Calcul de l'énergie de l'explosion ;
- 2- Calcul des distances réduites associées aux seuils de surpressions ;

3- Calcul des rayons des cercles de dommages.

2.2.1 Méthodes de modélisation des explosions

Selon le type d'explosion soit UVCE ou explosion confinée :[17]

– **UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)**

L'UVCE¹ est une explosion de gaz à l'air libre. Le phénomène d'explosion suppose la présence d'un mélange inflammable (dans les limites d'explosivité) et d'une source d'ignition à proximité du point de fuite ou du nuage.

– **Explosion confinée**

L'explosion confinée est un éclatement pneumatique d'une capacité ou d'une enceinte suite à une montée en pression interne. Le relâchement brutal lié à la rupture de l'enceinte ou du contenant engendre une onde de pression aérienne et peut générer des effets de projection (missiles). L'énergie disponible pour l'explosion dépend du type de rupture.

Le schéma ci-dessous (Fig 2.2) aide à la prise de décision concernant la modélisation la plus adaptée à chaque cas :

¹ Le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés. En l'absence d'effets de pression le terme Flash-fire est utilisé.

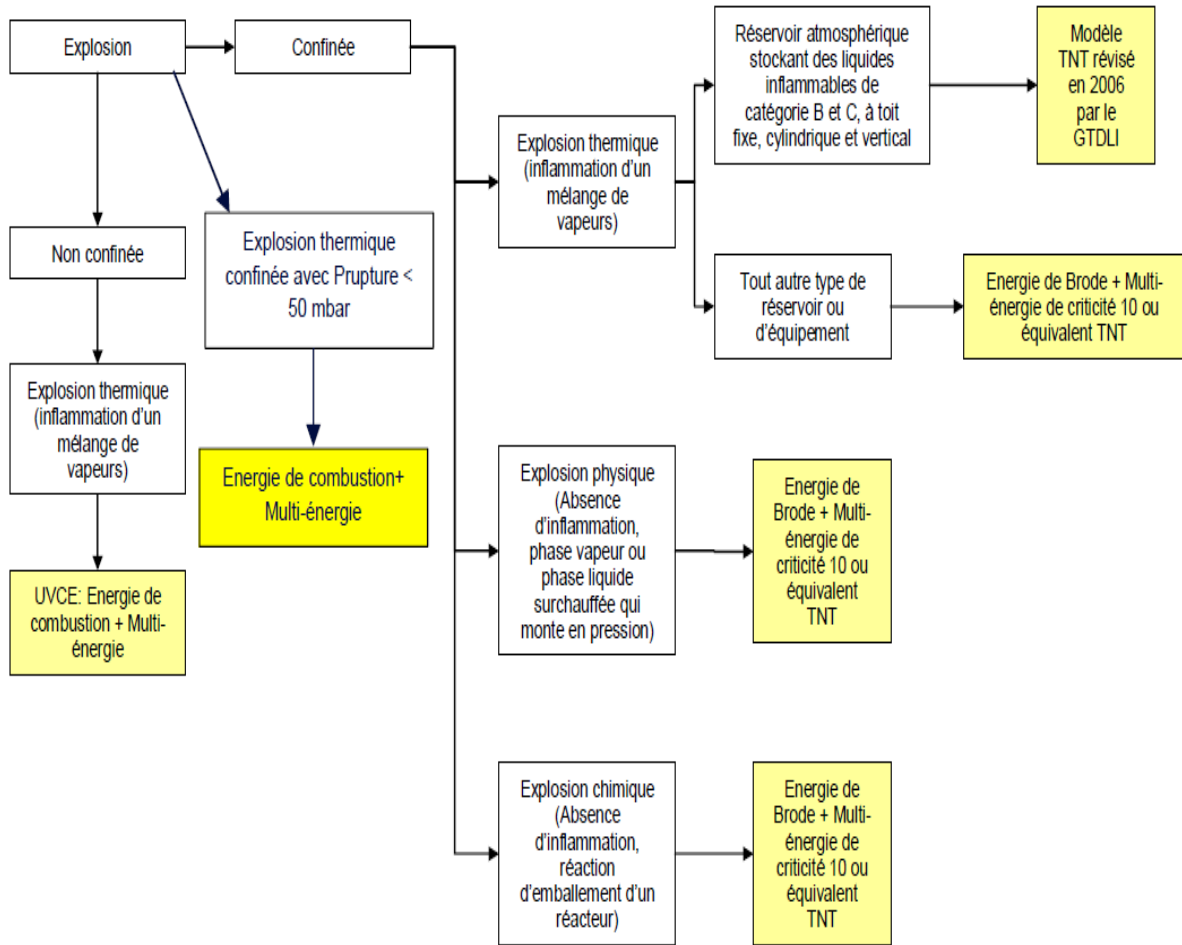


Fig.2.2. Modélisation des explosions confinée et des explosions non confinée

2.3 Modélisation de l'effet de surpression

Il existe plusieurs méthodes de calcul des effets de pression d'un UVCE, pour la plupart fondées sur le concept Multi-energy. Parmi les plus couramment utilisées on trouve : [18-22]

- la méthode Multi-energy (TNO)
- l'équivalent TNT, pour des explosions confinées ;
- la méthode CAM (Congestion Assessment Method, Shell)
- la méthode de Baker-Strehlow.

Dans le cadre de notre mémoire, nous présentons les deux premières méthodes car, ils ont le plus utilisé dans la majorité des références bibliographiques et pour les industriels dans le cadre des études de danger.

2.3.1 Modèle TNO-Multi-énergie

La méthode Multi-énergie a été développée au sein de groupe néerlandais TNO (The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research, 1976) en particulier par Van Den Berg en 1984 [23-24].

Le principe de ce modèle, est d'accumuler la masse participante à l'explosion, évaporée dans un environnement plus ou moins encombré. Elle consiste à évaluer les caractéristiques de l'onde de surpression générée par un UVCE.

En effet, le concept principal est basé sur hypothèse selon laquelle la vitesse de propagation de la flamme, et en conséquence le niveau de surpression atteint, dépend essentiellement de l'encombrement et du confinement dans la zone couverte par le mélange inflammable.

La méthode conduit, en quatre étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du Niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable. [19]

La méthode multi-énergie s'articule autour de 3 étapes distinctes :

- 1) Déterminer l'énergie d'explosion
- 2) Déterminer la pression maximale susceptible d'être observée dans le champ proche de l'explosion, c'est-à-dire dans l'espace de propagation des flammes ou à proximité de cet espace,
- 3) Déterminer ensuite l'atténuation de cette surpression maximale dans le champ plus lointain qui n'est concerné que par la propagation des ondes de pression.

2.3.1.1 Calcul de l'énergie d'explosion

Deux méthodes principales permettent de calculer l'énergie de l'explosion :

- a) L'énergie de Brode ;
- b) L'énergie de combustion

Mais dans le cadre de notre étude, c'est que la modélisation de phénomène UVCE, nous procédons à la méthode de calcul de l'énergie de combustion par ce que c'est la méthode utilisée dans ce cas-là.

- Énergie de combustion

L'énergie de combustion est l'énergie dégagée par la réaction de combustion d'un gaz par L'oxygène de l'air. Le calcul de cette énergie est uniquement valable dans le cas d'une explosion non confinée de type UVCE dont les étapes sont les suivantes :

- 1) *rejet dans l'atmosphère d'un gaz ou d'un liquide inflammable volatil, avec ou sans émission d'aérosols,*

- 2) évaporation de la nappe de liquide formée, dans le cadre d'un rejet de liquide,
- 3) formation d'un nuage inflammable entre l'air et le gaz,
- 4) dispersion du nuage air-gaz compris entre la LIE et la LSE qui s'enflamme en présence d'une source d'ignition,
- 5) propagation du front de flamme dans le nuage inflammable provoquant une onde de pression aérienne.

L'énergie de combustion est donnée par la formule suivante :

$$E = \Delta H * m_{\text{explosible}}$$

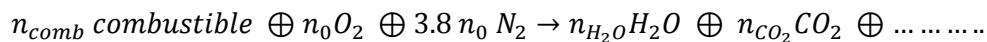
$$E = \Delta H * (\rho_{\text{vol}} * C_{\text{stoecho}} * V_{\text{explosible}})$$

Avec :

- E :: énergie de combustion en kJ
- ΔH : chaleur de combustion en kJ/kg
- $m_{\text{explosible}}$: masse de produit mise en jeu dans l'explosion en kg
- $V_{\text{explosible}}$: volume du nuage explosible en m³
- ρ_{vol} : masse volumique du gaz ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
- C_{stoecho} : concentration stœchiométrique (en %)

Où l'on a:

$$C_{\text{stoecho}} = \frac{n_{\text{Comb}}}{n_{\text{Comb}} + 4.8n_0}$$



- **Détermination du volume inflammable dans la zone concernée**

Trois données sont nécessaires pour cet ensemble: tableau 2.1

- Le taux de recouvrement par le nuage de la zone étudiée;
- Le volume de la zone encombrée étudiée ;
- Le volume à déduire de cette zone encombrée.

