

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER



Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie des procédés:

Option : Sécurité industrielle

Thème

**Étude des phénomènes dangereux liés au stockage de
Propane et Butane au niveau de la raffinerie d'Alger**

Présenté par : BIROUK Faiza
BOUZIANI Safaa

Encadré par :
Mme. YOUNSI. F

Année Universitaire : 2015/2016

Introduction

Nombreux sont les risques spécifiques à chaque produit. Ces risques augmentent en fonction des différentes opérations de réception, d'exploitation, de stockage et de transport.

Actuellement le risque majeur susceptible de survenir au niveau des installations pétrolières et compte tenu de l'activité du secteur hydrocarbures est l'incendie et/ou l'explosion. Ces deux risques apparaissent fréquemment dans l'industrie pétrolière, notamment le BLEVE et le feu de nappe, c'est le cas de la raffinerie d'Alger au niveau de la zone de stockage de butane et propane.

L'objectif de notre travail est de déterminer le flux thermique d'un feu de nappe ainsi que les différents effets d'un BLEVE (thermiques, missiles et de surpressions) afin d'estimer leurs impacts sur l'Homme, l'environnement et les installations pour réduire la gravité et la probabilité d'apparence de ces deux phénomènes.

Outre cette introduction, ce mémoire est organisé en deux grandes parties ; une partie théorique et une partie pratique. Dans un premier temps, le présent mémoire fournit une présentation de la raffinerie d'Alger en passant par la zone de stockage et la présence des potentiels de danger liés aux produits existants dans la raffinerie. Ensuite, il décrit les différents types des réservoirs et modes de stockages des gaz liquéfiés. Le chapitre suivant (chapitre III) est consacré à la description des différents phénomènes dangereux liés au stockage des hydrocarbures, ces origines, conséquences, aussi ces effets sur l'homme et l'environnement avec la présentation de ses caractéristiques. Avec plus de détail sur les deux phénomènes de notre étude BLEVE et feu de nappe

Pour la partie pratique, elle est divisée en deux parties, la première est réservée à la modélisation des conséquences d'un feu de nappe de butane et son extinction. La deuxième partie traite un BLEVE sur une sphère de stockage et sur un camion-citerne.

Enfin, le dernier chapitre portera sur les moyens de prévention et intervention pour assurer la sécurité du personnel, des installations et environnement.



Présentation de la raffinerie d'Alger

I.1 Introduction

SONATRACH est la compagnie algérienne de recherche, d'exploitation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. C'est la première entreprise du continent africain. Elle est classé 12^{ème} parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2^{ème} exportateur de GPL et 3^{ème} exportateur de gaz naturel. NAFTEC est une filiale 100% du groupe SONATRACH. Ses missions consistent en :

- Le raffinage des hydrocarbures et dérivés de toutes les opérations qui y sont liées ;
- Le développement de toutes activités conjointes en Algérie et hors Algérie ;
- Le respect des spécifications et de la quantité des produits raffinés ;
- Toutes opérations industrielles, commerciales, financières, et immobilières.

Le raffinage est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différents produits finis tels que l'essence, le fioul lourd ou le naphta. Le pétrole brut est un mélange hétérogène d'hydrocarbures divers (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène), inutilisable en l'état. Ses composants doivent être séparés afin d'obtenir les produits finaux exploitables directement. On en distingue en général deux grands types :

- Les produits énergétiques, tels que l'essence, le diesel (gazole) ou le fioul ;
- Les produits non-énergétiques, tels que les lubrifiants, le bitume et les naphthas utilisés en pétrochimie.

Le raffinage ne se limite plus aujourd'hui à la séparation des différents hydrocarbures. Des procédés chimiques complexes sont également mis en œuvre afin d'optimiser les produits finaux. Les différentes coupes pétrolières peuvent ainsi subir des transformations, des améliorations et des mélanges pour obtenir des produits commercialisables et répondant aux normes environnementales.

La raffinerie d'Alger a pour but de traiter le pétrole brut de Hassi Messaoud a fin de satisfaire essentiellement la demande en carburants du marché national et de l'exportation (NAPHTA et fuel)

I.2 Situation géographique

La raffinerie d'Alger se situe à 5 Km au sud d'El Harrach et à 20Km à l'Est d'Alger sur une superficie de 182 hectares. Cet emplacement a été choisi après une étude du sol et la découverte d'une nappe d'eau nécessaire pour l'alimentation des systèmes de refroidissement.

En ce qui concerne le choix de la région algéroise, elle se présente comme un pôle futur de développement industrielle. En plus, elle a l'avantage d'être le plus grand centre de consommation avec une part de 40% à 50% de la demande intérieure [1].

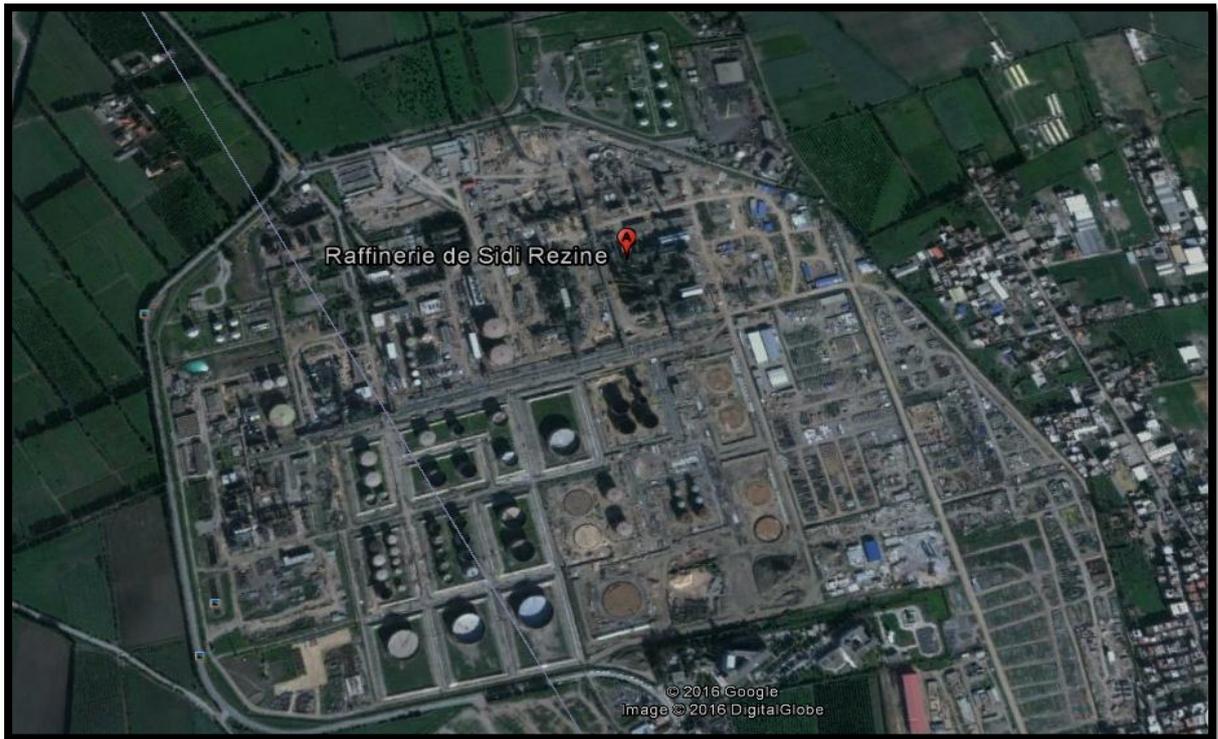


Figure 1: Vue satellite sur la raffinerie d'Alger

I.3 Historique de la raffinerie

Suite à la découverte du pétrole dans le sud algérien en Septembre 1959, sept compagnies pétrolières internationales ont décidé de construire une raffinerie, sa construction a duré 3ans (1961- 1963) et son exploitation a débuté en 19 février 1964.

Les compagnies ayant participées en projet sont :



- ❖ Société Shell Algérie 24%.
- ❖ Compagnie française de pétrole 20%.
- ❖ Esso méditerranéen 17.5%.
- ❖ Total S.A.H.M 12%.
- ❖ Société française de pétrole BP 10.4%.
- ❖ SN Repal 10%.

Le coût de construction est estimé à 210 millions de dinars dont 170 millions pour les installations et 40 millions de frais établis et autres. Dans une première phase, l'Algérie acquies des actions par l'intermédiaire de la SONATRACH et puis dans la seconde, elle a procédé à la nationalisation en 1972[1].

I.4 Capacité de production

Le but primordial de NAFTEC est de continuer à assurer la couverture des besoins en produits de première nécessité, ainsi que les divers produits pour l'industrie pétrolière.

Au démarrage, la capacité de production de la raffinerie était de (1,5 millions t/an). La capacité portée en (1971) à (2,7 millions t/an). Elle a atteint le plafond de production en (1991) avec (03 millions t/an). Actuellement, la production est de (2,7 millions t/an)[1].