Tableau 2.1: Donnée nécessaire pour déterminer le volume inflammable dans la zone concernée

Réf		Valeur	Unité
1	Le nuage recouvre	La zone encombrée total	
2	Volume de la zone encombré (Vze) (lx/xh)		m ³

3	Volume à déduire de Vze (bâtiments, structures...)		m ³
4	Volume maximal pouvant être occupé par le nuage		m ³
5	Fraction du nuage inflammable recouvrant		%
6	Volume inflammable de la zone encombrée		m ³
7	Volume inflammable de la zone en champ libre		m ³

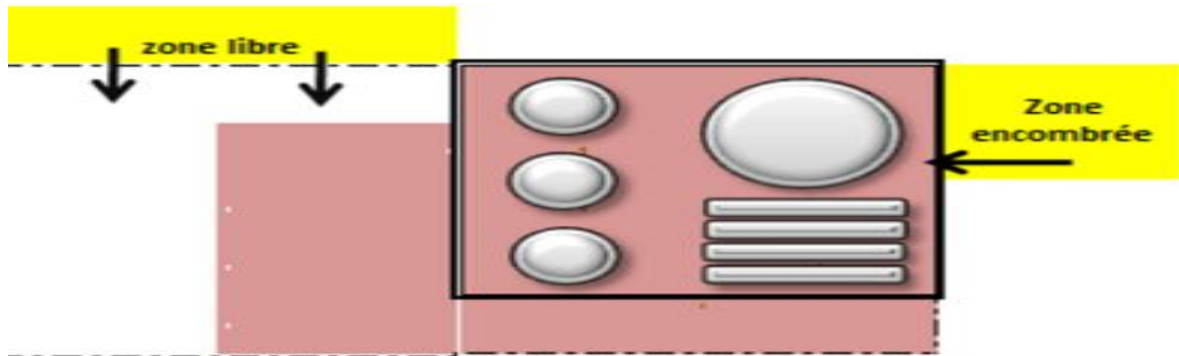


Fig. 2.3. : Représentation d'une zone encombrée et zone libre

Dans le cadre de notre exemple, nous avons considéré que :

1. Le nuage Recouvre Totalement la zone encombrée
2. Calculer : $Vze - Venc$

Avec :

- (Vze) : Volume de la Ze
 - (Venc) : Volume à déduire de la Ze
3. Volume inflammable de la zone encombrée (Vinfze) :

Si $Vmax\ ze > Vinf$:

- Vrai => $Vinfze = Vinf$
- Faux => $Vinfze = Vmaxze$

4. Volume inflammable de la zone en champ libre :

= $Vinfze - Vinf$

Et dans le cas générale, nous avons 4 hypothèses sont proposées à l'utilisateur pour définir le taux de recouvrement par le nuage de la zone étudiée:

Tableau 2.2: Hypothèses sont proposées à l'utilisateur pour définir le taux de recouvrement par le nuage de la zone étudiée.

le nuage	Volume de la Ze (Vze)	Volume à déduire de la ze (Venc)	Volume maximal pouvant être occupé par le nuage (Vmaxze)	Pourcentage de recouvrement de la Ze par le nuage (%)	Volume inflammable de la zone encombrée (Vinfze)	Volume inflammable de la zone en champ libre
Recouvre Totalement la zone encombrée	Définis par l'utilisateur (selon la zone étudiée)		Vze - Venc	100%	Si Vmaxze > Vinf Vrai => Vinfze = Vinf Faux => Vinfze = Vmaxze	= Vinfze - Vinf
Recouvre Partiellement la zone encombrée			Vze - Venc	Défini par l'utilisateur	Si Vmaxze x % > Vinf Vrai => Vinfze = Vinf Faux => Vinfze = Vmaxze x %	= Vinfze - Vinf
est à l'intérieur de la zone encombrée			Vze - Venc	100% du Vinf	Vinfze = Vinf	Sans objet
Est en zone libre d'obstacles			Sans objet	Sans objet	Sans objet	= Vinf

2.3.1.2 Calcul du rayon caractéristique

$$R_c = \left(\frac{E}{P_o}\right)^{1/3}$$

Avec :

- E en Joules
- P₀ pression atmosphérique en Pascal (101 325 Pa)

2.3.1.3 Choix du degré de sévérité

Dans le cas d'une explosion confinée, le degré de sévérité est fixé à 10. Mais dans le cas d'une explosion non confinée, le choix du degré de sévérité peut se faire suivant la méthode de KINSELLA ou TNO.

Ce modèle est basé sur le principe selon lequel les zones encombrées risquent de générer des effets importants sur la surpression. La violence de l'explosion est caractérisée par un degré de gravité/indice de 1 à 10, chaque degré faisant référence à un niveau maximum de surpression atteint dans le nuage inflammable (voir le tableau xx) [25.26].

Le **Tableau 2.3** ci-dessous présente la correspondance entre les surpressions maximales et les indices de sévérité (compris entre 1 et 10).

Tableau 2.3 : Correspondance entre les surpressions maximales et les indices de sévérité [18]

Indice de sévérité	Surpression max correspondante (mbar)
--------------------	---------------------------------------

1	10
2	20
3	50
4	10
5	200
6	500
7	1000
8	2000
9	5000
10	10000

L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé.

Il est essentiel de signalé que le choix de l'indice de sévérité est l'étape la plus délicate de la méthode « Multi-Energie ». En effet, il n'existe pas aujourd'hui des méthodes consensuelles. Et les méthodes les plus couramment utilisées sont celles de KINSELLA (1993) et du TNO (1997).

- Méthode de KINSELLA

Dans le cadre de notre étude, 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 comme déjà signalé à l'aide la méthode de KINSELLA présenté par le tableau 2.4. [25].

Tableau 2.4: Grille de KINSELLA

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

- **Méthode TNO (TNO, 1997b)**

a) *Approche simplifiée selon le guide de l'INERIS²:*

- ✓ 10 : zone **correspondant à des zones encombrées d'obstacles**.
- ✓ 3-4 : pour les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est **caractérisé par une agitation turbulente** (nuage formé consécutivement à un rejet de gaz combustible initialement sous plusieurs bar de pression par exemple).
- ✓ 1 : pour **les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées** et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est **considéré au repos thermodynamique** (nuage formé suite à l'évaporation d'un liquide combustible de type GPL),).

b) *Approche complète selon le guide de l'UFIP.*

Cette approche est basée sur l'arbre de décision présenté ci-après

² INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre - Rapport de juillet 1999

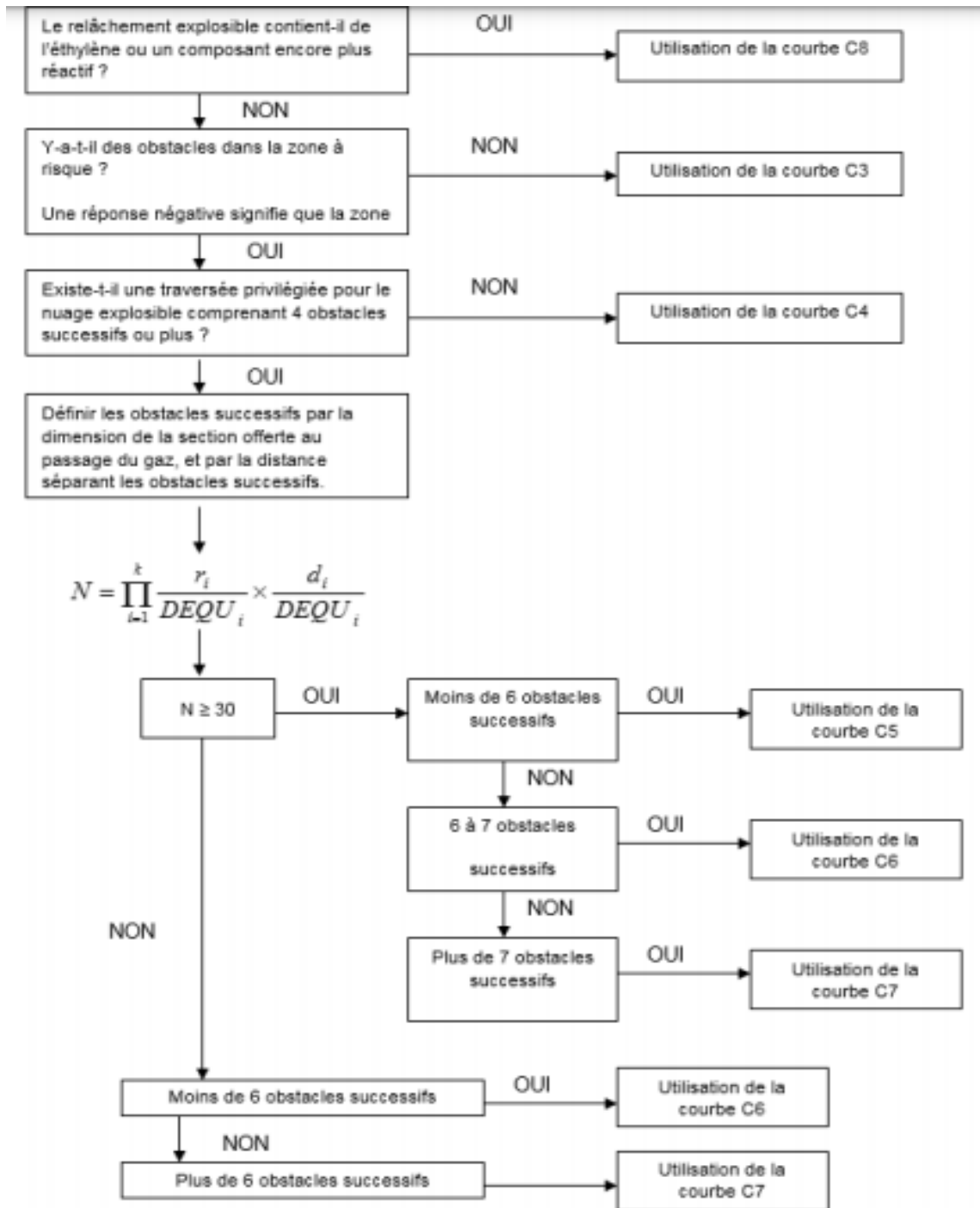


Fig. 2.4: Approche complète selon le guide de l'UFIP [27]

2.3.1.4 Détermination de la distance réduite

D'après TNO, la distance réduite \bar{R} est déterminée à partir des courbes Multi-énergie présentées à la **Fig. 2.5**.