Elle a une gamme variée de produits qui sont :

- Butane et propane commercial
- Essence Normale et Super
- Jet (kérosène)
- Gasoil
- Fuel
- Naphta

I.5 La réception du brut

Depuis Janvier 1964, la raffinerie d'Alger était alimentée en pétrole brut par tankers du port pétrolier de Bejaia au port d'Alger, puis par pipe de diamètre de 26'' jusqu'au parc de stockage. A partir de 1971, la raffinerie est alimentée en pétrole brut par un oléoduc de diamètre de 16'', d'une longueur de 131km et d'un débit horaire de 500 m³, grâce à un piquage réalisé au BENI MANSOUR sur le pipe 24'' réalisant HASSI MESSAOUD au port pétrolier de Bejaia[1].

I.6 Organisation du département HSE

Le département Hygiène, Sécurité et Environnement sont composés de 4 services [1]:

- Service intervention
- Service prévention
- Service accueil et identification
- Cellule environnement

I.6.1 Service intervention

Ce service, composé de 52 agents assure d'une manière continue, la surveillance et les interventions sur les installations.

Le service intervention a pour tâches principales :

- Protéger et sauvegarder le personnel ainsi que le patrimoine de l'entreprise.
- Mener, en cas d'urgence, les actions conformément aux différents plans d'organisation des secours
- S'intégrer aux opérations d'intervention dans le cadre de l'assistance mutuelle.
- Gérer les installations et les équipements d'intervention et de secours.
- Concrétiser les programmes de formation et d'exercices de lutte contre l'incendie.

I.6.2 Service prévention

Ce service est composé de 9 personnes et assure :

- La supervision et le contrôle des installations.
- La gestion des risques liés aux travaux.
- La préservation de la santé des travailleurs.
- Le contrôle de la conformité des pratiques par rapport aux normes et aux règles du manuel HSE.

Le service prévention a pour tâches principales :

- Prévoir les risques d'accident et d'incident au sein des installations de l'entreprise.
- Garantir le respect des normes et réglementations de sécurité.
- Assister et contrôler tous les organes et structures d'exploitation en matière de sécurité.
- Promouvoir et développer l'organisation globale en matière d'hygiène et de sécurité.
- Diffuser les consignes de sécurité.
- Sensibiliser l'ensemble du personnel aux règles en matière de sécurité et d'hygiène.
- Contrôler les installations techniques et assurer le suivi des travaux.
- Réaliser des enquêtes et des statistiques des accidents du travail.

I.6.3 Cellule environnement

La cellule environnement dépend hiérarchiquement du département HSE, elle est constituée par deux ingénieurs environnement chargées des inspections et du contrôle environnemental sur les différents types de rejet.

Le rôle de la cellule Environnement

La gestion, le contrôle et l'élimination des différents déchets

- Déchets Liquides
- Déchets solides

- Les rejets atmosphériques
- Domaine sol et sous sol
- Pollutions sonores
- Luminosité
- Potabilité de l'eau

I.7 Présentation des unités de la raffinerie

I.7.1 Unité de distillation atmosphérique du brut « unité 100: Topping »

L'unité 100 est une unité de distillation atmosphérique ou Topping. Elle a pour but de fractionner le Pétrole brut en un certain nombre de coupes ou fractions classées selon les températures d'ébullition des hydrocarbures.

Elle produit ainsi de l'essence SR (Straight Run), des gas-oils lourds et légers, du kérosène, des solvants lourds et légers, des gaz liquéfiés et un résidu atmosphérique.

La capacité de l'unité de traitement du pétrole brut est de 2.700.000 tonnes par an. Cette unité est composée des circuits : préchauffe, chauffage et distillation fractionnée[2].

I.7.2 Unité de reforming catalytique « unité 200: Platforming »

L'unité 200 est une unité de reforming catalytique aussi appelée Platforming. Son but est d'augmenter l'indice d'octane des solvants lourds et légers fabriqués par l'unité 100. C'est une base principale pour la fabrication des carburants automobile (essence normal et super). Cette unité comporte les circuits : catalytique, stabilisateur et générateur de vapeur [2].

I.7.3 Unité de traitement du gaz « unité 300 : gaz plant »

Les vapeurs de GPL récupérées à partir des unités de Topping et de reforming catalytique sont principalement chargées en butane et en propane.

Le passage de ces vapeurs dans l'unité gaz plant permet donc de séparer et de récupérer le propane et le butane commercial.

Cette unité est spécifiée par ses tamis moléculaires [2].

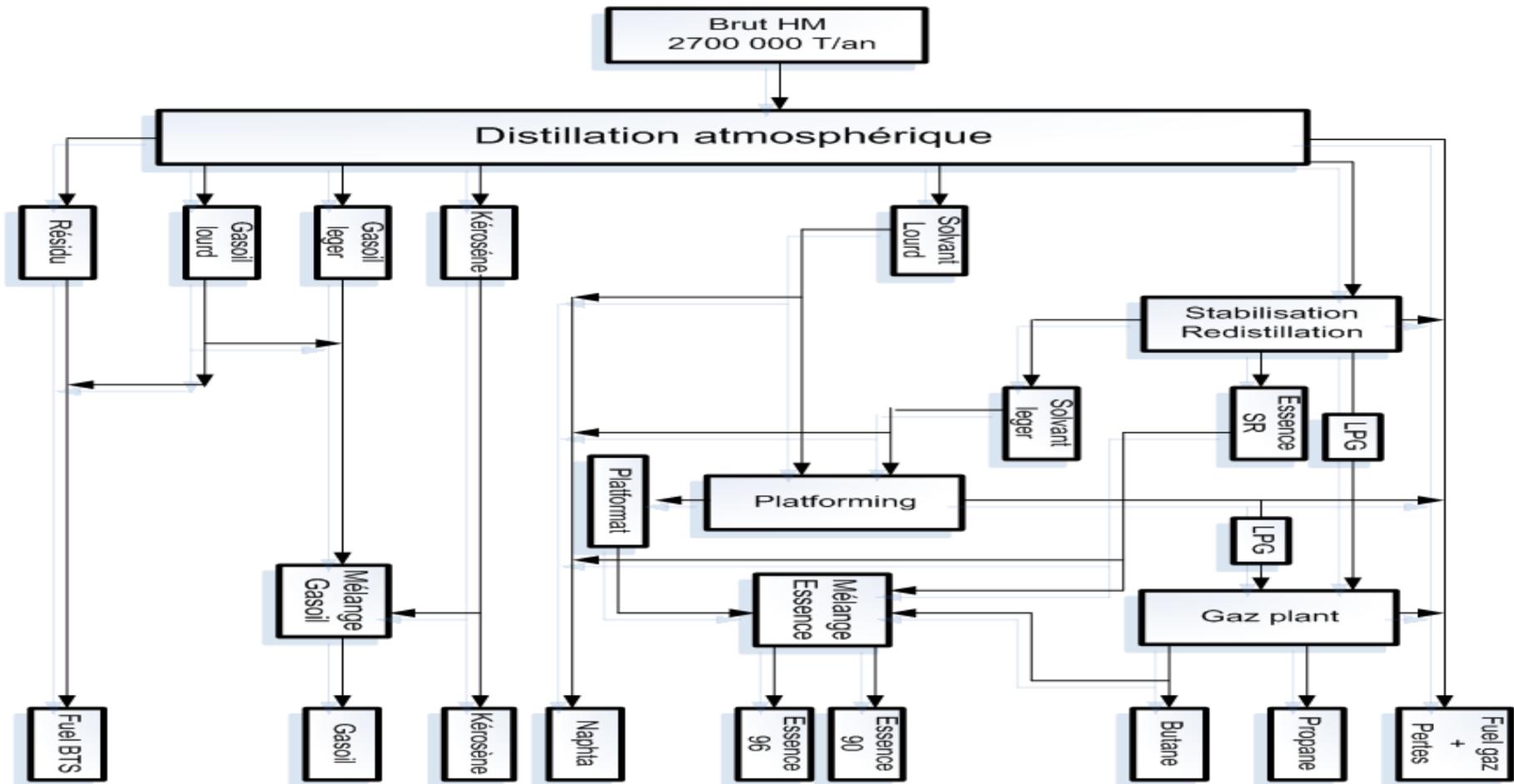


Figure 2: Schéma synoptique de la raffinerie d'Alger.

I.8 La zone de stockage de la raffinerie

I.8.1 Description des stockages

La raffinerie d'Alger possède deux parcs de stockages distincts :

- Une zone de stockage de GPL issus des unités de fabrication, avec pomperie et poste dechargement/déchargement associés
- Une zone de stockage de tous les autres produits liquides, allant du brut aux produits finis. Cette zone possède également sa propre pomperie d'expédition[3].

I.8.1.1 Stockage des GPL

Le parc de stockage GPL est constitué de sphères et ballons de butane et de propane, provenant de l'unité 300 Gas Plant, avant leur expédition par gazoduc ou par camion.

Sa capacité totale de stockage est de 8217 m³ répartie en 5 sphères et deux ballons.

Les mouvements des GPL au niveau des sphères s'effectuent grâce au système de télé jaugeage à partir de la salle de contrôle.

Les deux réservoirs cylindriques horizontaux sont utilisés pour le stockage du produit de coulage (Butane et Propane) pendant le fonctionnement de l'unité Gas Plant[3].

Désignation	Type de réservoir	Capacité	Produit stocké
S1	Sphère	1509 m ³	Butane
S2	Sphère	1509 m ³	Butane
S3	Sphère	996 m ³	Propane
S4	Sphère	996 m ³	Propane
S5	Sphère	2900 m ³	Butane
H3	Ballon horizontale	173 m ³	Butane
H4	Ballon horizontale	134 m ³	Propane

Tableau 1 : Les différents types des réservoirs de stockage

I.8.1.2 Stockage des liquides inflammables

Les bacs du parc de stockage des liquides inflammables contiennent divers produits [3]:

- Les bacs de pétrole brut directement alimentés par pipeline.
- Les produits intermédiaires issus des différentes unités (solvants, essence SR, platformats et naphta).
- Les produits finis destinés à l'expédition (essence normale et super, gasoil, kérosène, fuel).
- Les slops, constitués des résidus indésirables ou des produits ne répondant pas aux spécifications.

I.8.1.3 Autres stockages

En supplément des réservoirs de stockage décrits ci-dessus sont installés[3]:

- 2 bacs d'eau incendie de 5 000 m³ chacun.
- d'autres réservoirs de petites capacités comprenant des bacs d'eau déminéralisée, de gasoil et de fuel-oil, des bacs d'eau à usage domestique (300 m³).

I.8.2 Présentation des potentiels de dangers

I.8.2.1 Potentiels de dangers liés aux produits

Quelques produits dangereux présents au niveau de la zone de stockage et d'expédition ainsi que leurs propriétés physico-chimiques en termes d'inflammabilité et de toxicité sont donnés dans le tableau suivant[3]:

Produit	Inflammabilité				Toxicité	Conclusion
	Point éclair	Température d'auto inflammation	Point d'ébullition	Température maximale atteinte dans la zone		
Brut Hassi Messaoud	< 5°C	Non disponible	Non disponible	Ambiante		Inflammable
Propane	< -50°C	> 400°C	< -15°C	Ambiante		Très Inflammable
Butane	< -50°C	> 400°C	< 1°C	Ambiante		Très Inflammable
Gasoil	55°C	Non disponible	Non disponible	48°C		Non Inflammable
Fuel BTS	69°C	Non disponible	Non disponible	70°C		Inflammable
Essence normal	Non disponible	Non disponible	Non disponible	35°C		Très Inflammable
Essence super	-34°C	Non disponible	Non disponible	35°C		Très Inflammable

Tableau 2 : Les produits dangereux présents au niveau de la zone de stockage

I.8.2.2 Potentiels de dangers liés aux stockages

En cas d'incendie à proximité d'un réservoir de stockage, il y a risque de montée en température au-delà du point d'éclair et donc risque d'inflammation des produits. Les bacs de produits inflammables peuvent en revanche facilement s'enflammer compte tenu du point éclair des produits qui y sont stockés.

En cas d'incendie autour d'un bac ou d'un feu de bac, un Boil-Over peut se déclencher au bout de plusieurs heures.

Concernant le propane et le butane, ils sont stockés dans des sphères ou des cigares. Des pertes de confinement à ce niveau sont également possibles et peuvent donner lieu à des explosions.

UVCE et à des feux de jet. Des risques de BLEVE sont également probables dans le cas d'un important départ de feu à proximité des sphères.

Chaque bac de la raffinerie est présent dans une cuvette de rétention limitée par des merlons et forme ainsi une cavité de rétention en cas de débordement de bac ou de fuite importante, permettant ainsi de retenir le produit déversé à l'intérieur de la zone de stockage. Ces cuvettes de rétention sont reliées vers les regards des réseaux huileux à travers des conduites équipées de vannes d'isolement.

Pour pallier à tout problème de débordement, les bacs sont munis d'un système de détection de niveau haut avec alarme transmise directement en salle de contrôle. Les bacs sont également munis de couronnes d'arrosage pour assurer le refroidissement des bacs en cas d'incendie à proximité[3].

II

Stockage des gaz liquéfiés

II.1 Introduction

Le stockage du gaz (et des produits pétroliers) consiste à immobiliser temporairement certains volumes de produit dans des appareils à pression ou réservoirs selon que le produit stocké est ou n'est pas sous-pression. Le stockage des ressources énergétiques est non seulement nécessaire pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dues à toutes sortes d'aléas lors de la production mais aussi stratégique pour assurer un minimum d'autonomie énergétique

Les réservoirs de stockage permettent de stocker un produit. Ils sont de plusieurs formes, horizontales ou verticales, cylindriques ou sphériques. Les produits pétroliers liquides sont généralement stockés dans des réservoirs cylindriques verticaux en acier. Les produits à l'état gazeux eux sont plutôt stockés dans des capacités sphériques.

Pour l'exploitation des réservoirs de stockage, il faut également prendre des précautions pour éviter l'évaporation des produits ou pour maintenir la fluidité de certains produits par réchauffage.

II.2 Les différents modes de stockage des gaz liquéfiés

La géométrie des réservoirs dépend étroitement de la nature du produit stocké et de sa volatilité à la température de stockage. Cette volatilité étant connue, différents modes de stockage peuvent être envisagés. On peut les classer en fonction de la pression et de la température de fonctionnement du liquide stocké, compte tenu de la relation qui existe entre ces deux paramètres.

Le point normal d'ébullition des gaz liquéfiés est inférieure ou égal à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiante est supérieure ou égale à 1.013bar[4].

Trois modes de stockage peuvent être envisagés:

- Le stockage *sous pleine pression* P_p à température ambiante, θ_a (stockage libre)
- Le stockage *semi réfrigéré sous pression* P_{red} et température θ_{red} réduites (stockage à température contrôlée).
- Le stockage *réfrigéré ou cryogénique* (au PNE) sous pression atmosphérique P_{atm} et à température d'ébullition θ_{eb} (stockage à température contrôlée).

Une illustration de ces trois modes de stockage est donnée par la figure ci-dessous :

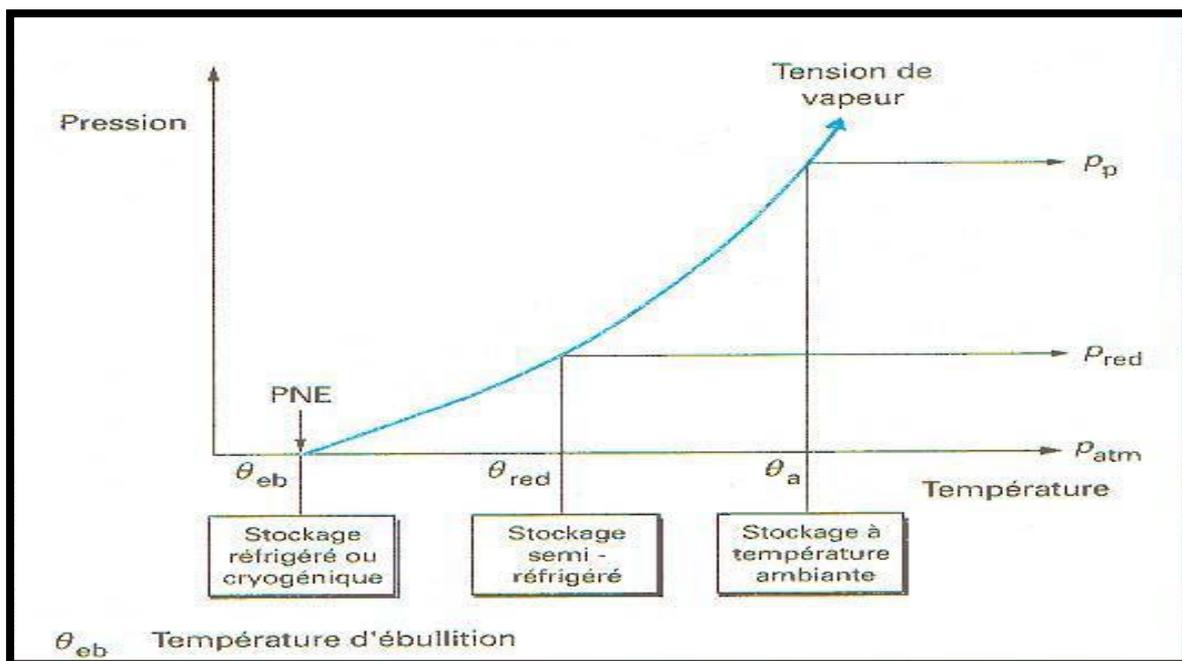


Figure 3: Les trois modes de stockage pour des liquides avec point normal d'ébullition (PNE) inférieure à la température ambiante.