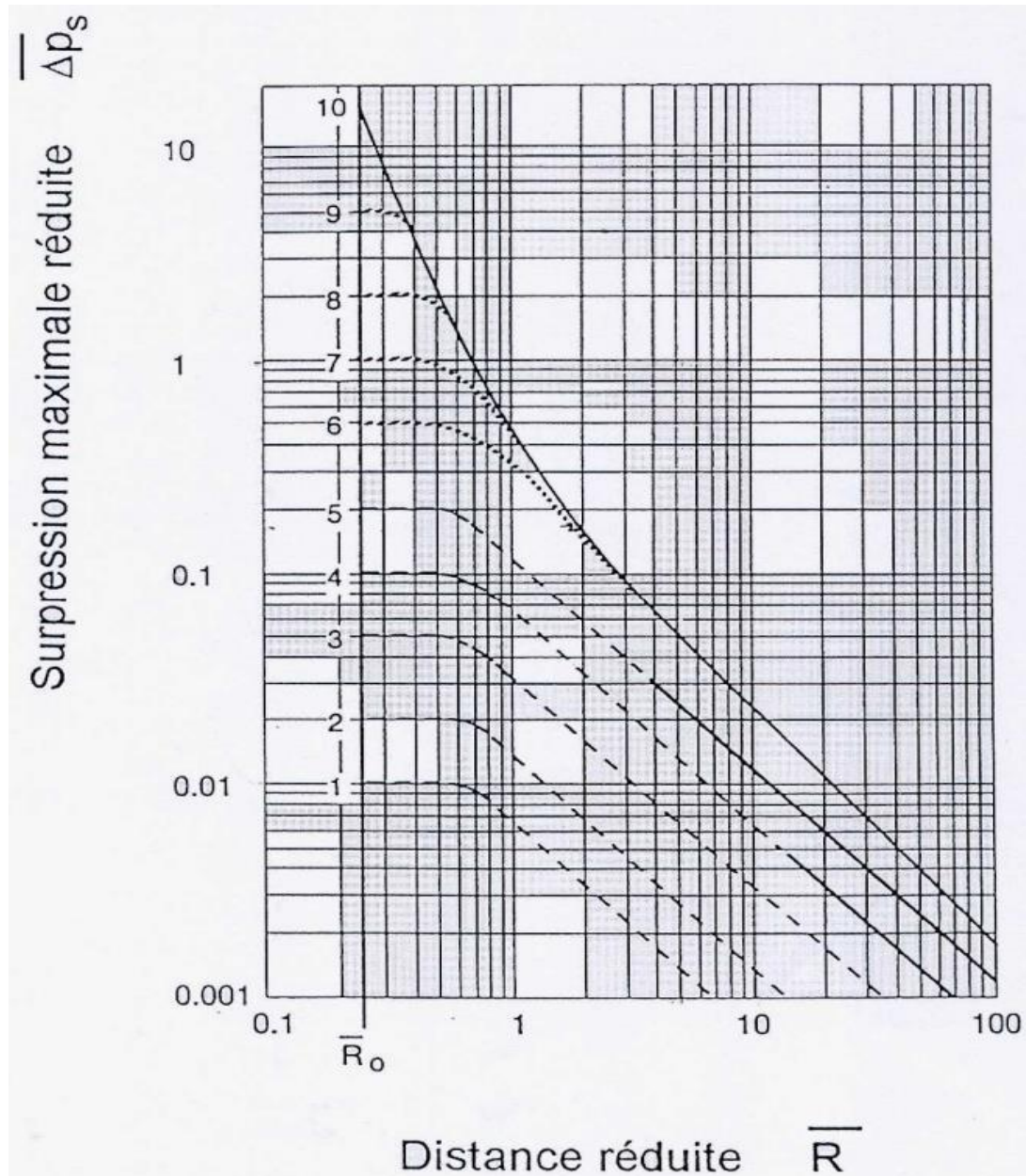


Fig. 2.5 : Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite [22]

2.3.1.5 Détermination du rayon du cercle de dommage

La distance d'effet de surpression est calculée par l'équation suivante :

$$X = \bar{R} * R_c$$

X étant la distance en m entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en mètre.

2.3.2 Modèle équivalent TNT

Ces méthodes sont incontestablement les premières utilisées de par le monde pour prévoir les conséquences de tout type d'explosion accidentelle. Elles reposent sur l'hypothèse selon laquelle, il doit être possible de reproduire le champ de surpression qui est engendré par une explosion donnée (de gaz, d'un explosif condensé, ...) en faisant exploser du TNT³. Ainsi, l'équivalent TNT d'un mélange gazeux explosible correspond à la masse de TNT qui en explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un kg du mélange explosible considéré.

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 [28].

2.3.2.1 Calcul de la masse d'équivalent TNT

$$M_{TNT} = \alpha * \frac{E_{gaz}}{E_{TNT}}$$

Avec:

- E_{gaz} : représente l'énergie que le combustible considéré peut libérer après combustion,
- E_{TNT} : l'énergie spécifique de combustion du TNT ($E_{TNT} = 4690$ kJ/kg)
- α : Représente le « rendement » de l'explosion de gaz.

Le rendement α différentes significations selon ce que représente exactement l'énergie E_{gaz} .

En effet, E_{gaz} peut représenter l'énergie de combustion de:

- La totalité de la masse de combustible rejetée accidentellement (sachant qu'une partie seulement de cette masse sera dans les limites d'explosibilité) :

Le rendement α est à considérer comme « global » afin de qualifier à la fois le rendement ou l'efficacité:

- ✓ *du rejet et de sa dispersion pour former un mélange explosible,*
- ✓ *et de la propagation des flammes (explosion proprement dite) pour engendrer des ondes de surpression d'amplitude plus ou moins importante*
- ou de la masse de combustible mélangée avec l'air en proportions explosibles :

α Représente un rendement qui qualifie la capacité des flammes à engendrer des surpressions. Il ne s'agit donc, dans ce cas, que d'un rendement « d'explosion ».

³ Source : INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre
- Rapport de juillet 1999

Quel que soit le type de cas considéré, α est généralement déterminé à partir de l'analyse des accidents passés. De plus, dans certains cas [28], des valeurs différentes du rendement α sont distinguées selon la réactivité du gaz combustible considéré.

Lannoy par exemple (Lannoy, 1984) a utilisé une démarche statistique basée sur l'analyse de 23 accidents représentatifs pour lesquels les données sont suffisantes pour entreprendre des calculs de rendement. Il est ressorti de son analyse statistique que :

- le rendement moyen d'une explosion accidentelle est de 4 % et la probabilité pour que le rendement α soit effectivement inférieur ou égal à 4 % est de 0,6,
- si le rendement considéré est de 10 % alors la probabilité pour que α soit effectivement inférieur ou égal à 10 % est de 0,97.

Compte tenu de cette dernière probabilité (qui représente aussi un niveau de confiance), Lannoy a proposé de retenir $\alpha = 10\%$ dans le cadre des études de sécurité. Par ailleurs, le rapport $\frac{E_{\text{gaz}}}{E_{\text{TNT}}}$, considéré pour 1 kg de gaz, est pratiquement toujours voisin de 10 si le gaz considéré est un hydrocarbure. Dès lors, vu l'équation de calcul de masse TNT :

Retenir $\alpha = 10\%$ revient à choisir un équivalent TNT de 1 kg de TNT pour 1 kg
d'hydrocarbure rejeté.

2.3.2.2 Détermination de la distance réduite

La distance réduite R est déterminée à partir de l'abaque TM5-1300 présenté à la **Fig.**

2.6.

2.3.2.3 Détermination du rayon du cercle de dommage

Le rayon du cercle de dommage est calculé par la formule suivant :

$$X = R * (M_{\text{TNT}})^{1/3}$$

Où : X étant la distance en m entre le centre du contenant qui s'explode et le seuil de surpression défini en mètre.