II.2.1 Stockages sous pleine pression

Ils sont réalisés avec des réservoirs directement exposés à l'air ambiant sans isolation thermique ; la température du produit stocké est voisine de la température du site et la pression d'exploitation est maximale[4].

II.2.2 Stockage semi-réfrigérés

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation réduite, obtenue par abaissement de la température du produit, et comprennent une isolation thermique pour limiter l'entrée de la chaleur. Leur pression est limitée à une valeur intermédiaire comprise entre la pleine pression à température ambiante et la pression atmosphérique au PNE. Il en résulte que les épaisseurs de paroi des réservoirs sont moins importantes ; il est ainsi possible d'accroître l'importance des capacités unitaires[4].

II.2.3 Stockages réfrigérés et cryogéniques

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation pratiquement nulle obtenue par abaissement de la température du produit jusqu'à son PNE. Les épaisseurs de paroi sont ainsi plus faibles, ce qui permet d'augmenter encore les capacités unitaires. Ils sont pourvus d'un système isolant dimensionné pour maintenir le produit à basse température.

Par ailleurs, avec ce mode de stockage, la quantité de produit stocké est plus grande, car la densité des liquides est maximale au PNE. Cette caractéristique constitue un avantage essentiel pour le transport sur une grande distance. Elle est à l'origine des chaînes de liquéfaction et de distribution de gaz naturel qui existent entre les pays producteurs d'outre-mer et les pays industriels.

Par convention, on désigne par stockage réfrigérés, les réservoirs dont la température minimale est supérieure à -60°C car jusqu'à cette température, les réservoirs peuvent être réalisés avec des aciers au carbone classique.

Les réservoirs cryogéniques couvrent la gamme de températures comprises entre -60 et -273°C . Ils sont construits avec des matériaux beaucoup plus résilients tels que les aciers alliés au nickel (5 à 9 % de NI), les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium[4].

II.3 Les différents types des réservoirs de stockage des gaz liquéfiés

II.3.1 Réservoirs cryogénique

II.3.1.1 Stockage aérien

La figure ci-dessous représente les éléments constitutifs d'un réservoir cryogénique.

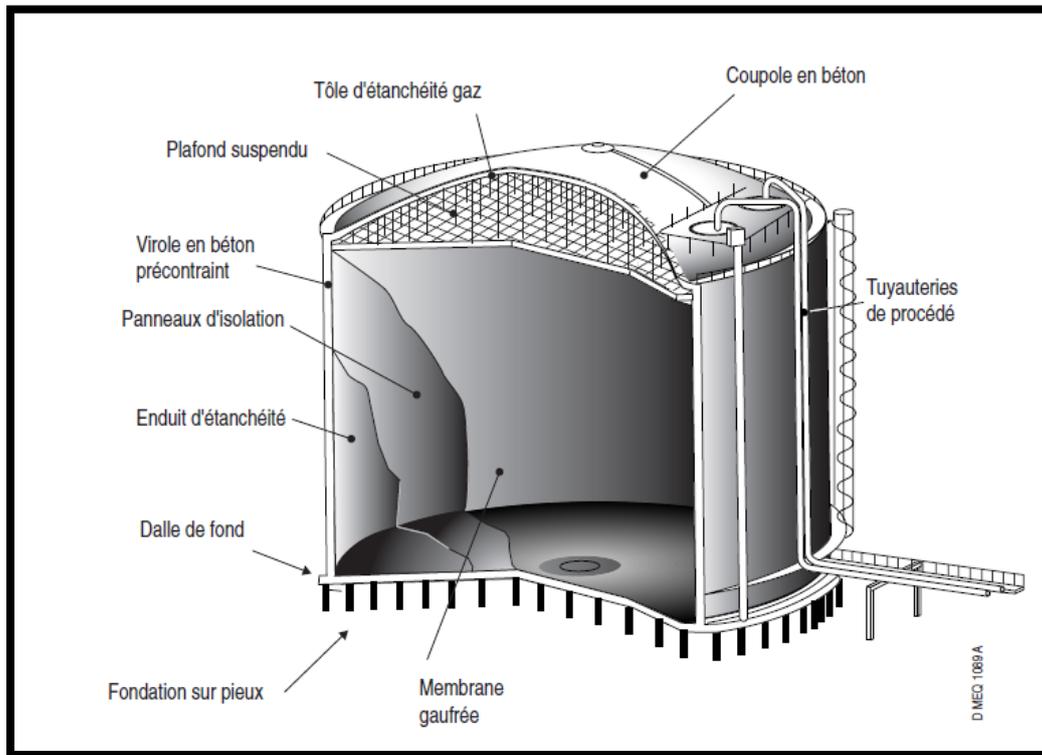


Figure 4: Bac de stockage cryogénique

Un bac de stockage cryogénique est composé de deux enveloppes :

- **une enveloppe intérieure** souple en matériau résistant aux basses températures.

Ex: aluminium, acier à 9 % de nickel, acier inoxydable (18 % Cr /10 % Ni) pour les très basses températures.

Dans le système Technigaz une membrane gaufrée confère la souplesse nécessaire pour absorber les contractions lors de la mise en froid.

- **une enveloppe extérieure**, en acier de qualité courante ou quelquefois, en béton armé précontraint, qui assure la résistance mécanique [5].

II.3.1.2 Stockage en cavités réfrigérées

Creusées à la surface du sol, elles ont leurs parois réfrigérées à la température de liquéfaction du gaz stocké. Elles exigent la mise en place et le fonctionnement permanent d'appareils de réfrigération qui compensent les pertes calorifiques [5].

II.3.1.3 Sécurité incendie de stockage cryogénique

Ces réservoirs sont équipés de tous les appareils instruments et accessoires permettant leur exploitation en sécurité [6]:

- mesures de niveau et de température
- mesure et régulation de la pression dans le bac
- système de détection des fuites
- soupape de surpression et de dépression sur le bac en cas de défaillance
- circuit d'arrosage au sommet de coupole

II.3.2 Stockages aérien sous forte et faible pression

II.3.2.1 Réservoir cylindrique horizontal (Cigare)

Ils conviennent bien pour le stockage sous forte pression qui est leur destination première. Néanmoins, il faut citer leur emploi courant pour les petits stockages de produits inflammables liquides sans pression dans les stations de distribution de carburants.

Ces réservoirs couvrent essentiellement le domaine du stockage sous forte pression des gaz liquéfiés. Ces produits très volatils présentent à température ambiante des tensions de vapeur élevées.

Pendant très longtemps, les ballons ont été utilisés pour des stockages de faibles importances, n'excédant pas 200 à 300 m³ Pour des capacités plus grandes, les sphères étaient en général retenues. Et sont très sensibles à la mise sous vide[5].

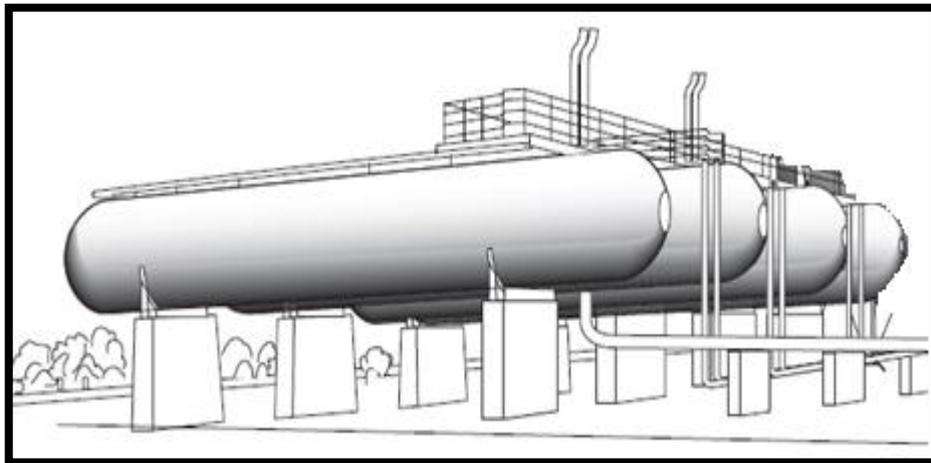


Figure 5 : Réservoir cylindrique horizontal

II.3.2.2 Réservoir cylindrique vertical

Ces réservoirs, étudiés pour fonctionner sous faible pression, permettent de réduire ou d'éliminer les pertes par évaporation et remplissage, Ils assurent en ce sens un service comparable, mais sous des conditions d'exploitation différentes et avec des capacités beaucoup plus limitées. Le contrôle de ces pertes est obtenu en dimensionnant le réservoir pour une pression interne suffisamment élevée capable de supporter, aux heures les plus chaudes de la journée, l'accroissement de la pression du mélange air-vapeur produit par l'évaporation du liquide[5].