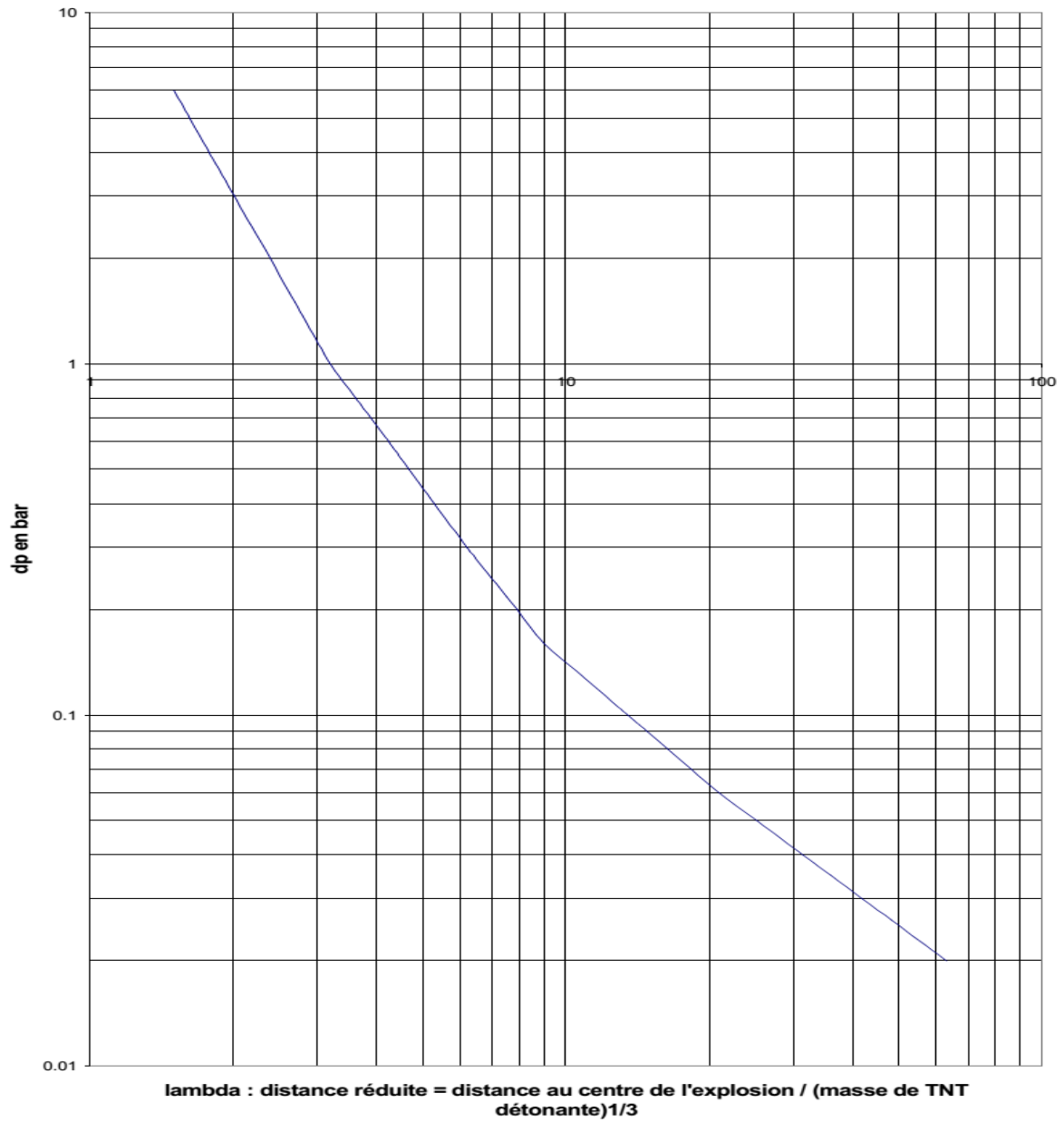


Fig. 2.6 : Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite [27]

Les limites du modèle de l'équivalent TNT sont nombreuses. Parmi elles, une des plus importantes est que le régime de combustion d'une explosion de gaz à l'air libre est très exceptionnellement une détonation. En conséquence, les ondes de pression issues d'un UVCE ont un profil qui est totalement différent de celui observé lors d'une détonation de TNT. Cette différence est particulièrement importante dans le champ proche d'une explosion de gaz à l'air libre [29].

2.4 Comparaison de deux modèles

Premièrement, même si une des conclusions concerne le caractère complémentaire des modèles utilisés pour l'analyse des accidents, nous constatons que seule la méthode multi-énergie prend en compte l'environnement et met en évidence que les zones à fort encombrement donnent des explosions violentes, par contre, les zones libres ne font que brûler sans effet de pression significatif.

Ensuite, concernant les modèles, l'analyse montre que les déterminations de l'équivalent TNT ne permettent qu'une estimation grossière de la charge explosive. Cette information n'est pas assez pertinente pour expliquer les caractéristiques principales de l'explosion de gaz à l'air libre, et pour identifier des mesures préventives. La méthode multi-énergie quant à elle permet de comparer l'énergie mise en jeu dans la charge explosive et l'énergie potentielle contenue dans les volumes encombrés ou confinés.

Dans le cas de notre étude, nous choisissons la méthode multi-énergie qui a l'avantage de mieux représenter les caractéristiques du phénomène physique impliqué.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous tentons de présenter les deux modèles principaux (**Modèle TNO Multi-énergie, Modèle équivalent TNT**) pour analyser les effets de la surpression associés à des explosions confinées et des explosions non confiné. Et dans le cadre de notre mémoire de master académique et pour valider le (s) modèle(s) décrit, nous présenterons dans le prochain chapitre une application d'un système industriel au niveau de la zone industrielle.

Chapitre 3 : étude de cas

3.1	Présentation de l'entreprise	47
3.1.1	Description du centre (CSTF)	47
3.1.2	Localisation du site de centre et installations voisines	47
3.1.3	Principales installations de stockage	48
3.1.4	Description du fonctionnement du site de stockage et de transfert du GPL.....	48
3.1.4.1	Section de stockage et de transfert du GPL.....	50
3.1.4.2	Section de compression du GPL	50
3.1.4.3	Section de torche	51
3.1.4.4	Section de vide-vite.....	51
3.1.4.5	Utilités	51
3.2	Présentation de système étudiée : description de zone de stockages GPL + choix d'une sphère à étudiée).....	52
3.2.1	Caractéristiques techniques de la sphère 50-T016	52
3.2.2	Equipements de la sphère de stockage <i>GPL 50-T016</i>	52
3.3	Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios UVCE	54
3.3.1	Identification de scénario d'accident.....	54
3.3.2	Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios d'accidents choisie (UVCE) 55	
3.3.2.1	Collecte des données d'entrée	55
3.3.3	Seuils de référence pour les effets de surpression	55
3.3.4	Résultats et discussions de simulation à l'aide de modèle TNO-Multi-énergie.....	55
3.3.4.1	Calcul de volume explosible	56
3.3.4.2	Calcul de l'énergie de combustion	57
3.3.4.3	Calcul du rayon caractéristique	58
	Le rayon caractéristique est calculé par la formule suivant :	58
3.3.4.4	Détermination du rayon du cercle de dommage.....	58
3.3.4.5	Calcul de la distance d'effet de surpression	59
3.4	Conclusion.....	61

Chapitre 3 : étude de cas

3.1 Présentation de l'entreprise

3.1.1 Description du centre (CSTF)

Le condensât et le GPL produits par tous les modules sont acheminés vers le centre de stockage et de transfert des fluides, où ils sont débarrassés d'éventuelles quantités d'eau résiduelles et comptabilisées avant d'être expédiés vers SP4 puis vers Arzew.

Le CSTF comprend trois bacs de 35 000 m³ et quatre bacs de 45 000 m³ chacun pour le stockage du condensât, douze sphères de 7 000 m³ chacune pour le stockage du GPL. Les vapeurs formées dans les sphères sous l'effet de la température ambiante sont comprimées par des turbocompresseurs, condensées puis remises dans le stockage pour éviter le boil-off et le torchage du GPL.

3.1.2 Localisation du site de centre et installations voisines

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'mel est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide. Les installations mises en œuvre sont représentées sur la Fig 3.1.

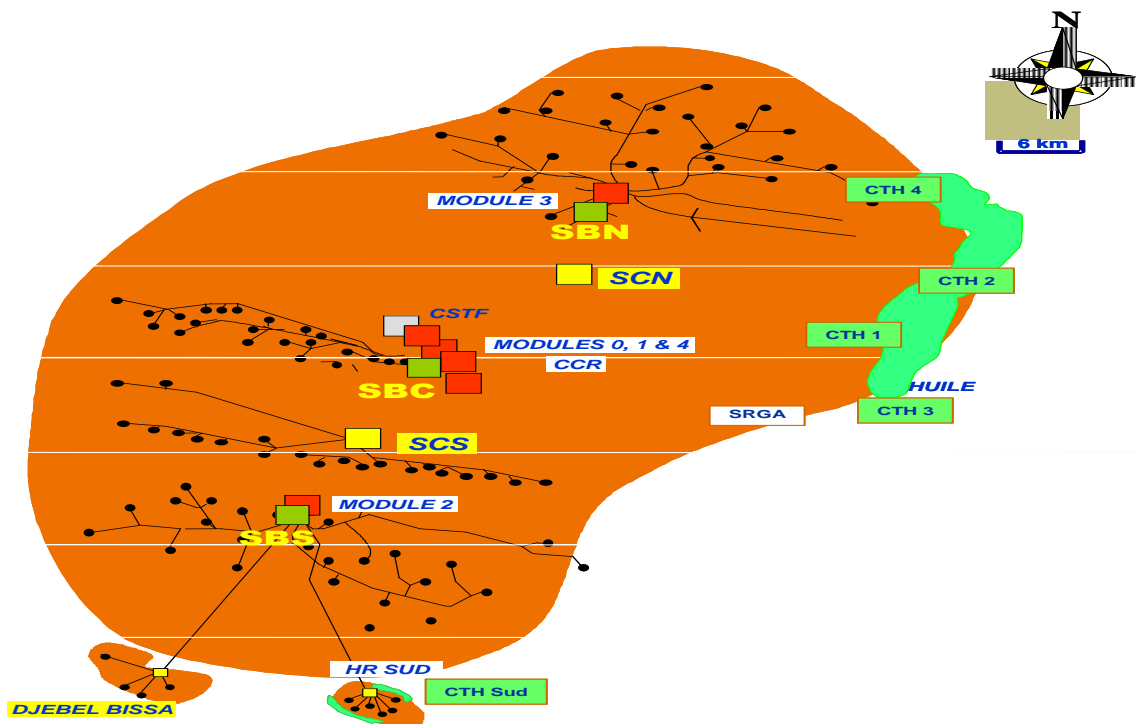


Fig. 3.1. Installation voisines de centre

3.1.3 Principales installations de stockage

Le Centre de Stockage et de Transfert Facilité dispose 12 Sphères de stockage de GPL et 07 Bac de stockage du Condensât désignées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1: Principales installations de stockage

Identification du réservoir de stockage	Désignation	Capacité en m ³
Sphère de stockage GPL	50-T001...T005 & T006	7000
Sphère de stockage GPL	60-T001...T006	7000
Bac de stockage Condensât	50-T006...T009	45000
Bac de stockage Condensât	S-101A ,101B, 101C	35000

Le centre est composé en trois sections :

- Section de stockage et de transfert du GPL
- Section de compression du GPL
- Section de stockage et de transfert du condensat

3.1.4 Description du fonctionnement du site de stockage et de transfert du GPL

Le site de stockage et de transfert de GPL est composé des installations suivantes :

- 12 sphères d'une capacité nominal de 6500 m³ chacune avec une capacité totale de stockage de l'ordre de 78000 m³
- 6 pompes boosters *P001 A/B/C/D/E/F* : débit 165 m³/h à $P = 15$ à 18 bar chacune dont 3 pompes ont une deuxième fonction de transfert de GPL entre les sphères.
- 3 pompes *P002 A/B/C* : débit 350 m³/h à $P = 25$ à 34 bar chacune, d'expédition GPL vers la ligne 24'' avec un débit de 350 m³/h chacune.

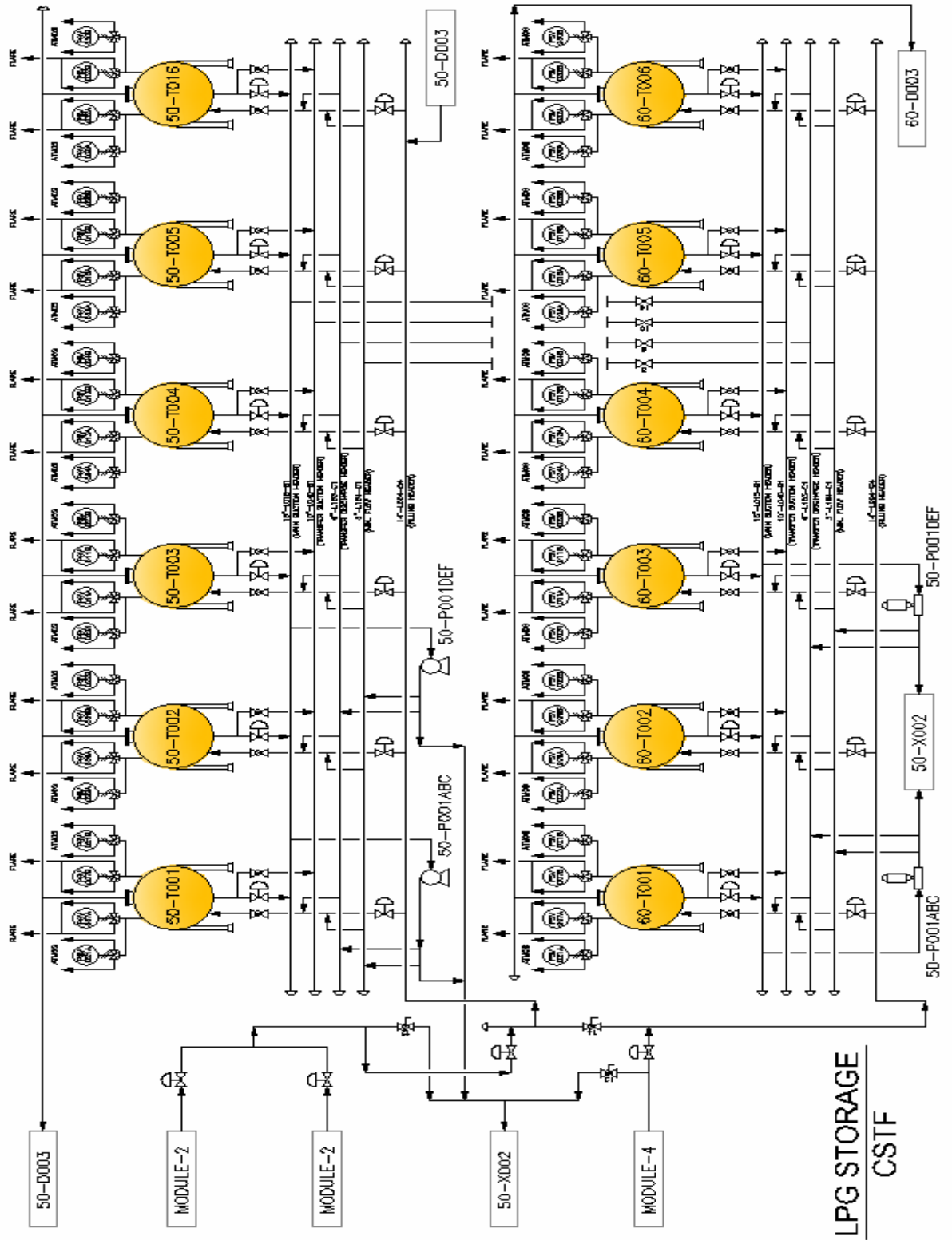


Fig 3.2. Plan synoptique

3.1.4.1 Section de stockage et de transfert du GPL

a) Fonctionnement normal

Lors du fonctionnement normal, le GPL sortant des modules circule vers le pipeline à travers l'unité de comptage du GPL en évitant les sphères de stockage après avoir été pompé à l'aide de la pompe de pipeline à GPL.

Lorsque la pression d'aspiration de la pompe s'élève suffisamment, une partie de GPL se dirige vers les sphères de stockage.

Les vannes de remplissage des sphères de stockage du GPL sont toujours laissées ouvertes.

b) Remplissage et vidange

Si le GPL en provenance des modules ne peut être transféré du fait d'une interruption du pipeline, d'une anomalie de la pompe ou d'une diminution de la demande de SONATRACH TRC, il se dirige vers les sphères de stockage.

Après la remise en état du pipeline ou de la pompe, le GPL contenu dans les sphères de stockage circule vers la conduite d'aspiration de la pompe sous l'action d'un régulateur de débit, après avoir été pressurisé par la pompe surcompression à GPL.

En règle générale, on ne doit pas pomper du GPL de deux sphères de stockage simultanément au cours d'une opération de vidange. De plus, il est interdit d'effectuer simultanément le remplissage et la vidange de la même sphère.

c) transfert du GPL entre les sphères de stockage :

Lorsqu'on veut effectuer des travaux sur une sphère de stockage contenant du GPL, on fait le transfert du GPL à une autre sphère au moyen des trois pompes. Ce transfert peut être effectué parallèlement à d'autres opérations.

3.1.4.2 Section de compression du GPL

Cette section a pour fonction de maintenir la pression et la température des sphères de GPL dans une gamme déterminée, par compression, condensation, dilatation et circulation des gaz qui se dégagent par ébullition à l'intérieur des sphères de GPL sous l'effet de :

- La convection et la radiation de la chaleur atmosphérique
- L'échauffement dû à la perte par friction des canalisations
- La différence de température entre les liquides stockés et ceux à introduire

Les gaz chassés par ébullition des sphères GPL sont comprimés dans les compresseurs (groupes turbocompresseur) et condensés dans un condenseur de vapeur GPL, d'où ils se dirigent vers un accumulateur. Le liquide contenu dans cet accumulateur est renvoyé enfin

vers les sphères. Toutefois, l'opération de remplissage nécessite au moins deux compresseurs. Lorsqu'il est impossible de faire fonctionner les compresseurs à GPL pour une raison quelconque, les gaz dégagés par ébullition dans les sphères GPL sont envoyés vers la torche.

3.1.4.3 Section de torche

Le centre est doté d'un système de torche HP qui permet de brûler les gaz résiduaux dégagés en cas d'anomalie.

Le système de torche se compose de collecteurs de torche, d'un dispositif de récupération des brouillards (ballon-tampon, ballon draineur et purgeurs à pompage) et d'une torche proprement dite.

Les gaz résiduaux ne circulent pas dans le système de torche au cours de l'exploitation normale de l'usine. Donc, du gaz combustible est injecté en amont du collecteur de torche.

3.1.4.4 Section de vide-vite

L'hydrocarbure liquide déchargé à partir de chaque section se dirige vers la fosse de brûlage pour combustion. Cette fosse de brûlage, réservée aux besoins du MPP I, est située dans la zone du centre.

L'hydrocarbure déchargé est d'abord recueilli dans un ballon tampon, qui permet de le séparer en phases gazeuse et liquide. Après avoir été pressurisé par la pompe de vidange, l'hydrocarbure liquide se dirige finalement vers la fosse de brûlage.

3.1.4.5 Utilités

- *Eau* : Eau de service, Eau anti incendie, Eau de refroidissement et Eau potable.
- *Air* : air de service et air instrument

Les deux types d'air sont assurés par un compresseur d'air d'un débit de 855 Nm³/h et une pression de 7 bars.