II.3.2.3 Réservoir sphérique

Les sphères sont largement employées pour les stockages importants de gaz liquéfiés sous forte pression (pressions effectives en général inférieures à 30 bars). C'est la forme idéale pour résister à la pression car c'est sur ce **type de coque que le niveau des contraintes de membrane reste le plus faible**, c'est ainsi que l'épaisseur d'une enveloppe sphérique est, par exemple, moitié moindre que celle d'une enveloppe cylindrique de même diamètre soumise à la même pression et réalisée avec le même matériau. C'est aussi la forme géométrique qui présente la plus petite surface de paroi pour un volume donné. Par ailleurs, l'implantation de ces ouvrages nécessite moins de place au sol que les réservoirs cylindriques horizontaux. Toutes ces propriétés contribuent à rendre ces réservoirs très économiques et bien adaptés aux stockages sous pression de grandes capacités[5].

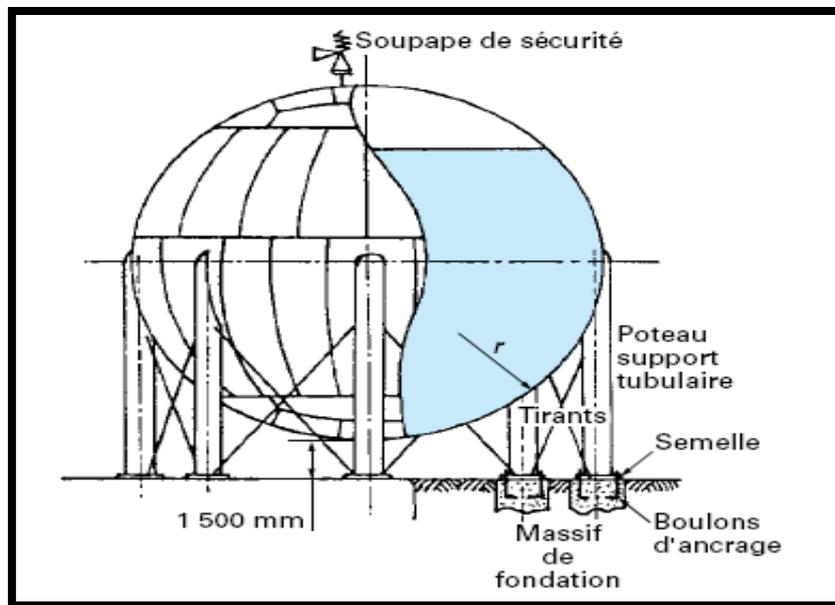


Figure 6: Sphère sur poteaux

Remarque:

Notre étude va se baser sur la sphère numéro 05 de stockage du butane (S5), sur laquelle nous allons évaluer le phénomène de BLEVE causé par un feu de nappe de propane.

a- Description de la sphère de stockage des GPL (S5)

Le dessin ci-dessous représente les éléments constitutifs d'une sphère[7] :

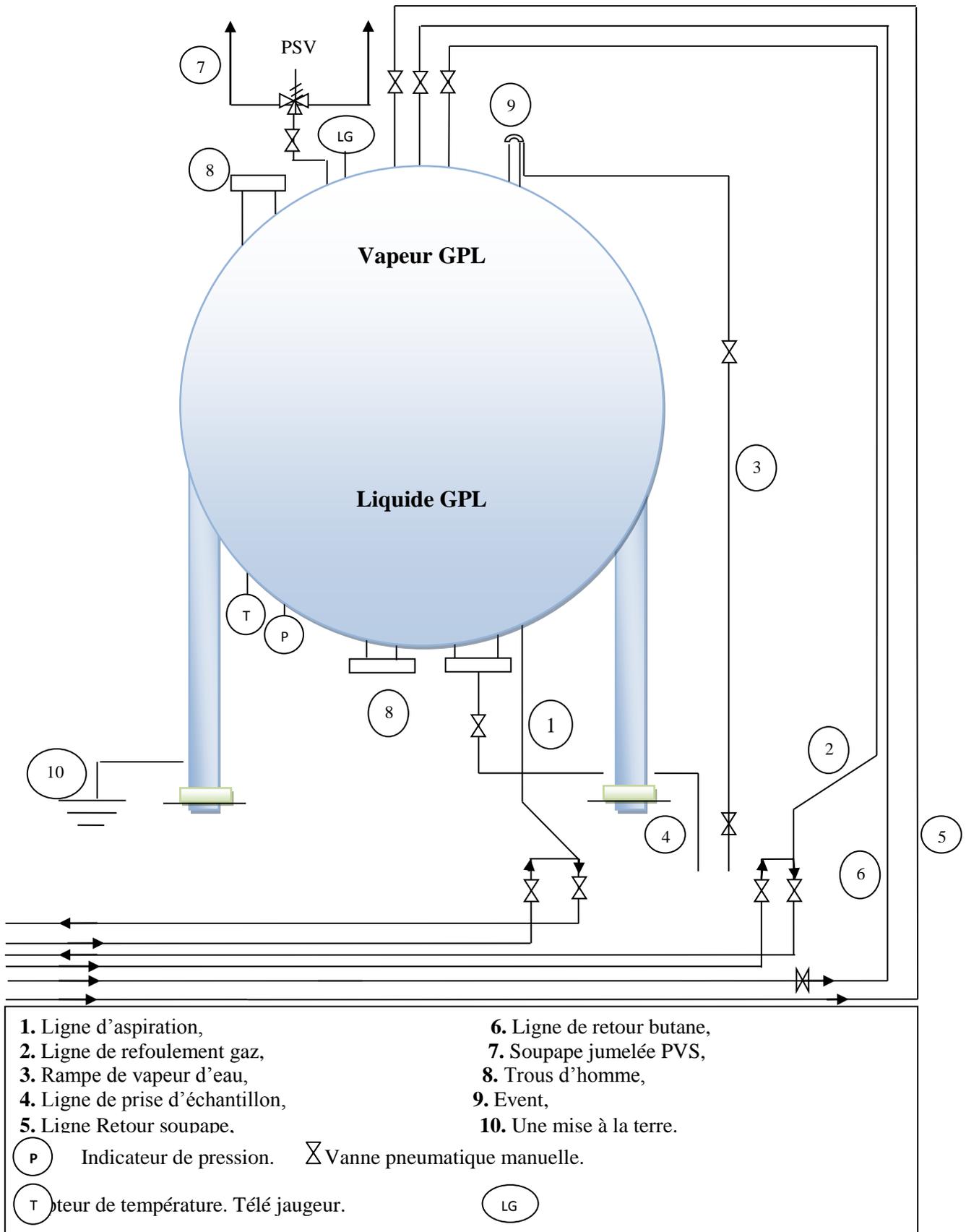


Figure 7: Schéma descriptif des équipements de la sphère. « S5 »

La sphère est raccordée aux canalisations de remplissage et de vidange suivantes :

- **Ligne d'aspiration** : une ligne de 10" pour le déchargement du butane, destiné à l'expédition ; comme elle possède un piquage de 6" pour le Coulage du butane à partir du cigare H3.
- **Ligne de refoulement gaz** : possède un piquage de 3" sert à remplir la sphère de l'extérieur, et une ligne de vidange de 4".
- **Ligne de retour butane** : c'est une ligne de refoulement du butane provenant de l'extérieur.
- **Ligne de retour soupape** : en cas de surpression au niveau des lignes, le gaz est évacué vers la sphère, donc craché par la soupape vers l'atmosphère (dans le cas de surpression).

b- Caractéristiques et Conception de la sphère (S5)

Fiche technique de la sphère (S5) [7]:

- Type d'appareil : sphère S5.
- Lieu de construction : ANGLETAIRE.
- Année de fabrication : 1971.
- Numéro de fabrication : 657.
- Date de la dernière épreuve : 11/01/2005.
- Désignation du contenu : BUTANE.
- Diamètre intérieur : $D = 17900 \text{ mm}$.
- Calotte inférieure : 28 mm.
- Calotte supérieure : 24 mm.
- Capacité totale : 3003 m^3 .
- Capacité de service : 2900 m^3 .
- Nature du métal : Acier BH36.
- Pression d'épreuve : 10.2 bars.
- Timbre : 6.86 bars.

II.3.2.4 Sécurité incendie de stockage aérien sous forte et faible pression

- Soupapes atmosphériques et/ou raccordées au réseau torche
- Couronne ou rampe de pulvérisation d'eau pour le refroidissement (ou mixte eau/mousse)
- Injection pied d'eau (substitution de la fuite de gaz)
- Injection pied d'eau (substitution de la fuite de gaz)[6].