- *Gaz inerte*
- *Système de drainage eau*
- *Système de gaz combustible*
- *Séparateur d'huile*
- *Energie électrique*

3.2 Présentation de système étudiée : description de zone de stockages GPL + choix d'une sphère à étudiée)

3.2.1 Caractéristiques techniques de la sphère 50-T016

Tableau 3.2 : Caractéristiques techniques de la sphère 50-T016

Caractéristiques	Valeur
Type d'installation	Sphère de stockage
Substance	GPL
T service (°C)	20
T calcul (°C)	De -17 à 93.3
P service (barg)	5.34
P épreuve (barg)	9.6
Volume (m ³)	7170
Densité (kg/m ³)	563

3.2.2 Equipements de la sphère de stockage GPL 50-T016

- Ligne de remplissage 14’’
- Ligne de vidange 12’’ : calorifugée
- Ligne de purge d'eau : calorifugée et équipée de deux résistances (traçage électrique) m=pour éviter le givrage de la conduite
- Ligne de prise d'échantillon
- Ligne de récupération des vapeurs GPL : BOIL OFF
- 2 Soupapes PSV vers atmosphère
- 2 Soupapes PSV vers torche
- 2 Trou d'homme : un trou en bas et l'autre en haut équipés d'une conduite de vidange
- 2 Indicateurs de pression PG (haut et bas)
- 2 Indicateurs de température TG (haut et bas)
- 2 jauges avec indicateur local
- LIA H : alarme haut niveau
- LZH : alarme très haut niveau
- LIA L : alarme bas niveau
- LZL : alarme très bas niveau
- 2 Eclairages ATEX haut et bas

- Une mise à la terre
- Une passerelle pour accès au sommet de la sphère

Chaque sphère GPL est raccordée aux canalisations de Remplissage, Vidange et de BOIL OFF.

- **La ligne remplissage** : est raccordée au collecteur de remplissage, collecteur de refoulement de transfert et au collecteur d'écoulement minimum
- **Collecteur de remplissage 14** : Ce collecteur est raccordé directement au pipeline GPL en provenance des modules de traitement de gaz.
- **Collecteur de refoulement de transfert 6** : Lors de l'opération de transfert du GPL d'une sphère à une autre pour des raisons de sécurité (anomalie, fuite ...), le GPL refoulé à partir de la pompe de transfert se dirige le collecteur de refoulement de transfert pour alimenter l'autre sphère à l'aide de la vanne 6
- **Collecteur d'écoulement minimum 3** : Lorsqu'on a un excès de débit au refoulement des pompes booster et afin de protéger les pompes d'expédition, le GPL se dirige vers le collecteur d'écoulement minimum à partir d'une vanne de régulation de débit. Le GPL contenu dans ce collecteur est renvoyé vers la sphère par l'ouverture de la vanne 3.
- **La ligne de vidange** : est raccordée au collecteur d'aspiration principale des pompes d'expédition et au collecteur d'aspiration de transfert
- **Collecteur d'aspiration principale** : Chaque conduite de vidange de la sphère est raccordée au collecteur d'aspiration principale des pompes d'expédition.
- **Collecteur d'aspiration de transfert** : Lors de l'opération de transfert du GPL d'une sphère à une autre pour des raisons de sécurité (anomalie, fuite ...), on ouvre la vanne 10 '' de la conduite raccordée à la ligne de remplissage de la sphère qu'on veut vidanger afin d'envoyer le GPL vers le collecteur d'aspiration de transfert qui alimente la conduite d'aspiration des pompes de transfert.
- **Cuvette de rétention** : Les sphères GPL sont situées à l'intérieur de cuvettes de rétention qui sont séparées. La surface de chaque cuvette de rétention est de **4225 m²**

Elle est calculée pour contenir **20 %** du volume utile de stockage.

3.3 Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios UVCE

3.3.1 Identification de scénario d'accident

Dans cette étude, l'identification des scénarios dangereux liés à la sphère, Nous avons choisi un scénario de (VCE), afin de l'étudier et de fournir les étapes attendues pour sa réalisation.

Le début de l'incident est la perte de confinement. Nous considérons ici quelques raisons possibles. Le grand fuit dans la paroi de la sphère permet au liquide de s'écouler dans le milieu extérieur et le début de la formation de nuages.

Dans notre cas, l'allumage n'est pas instantané. En cas d'allumage immédiat, le phénomène de feu chalumeau se produira.

Ignition retardée : Après la formation du nuage et sa rencontre avec une source qui aide à l'inflammation. Et dans le cas où l'inflammation ne se produit pas, cela est dû au fait que la concentration du liquide n'est pas adaptée, et cela entraîne une pollution. L'inflammation de la plus grande partie du nuage conduit à l'explosion, et ce phénomène est appelé VCE.

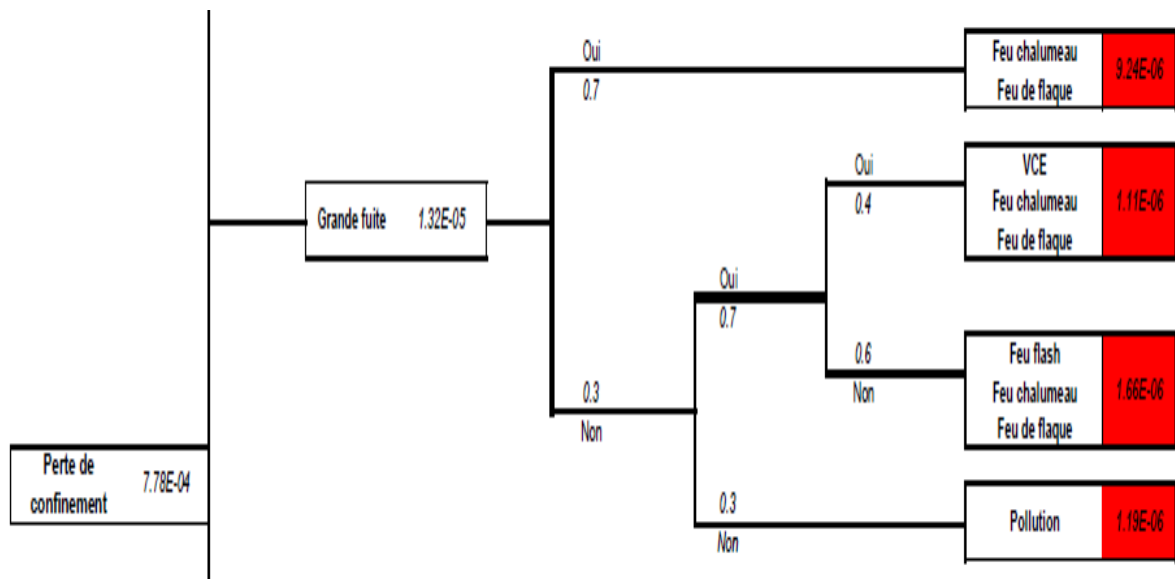


Fig 3.3 : Scénario d'accident retenu pour l'étude

3.3.2 Analyse quantitative de l'effet de surpression de scénarios d'accidents choisis (UVCE)

3.3.2.1 Collecte des données d'entrée

Tableau 3.3 : données d'entrée de simulations

Caractéristiques	Valeurs
Substance	GPL
Température de service	20 C
Pression de service	7.36 bar
Masse	3843120 kg
Scénario	Rupture catastrophique
Elévation de point de rupture	

3.3.3 Seuils de référence pour les effets de surpression

Nous utiliserons les seuils de surpression suivants pour quantifier et discuter des effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les bâtiments :

Tableau 3.4 : Seuils de surpression des effets sur l'homme et des effets dominos

Seuils	Justifications
Seuils pour les effets sur l'homme	
25 mbar	Dommmages graves
50 mbar	Dommmages irréversibles ou létaux
Seuils pour les effets dominos	
160 mbar	Premiers dégâts aux structures (effet domino)
300 mbar	Dégâts graves aux structures

3.3.4 Résultats et discussions de simulation à l'aide de modèle TNO-Multi-énergie

Dans le cadre de notre mémoire de master académique, nous procédons à la méthode TNO-Multi-énergie comme nous avons déjà décrit par le chapitre II, et pour notre étude de cas, nous avons choisi de prendre en considération le centre de stockage Hassi R'mel (voir Fig 3.4). Sachant que la zone concernée par notre étude est la zone sélectionnée en rouge (Fig 3.4) de 177326.02 m².

Il est essentiel de signaler que les étapes de la méthode utilisée pour la simulation sont décrites en détail dans le chapitre II, et cette partie est consacrée pour l'application numérique des équations.

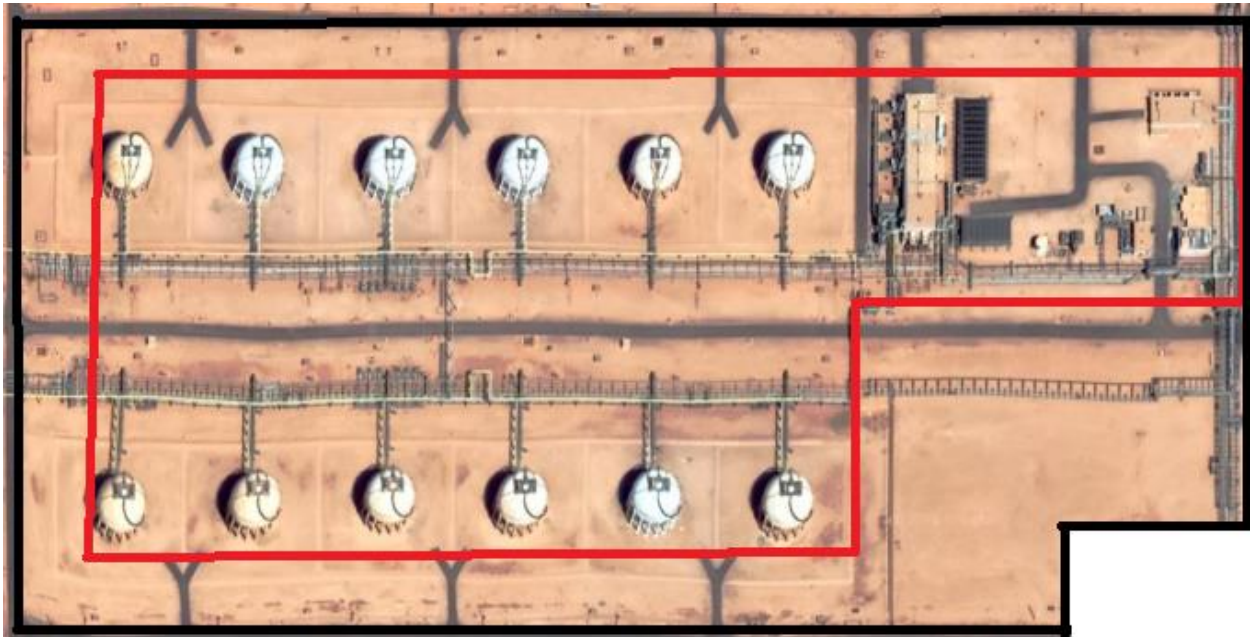


Fig 3.4. Zone de stockage CSTF à Hassi R'mel

3.3.4.1 Calcul de volume explosible

Dans cette étape, nous avons proposé la fraction du nuage inflammable recouvrant : 80/100 et alors:

- *Volume de la zone encombré:*
 - ✓ $(\text{Surface de zone de la sphère} * h) + (\text{surface de zone du sale de control} * h)$
 - ✓ $(83484.37 * 1.5) + (17932.74 * 1.5) = 152125$
- *Volume à déduire de Vze (bâtiments, structures...) :*
 - ✓ $(71702) + (1474.2 * 15) = 108108$
- *Volume maximal pouvant être occupé par le nuage*
 - ✓ $(\text{Volume encombré} - \text{volume vze}) + \text{Volume libre}$
 - ✓ $(304251.33 - 108108) + (67150.11 * 1.5) = 144742$
- *Fraction du nuage inflammable recouvrant : 80/100*
- *Volume inflammable de la zone encombrée :*
 - ✓ $(\text{Volume encombré} - \text{volume vze}) * 0.8$
 - ✓ $(152125 - 108108) * 0.8 = 35213$
- *Volume inflammable de la zone en champ libre :*
 - ✓ $(67150.11 * 1.5) * 0.8 = 80580$

Tableau 3.5. Tableau récapitulatif des résultats de calculs des différents volumes

Réf		Valeur	Unité

1	Le nuage recouvre	La zone encombrée total	
2	Volume de la zone encombré (Vze) (lx/xh)	152125	m ³
3	Volume à déduire de Vze (bâtiments, structures...)	108108	m ³
4	Volume maximal pouvant être occupé par le nuage	144742	m ³
5	Fraction du nuage inflammable recouvrant	80	%
6	Volume inflammable de la zone encombrée	35213	m ³
7	Volume inflammable de la zone en champ libre	80580	m ³

Sur la base des valeurs des volumes calcul présenté par le tableau 3.xx, nous avons procédé au calcul de volume explosible par l'expression suivant :

$$V_{\text{explosible}} = V_{\text{inflammable ZE}} + V_{\text{inflammable ZL}}$$

- $V_{\text{inflammable ZE}}$: Volume inflammable de la zone encombrée
- $V_{\text{inflammable ZL}}$: Volume inflammable de la zone en champ libre

$$V_{\text{explosible}} = 35\,213 + 80\,580 = 115\,793 \text{ m}^3$$

3.3.4.2 Calcul de l'énergie de combustion

Le calcul de volume explosible nous a permis de calculer l'énergie de combustion participée à l'explosion et pour cela, nous avons l'équation suivant :

$$E = \Delta H * m_{\text{explosible}}$$

$$E = \Delta H * (\rho_{\text{vol}} * C_{\text{stoechio}} * V_{\text{explosible}})$$

Avec:

- $\Delta H = 46000 \text{ KJ/KG}$
- $\rho_{\text{vol}} = 563 \text{ KG/m}^3$
- $C_{\text{stoechio}} : 3.2/100$

$$C_{\text{stoechio}} = \frac{n_{\text{Comb}}}{n_{\text{Comb}} + 4.8n_0}$$

- **Combustion du GPL**



Donc:

$$C_{\text{stoechio}} = \frac{3.5}{3.5 + 4.8(5.75 \times 3.8)} = 0.032$$

Et donc, on peut calculer l'énergie de combustion par l'application numérique:

$$E = 46000 * (563 * 0.032 * 115793)$$

$$E = 95961827648 \text{ Kj}$$

3.3.4.3 Calcul du rayon caractéristique

Le rayon caractéristique est calculé par la formule suivant :

$$R_c = \left(\frac{E}{P_0}\right)^{1/3}$$

A.N :

$$R_c = \left(\frac{95961827648 * 1000}{101325}\right)^{1/3}$$

$$R_c = 982$$

3.3.4.4 Détermination du rayon du cercle de dommage

En fonction de la courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite (Fig 3.5)

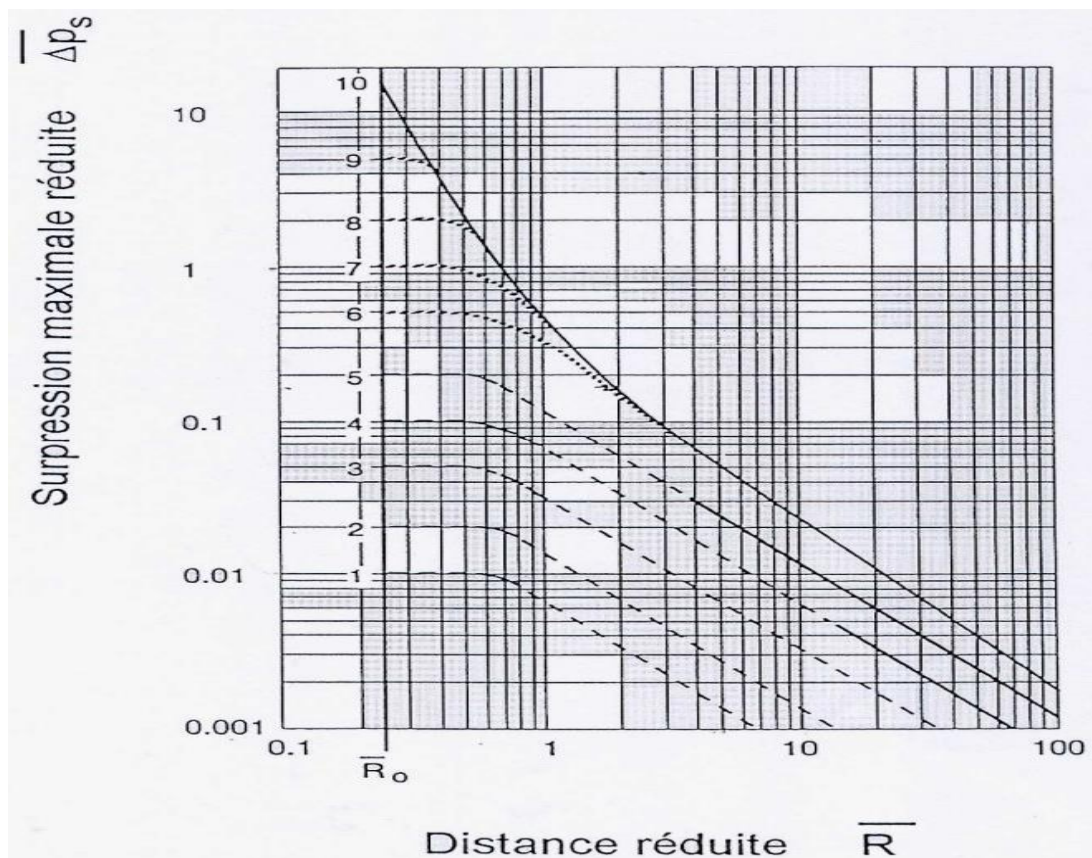


Fig 3.5. Abaque pour le calcul de distance réduite

3.3.4.5 Calcul de la distance d'effet de surpression

Après les étapes précédentes, nous calculons la distance d'effet de surpression par l'équation suivante:

$$X = \bar{R} * R_c$$

Exemple A.N :

$$\checkmark D_{25} = \bar{R}_{25} * R_c$$

$$\checkmark D_{25} = 10 * 982$$

Et les résultats obtenus de calcul des distances d'effet de surpression sont présentés par le tableau 3.6.

Tableau 3.6: Résultats de calcul des distances d'effet de surpression

Seuils de surpression	\bar{R}	Distances d'effet (m)
		Modèle TNO
25	10	9820
50	5	4910
160	2	1964
300	1.5	1473

Pour les effets de surpression associés à l'UVCE sur l'homme, les zones d'effets correspondant aux seuils de 25 mbar et 50 mbar portent respectivement à une distance de 9820 mètres et 4910 mètres. En effet dans les deux zones les effets de ce phénomène peuvent causer des dommages graves sur l'homme (à 25mbar) et des effets létaux (à 50mbar).

Pour les effets de surpression associés à l'UVCE, les zones d'effets correspondant aux seuils de 160 mbar et 300 mbar portent respectivement à une distance de 1964 mètres et 1473 mètres. Ce phénomène pourrait dès lors engendrer des effets dommageables sur l'ensemble des équipements présents à l'intérieur de ces rayons.