II.3.3 Stockage sous terrains et sous talus sous pression

II.3.3.1 Réservoir sous terrains

Les gaz liquéfiés sont stockés dans des **cavités creusées** dans la roche (calcaire, craie, ...Etc) à partir d'un puits central ou à partir d'une rampe d'accès.

Généralement les cavités sont constituées d'un réseau de galeries.

La **profondeur de stockage** est telle que la pression hydrostatique créée par l'eau assurant l'étanchéité est toujours supérieure à la tension de vapeur du gaz liquéfié.

Les **mouvements de produits** sont assurés par des pompes et canalisations descendues dans les cavités par les puits d'exploitation. Des **pompes d'exhaure** effectuent l'extraction des eaux d'infiltration[5].

II.3.3.2 Réservoir sous talus

Il s'agit de réservoirs dont les parois sont recouvertes avec une couche protectrice à l'égard des effets thermiques et mécaniques. Cette couche protectrice a une épaisseur minimale de 1 m de matériau dense et inerte (terre, sable, matériau composite)[5].

a - Sphère sous talus

La sphère est abritée sous un cocon autoporteur ou talus en "Texsol" : mélange de sable et de fils polyester.

Cette technique s'applique aussi bien à des sphères neuves qu'à des sphères existantes.

- **Un exemple de réalisation d'une sphère neuve de propane sous talus**

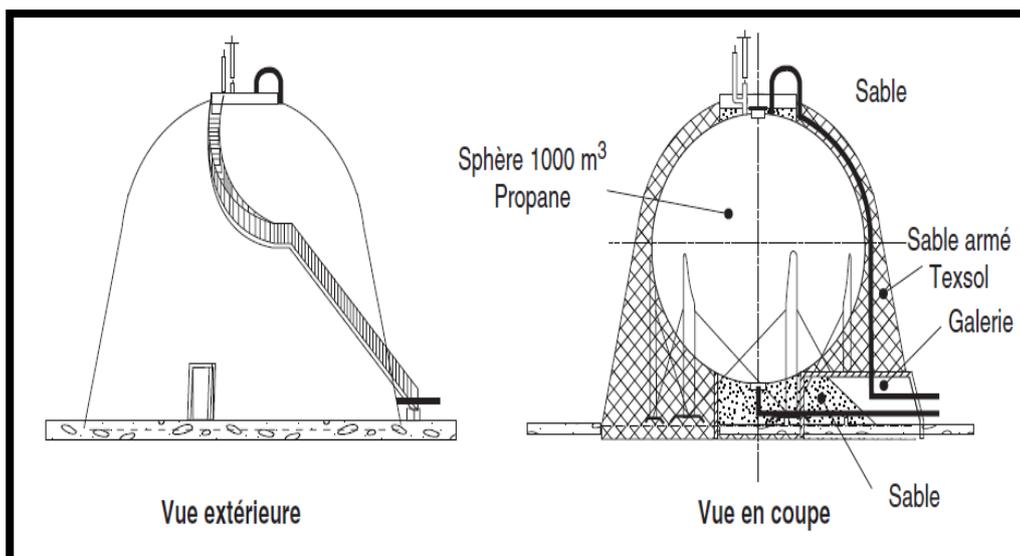


Figure 8: Sphère existante sous talus

La sphère repose sur un “coquetier” en béton. Cette dalle repose sur 84 pieux forés à 30m de profondeur.

L’ensemble des équipements est positionné sur trois trous d’homme de 30” de diamètre situés au sommet de la sphère. Le transfert vers les autres sphères du dépôt s’effectue par 2 tuyauteries de 8” en phase liquide et une tuyauterie de 4” en phase gazeuse[5].

b - Réservoirs cylindriques sous talus

Après construction, ils sont protégés par un revêtement spécial puis recouvert (à l’exception des trous d’homme des tuyauteries ou de visite) de sable ou de terre compactés (2 t/m² à 2,3 t/m²)[5].

- **Reservoir sur lit desable**

Pour éviter des fondations profondes (comme par exemple, celles des pieds des sphères), une partie de l’enveloppe cylindrique est utilisée pour répartir, largement et uniformément les charges sur un berceau de sable compacté, formant fondation. Cela permet de limiter la pression au sol (0,5 à 2 bar).

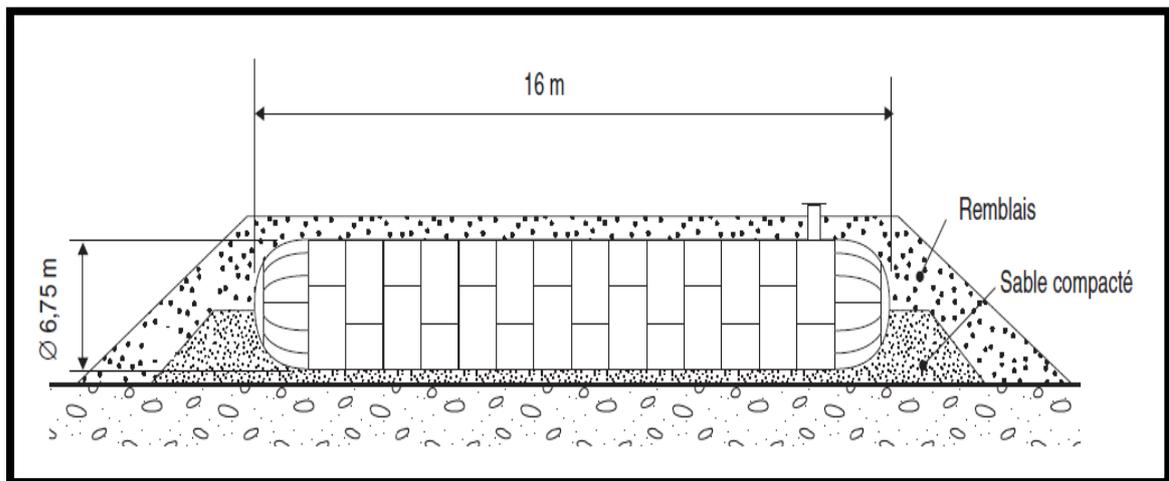


Figure 9: Réservoir GPL 1500 m³ sur lit de sable

- **Reservoir sursupports**

Ces réservoirs reposent sur deux massifs en béton armé. On rencontre également une technique de supportage constituée de poteaux métalliques soudés à leur partie supérieure sur les flancs du réservoir, leur partie inférieure (pieds) reposant sur une dalle de répartition en béton construite au niveau du sol.

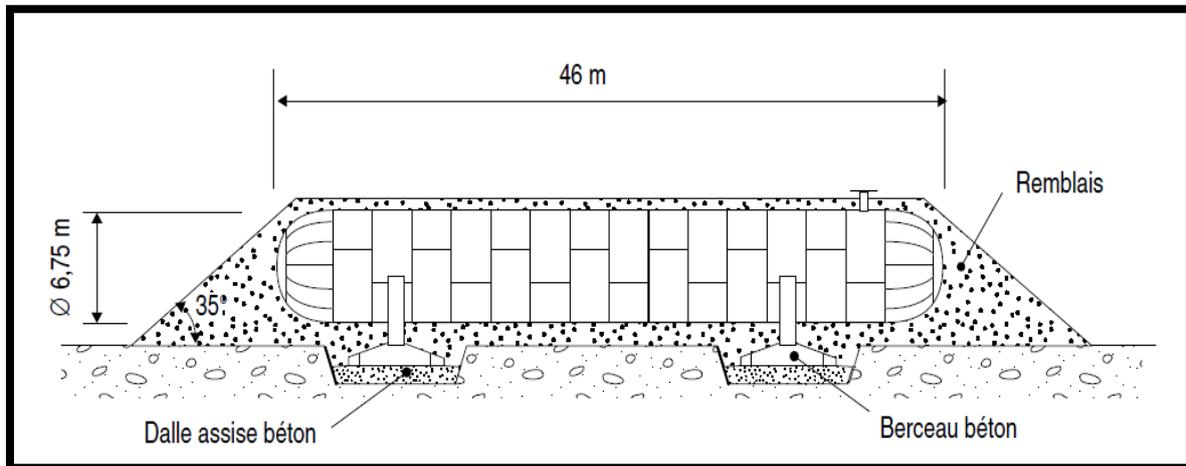


Figure 10: Réservoir de gaz liquéfié sous talus sur support

II.4 Conclusion

La production, le stockage et l'utilisation d'une quantité toujours croissante de produits dangereux entraînent dans l'industrie une augmentation considérable des risques d'accident majeur. 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 définies.

III

Les phénomènes dangereux liés au stockage des hydrocarbures

III.1 Introduction

La description de la phénoménologie des phénomènes dangereux et des effets qui leur sont associés a mis en évidence les critères importants à retenir pour la caractérisation de la vulnérabilité. La cinétique du phénomène doit lui aussi être prise en compte.

L'historique des phénomènes dangereux montre qu'ils ont des grands effets sur l'être humain et l'environnement et surtout dans les pays sous-développés, En l'Algérie, on a les accidents de 2004 et 2005 à SKIKDA, 2006 Gassi Touil à Hassi Messaoud, qui ont provoqué des dégâts humains et matériels.

Dans ce chapitre nous allons essayer d'expliquer les phénomènes dangereux, leur origine, leur effet avec la présentation de leurs caractéristiques, afin de les comprendre pour éviter leur survenue.

On peut distinguer deux types des phénomènes dangereux ; instantanés comme UVCE, BLEVE.....etc. Et continu comme feu de nappe, feu de torche.....etc.

III.2 Boil-over

Un boil over est un phénomène de moussage brutal impliquant des réservoirs atmosphériques et résultant de la transformation en vapeur, d'eau liquide (fond d'eau, eau libre, émulsion) contenue dans un réservoir en feu.

Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de combustible, du bouillonnement du contenu du bac, de l'extension des flammes et de la formation d'une boule de feu. En outre, il ne doit pas être confondu avec le phénomène de froth-over impliquant un réservoir réchauffé et non en feu, ou un slop-over qui est un phénomène de faible ampleur localisé à la surface de l'hydrocarbure contenu dans un bac [8].

Trois scénarios sont afférents au phénomène de boil-over:

- Feu du bac avec création d'une onde de chaleur
- Feu de la cuvette de rétention contenant le réservoir et vaporisation d'un fond d'eau après un échange thermique de longue durée par rayonnement et conduction entre le foyer et le réservoir.
- Feu du bac et de la cuvette de rétention cumulant les deux effets mentionnés ci-dessus.

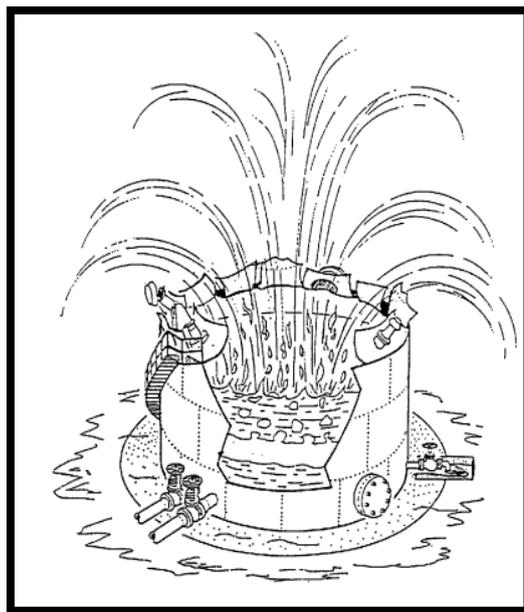


Figure 11: Phénomène du Boil-over

III.3 Froth-over

Débordement avec moussage qui résulte de l'ébullition d'eau dans un réservoir réchauffé non en feu et qui consiste en une éjection avec plus ou moins de force d'une certaine quantité d'hydrocarbure [9].

Un exemple typique est soit la rupture d'un serpentin de vapeur de réchauffage soit le remplissage d'un réservoir en produit lourd chaud où l'eau a été mal purgée ou fissure du toit laissant entrer de l'eau.

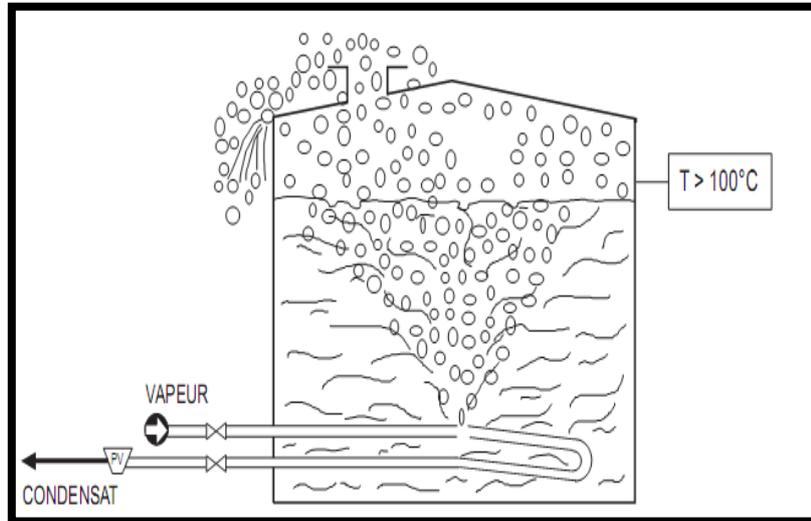


Figure 12: Phénomène du Froth-over

Conduite à tenir : fermer la vanne qui alimente le serpentin pour arrêter l'arrivée de vapeur.

III.4 Slop-over

Ce phénomène intervient durant l'extinction d'un feu impliquant des produits lourds.

Si par inadvertance, des **eaux** d'extinction sont introduites dans la nappe en feu, il s'ensuit un moussage de courte durée qui, en règle générale, provoque le débordement du contenu sans projection violente[10].

III.5 UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)

Explosion d'un nuage de gaz en atmosphère libre.

Un UVCE est une explosion d'un nuage de vapeur provoquée par l'inflammation d'un nuage de gaz/vapeur inflammable mélangé avec de l'air dans un environnement ouvert (par exemple à l'air libre).

L'UVCE génère des effets thermiques et des effets de pression. Les dangers d'explosion et d'incendies peuvent être présents simultanément[11].

III.6 Les feux de nappe

III.6.1 Définition

Le feu de nappe résulte de la combustion d'un liquide inflammable. Ce phénomène résulte de la présence simultanée d'une nappe de liquide inflammable en contact avec l'air portée à une température supérieure à son point éclair et d'un point chaud (étincelle, flamme nue, métal incandescent, etc.)[12].

III.6.2 Les différents cas de feu de nappe

Selon la géométrie de la nappe on peut distinguer le **feu d'un réservoir** lorsque le feu est contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir et le **feu de cuvette de rétention** lorsque l'extension de la nappe peut être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage.

On distingue aussi le **feu de flaque libre** en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie, l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible[13].

III.6.3 Description du phénomène

D'une manière générale le phénomène de combustion d'un produit concerne les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables. La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse de la zone qualifiée de flamme. Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammable[14].

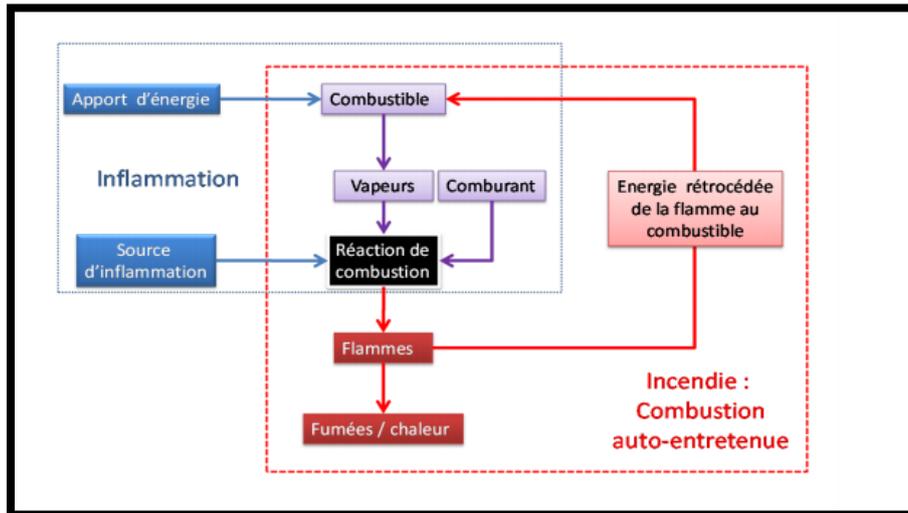


Figure 13: Mécanisme de la combustion auto-entretenue

Le feu de feu nappe est donc un phénomène de combustion auto-entretenue, Quel que soit l'état du combustible en présence, il se fait à l'état gazeux.

III.6.4 Origines de la nappe

La nappe de liquide inflammable résulte fréquemment d'une fuite, plus ou moins importante. Il est à noter que le point chaud, s'il est maintenu suffisamment longtemps, peut initier l'incendie d'un liquide dont la température est inférieure au point éclair : le point chaud en lui-même peut porter localement le liquide à une température supérieure à son point éclair, démarrer l'incendie qui se généralise ensuite à toute la nappe[15].