Les effets dominos se caractériseront par une défaillance mécanique des installations touchées. En fonction de l'équipement, il est possible d'avoir plusieurs fuites au niveau des équipements touchés, suivies par l'inflammation immédiate des substances combustibles relâchées.

On utilise la même méthode et équations, nous avons calculé les distances d'effet de surpression pour des taux de fraction du nuage inflammable qui recouvrent 20%, 40%, 60% afin de faire une comparaison entre ces valeurs d'une part et de valider notre méthode de calcul d'autre part :

Tableau 3.7 : Tableau récapitulatifs des distances d'effet de surpression pour des différents taux de recouvrement

Seuils de surpression	\bar{R}	Distances d'effet (m)			
		Modèle TNO			
		20%	40%	60%	80%
25	10	6180	7790	8920	9820
50	5	3090	3895	4461	4910
160	2	1236	1558	1784	1964
300	1.5	927	1168	1338	1473

Et pour bien comparé entre ces résultats, nous avons les visualisé par la figure suivant (Fig 3.6).

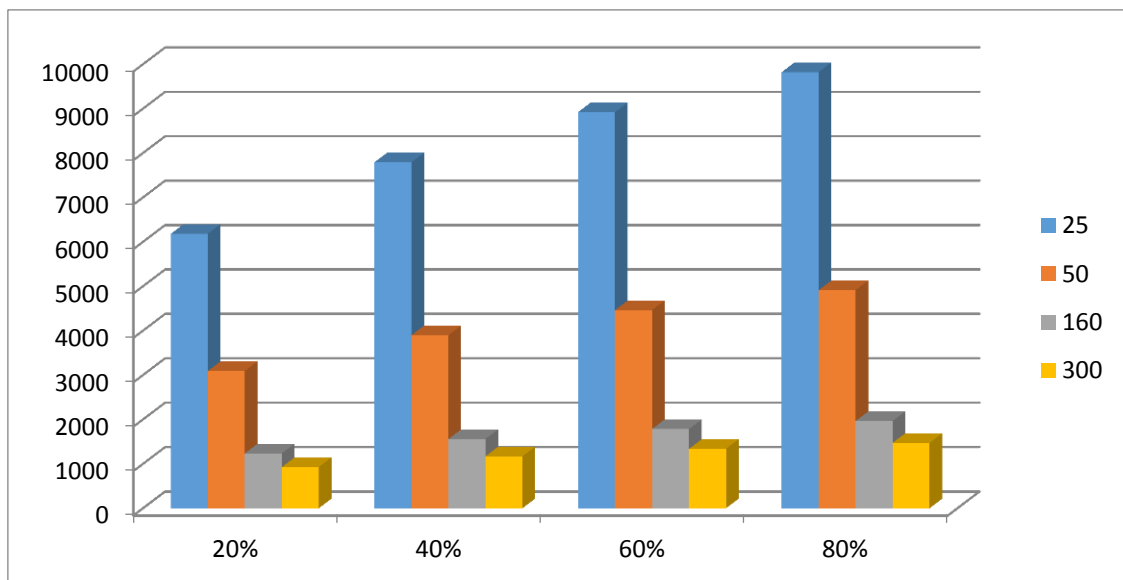


Fig 3.6. Comparaison entre les distances d'effet de surpression pour des différents taux de recouvrement

On constat que :

- Plus on est loin du centre de l'explosion, moins c'est dangereux. Cette observation est vraie pour toutes les proportions qui ont été calculées.
- Plus la quantité de matière participant à l'explosion est grande, plus son danger est grand, et cela est évident en augmentant la distance d'une proportion à l'autre pour les mêmes seuils de surpression.

3.4 Conclusion

Nous avons utilisé une approche quantitative d'évaluation des conséquences de phénomène UVCE et en particulier, l'effet de surpression. On a appliqué cette modèle TNO-Multi-énergie à un système opérationnel (sphère de stockage de GPL). Cette application nous a permis de montrer l'impact des conséquences dangereuses engendrées par l'effet de surpression de l'UVCE. De plus, des distances d'effet de surpression pour des différents taux de recouvrement 20%, 40%, 60%, et 80%.

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 survenir 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'évaluation quantitative des effets de surpression des explosions qui peuvent se traduire dans le centre de stockage de GPL de SONTARACH à Hassi R'mel. Et pour illustrer notre démarche de modélisation, nous avons choisi le phénomène UVCE (explosion à l'air libre) d'une sphère de stockage de GPL.

À cet effet, nous présentons dans le chapitre deux modèles de calcul des effets de surpression; le modèle TNO Multi-énergie et modèle équivalent TNT qui sont utilisé pour la modélisation des effets de surpression associés à des explosions non confinées et des explosions confinées respectivement. Et pour notre étude de cas, nous avons choisi le modèle TNO-Multi-énergie qui est le modèle adapté à notre étude (modélisation des explosions non confinées « UVCE »).

Cette application nous a permis de montrer l'impact des conséquences dangereuses engendrées par l'effet de surpression de l'UVCE. En outre, des distances d'effets de surpression pour des différents taux de recouvrement 20%, 40%, 60%, et 80%.

Nous avons constaté que, les modèles de calcul des effets des explosions sont très sensibles à des hypothèses de départ qui traduit par des différences entre les distances d'effets. Et comme perspective, nous proposons d'identifier ces paramètres qui influencent les résultats de simulations et modéliser la relation entre eux.

Références bibliographiques

- [1] Comité Français Butane Propane, GPL carburant historique, site web www.cfbp.fr , (Date de consultation: avril 2010).
- [2] Gaz de pétrole liquéfiés, site web www.naftal.dz , (Date de consultation: Mar 2010).
- [3] ZERNIZ Ibrahim., 2016. Optimisation des paramètres de fonctionnement d'une débutaniseuse, Master en raffinage et pétrochimie soutenue à l'université de Boumerdes.
- [4] BAYOUCHEF Boudjemaa., 2014. Vérification des paramètres de fonctionnement du sécheur de gaz lourd au niveau de ROURDE NOUSS. Mémoire fin de formation en master en génie chimique soutenue à l'université Ahmed Draia-Adrar.
- [5] Comité français du butane et du propane, les gaz Butane Propane, site web www.cfbp.fr , (Date de consultation: Mai 2010).
- [6] Robert, C. Reid, J. M. Prausnitz, Thomas K. Sherwood. The Properties of Gases and Liquids, Third Edition.
- [7] CHEBLI Laid. ABBASSI, Youcef 2014. Calcul des paramètres de fonctionnement du dépropaniseur (unité (38) ; traitement de GPL) "module III à Hassi R'mel. Faculté des Sciences et de la technologie (FST) de l'université de BISKRA.
- [8] F-zlatatikite: « Sumposium Binnal» 1997.volume I Session 2 : (la chaîne des GPL : de la production des GPL à leur utilisation).
- [9] Manuel opératoire de l'unité GPL-1 Hassi Messaoud (JGC CORPORATION).
- [10] INERIS-DRA-2002. BLEVE: phénoménologie et modélisation des effets thermique. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006).
- [11] LACHTAR. 2009. Sécurité des procédés chimique. Paris: CRC.
- [12] Rémi Guillemet. 1922. Protection des réservoirs de stockage sous pression dans les flammes : l'arrosage par ruissellement d'eau et l'ignifugation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Français. ffNNT:1992ENMP0372ff. fftel-00838726f.
- [13] 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>
- [14] Circulaire du 10 mai 2010. Récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat. République Française.

- [15] LIM. S., 2008. Influence des enseignements tirés d'accidents impliquant des stockages de GPL dans l'évolution des guides de bonnes pratiques à l'étranger.
- [16] Chaumette. S., Debray. B. 2016. Formalisation du savoir des outils dans le domaine des risques majeurs. UVCE de la ville de Nantes dans un dépôt pétrolier.
- [17] Mamadou Traore. 2007. Explosions de poussières et de mélanges hybrides : étude paramétrique et relation entre la cinétique de combustion et la violence de l'explosion. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine. Français. ffNNT : 2007INPL019Nff. fftel-01752813
- [18] TNO, Methods for the calculation of physical effects (yellow book): CPR 14E, (2005).
- [19] S. Mannan, Lee's loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment, and control, (2012).
- [20] TNO, Guidelines for quantitative risk assessment (purple book): CPR 18E, (1999).
- [21] Roland EYSSETTE., 2018. Caractérisation et modélisation des effets de surpression en champ proche et du chargement au sol du BLEVE. Thèse de doctorat école Nationale Supérieure des Mines de SaintEtienne.
- [22] INERIS, 2017. Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets. RAPPORT D'ÉTUDE N° DRA-17-164793-09921A
- [23] INERIS, 2011. Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre.
- [24] Laurent PARIS, 2009. Évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre. Rapport technique de technique de l'ingénieur de Réf : SE5062 v1.
- [25] SAFEGE, Généralités sur l'évaluation des effets de surpression liés aux phénomènes
- [26] A. Champassith, BLEVE Méthodes de modélisation des effets, ref. Article : se5061, in : Techniques de l'ingénieur Risques d'explosion, Editions T.I., Paris, 2014.
- [27] UFIP Guide méthodologique pour la réalisation des études de dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés – Volume II Modèles normalisés de quantification – Mai 2001
- [28] CCPS, Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards, (2010).
- [29] Dahlia Oueidat. 2016. Apport de la modélisation et de la simulation à l'analyse des risques et la prévention des accidents d'un site de stockage de GPL. Gestion et management. Université Paris sciences et lettres. Français. ffNNT : 2016PSLEM023ff. fftel-01544965f