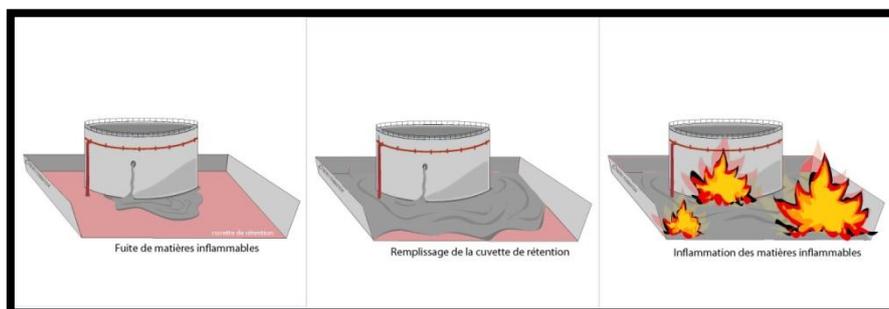


Figure 14: Feu de cuvette à l'origine d'une fuite

III.6.5 Exemple réel d'un incendie [16]

Date et lieu	7 Octobre 1998 Shell Berre (raffinerie) à Berre 13
Produit et causes	Gas-oil utilisé pour le nettoyage de la colonne de distillation sous vide Perte de confinement d'une tuyauterie située après un débitmètre
Conséquences	violent incendie, maîtrisé en 1h30 ; les flammes du foyer initial ont léché les faisceaux situés à l'aplomb contenant des hydrocarbures ; ceux-ci se sont percés et les hydrocarbures ont pris feu, générant ainsi un deuxième incendie sur le plancher de la structure supérieure. Très gros dégâts matériels ; il est prévu un arrêt de 3 mois de la distillation et 5 mois de reconstruction de la partie sous vide. pas de personnes touchées. Pas d'impact environnemental; les eaux d'extinction ont été dirigées vers un bassin tampon
Niveau G/P	G2/P2
Analyse des dysfonctionnements ayant conduit à l'accident/incident	La perte de confinement serait due à un phénomène d'érosion/corrosion par turbulence d'écoulement de fluide, et aurait eu lieu juste après le redémarrage d'une pompe. Sanctions éventuelles
Sanctions éventuelles	Non
Mesures correctives Par arrêté préfectoral complémentaire	mesures supplémentaires de sécurité pour les interventions de reconstruction qui se dérouleront alors que les autres sections de l'unité seront en opération ; mise à jour de la manuelle corrosion de l'unité, qui permet de définir le plan d'inspection.

Tableau 3: Exemple d'un incendie

III.7 BLEVE : « Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion » « Explosion due à l'expansion des vapeurs d'un liquide en ébullition »

III.7.1 Définition du BLEVE

Le 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.

Suite à la décompression rapide, une ébullition extrêmement violente et une vaporisation quasi instantanée d'une partie du liquide entraîne des ondes de pression semblables à une explosion.

Cela concerne donc l'ensemble des liquides à l'ébullition sous pression. Par abus de langage, le terme BLEVE a été associé aux accidents survenant sur des réservoirs contenant des gaz liquéfiés inflammables[17].

III.7.2 Produits concernés

Il s'agit des gaz liquéfiés combustibles tels que:

- GPL (propane, butane)
- propylène
- butène
- acétylène
- ammoniac
- CVM (chlorure de vinyle monomère)
- oxyde de propylène
-

Les gaz liquéfiés non combustibles (CO_2 , N_2 , O_2 , Cl_2 , Hélium,) et l'eau à l'équilibre liquide-vapeur peuvent être aussi sujets au BLEVE[17].

III.7.3 Equipements concernés

Le BLEVE concerne les équipements aériens contenant ces gaz liquéfiés sous pression :

- stockages fixes : citernes, sphère
- engins de transport : camions, wagons, navires
- tuyauteries
- bouteilles d'échantillon, bouteilles petit vrac, ...

Les réservoirs cryogéniques de gaz liquéfiés ne sont donc pas sujets au BLEVE car, rarement à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et de plus protégés :

- par le calorifuge "froid" lorsqu'ils sont métalliques
- par l'enveloppe extérieure en béton précontraint

Les chaudières et en particulier les ballons supérieurs sont aussi concernés par le BLEVE[17].

III.7.4 Origines du BLEVE

Les principales causes d'un BLEVE sont [18]:

- **Agression mécanique:** Un réservoir ayant subi une corrosion est plus faible qu'un réservoir neuf. L'impact mécanique ne peut conduire qu'à la formation d'un BLEVE « froid », car il n'y a pas d'échauffement du réservoir qui pourrait augmenter la température du GPL contenu au-delà de la TLS.

- **Agression thermique:** le feu de torche, feu de nappe ou hausse de la température durant l'été peut causer un "BLEVE" si votre réservoir de GPL est mal entretenu. Cette agression peut engendrer les deux types de BLEVE, En théorie, les réservoirs sans soupape ne peuvent conduire qu'à un BLEVE « chaud », car à la pression d'éclatement du réservoir (de l'ordre de 20 à 30 bars) la température est supérieure à la TLS.

- **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. Dans ce cas, le phénomène est un BLEVE « froid »

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

* sans soupape

Tableau 4: Les différents types de BLEVE à différent nature de réservoir

III.7.5 Déroulement du BLEVE : gaz liquéfiés combustibles

Le schéma ci-dessous illustre l'initiation du phénomène de BLEVE sur une sphère de propane, juste avant l'explosion[17].

Conditions normales de service : $T \cong 25^{\circ}\text{C}$ $P \cong 8,2 \text{ bar rel.}$

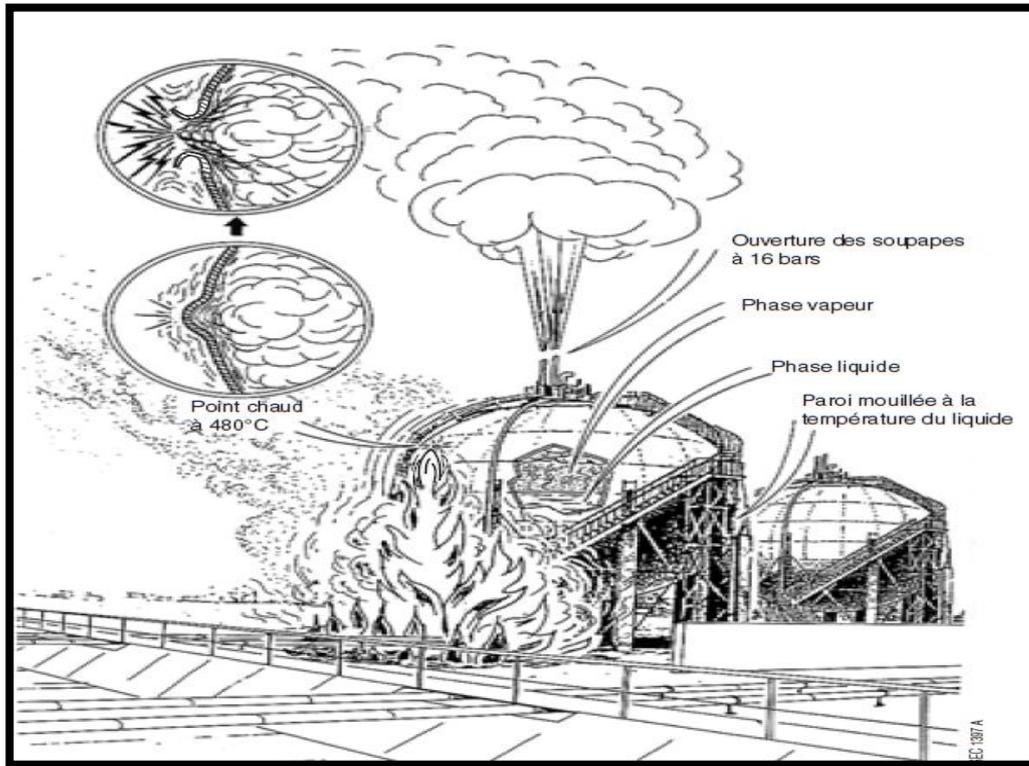


Figure 15: Déformation de la paroi non mouillée du réservoir et initiation du BLEVE (cas du propane)

III.7.5.1 Scénario

A. Incendie - Montée en pression

- Fuite sur la sphère elle-même ou sur un équipement voisin.
- Nuage de gaz combustibles et inflammation sur un point d'ignition.
- Feu sous la capacité sous forme de flamme.
- Dans la sphère, la température monte, la pression augmente comme la **tension de vapeur** du propane.
- La pression atteint la pression de début d'ouverture des soupapes à 16 bars.
- Le débit de chaleur dû à l'incendie apporte **la chaleur latente** de vaporisation au liquide dont une partie se vaporise et est évacuée aux soupapes.
- La pression atteint au maximum 110 % de la pression de début d'ouverture si le feu est le cas dimensionnant, puis reste constante.
- La température du métal mouillé par le liquide reste à peu près constante ($\cong 55^{\circ}\text{C}$).
- Baisse du niveau liquide due à la vaporisation[17].

B. Perte de la résistance mécanique – Rupture

- La température du métal non mouillé augmente rapidement (par rayonnement des flammes au sol ou aux soupapes).

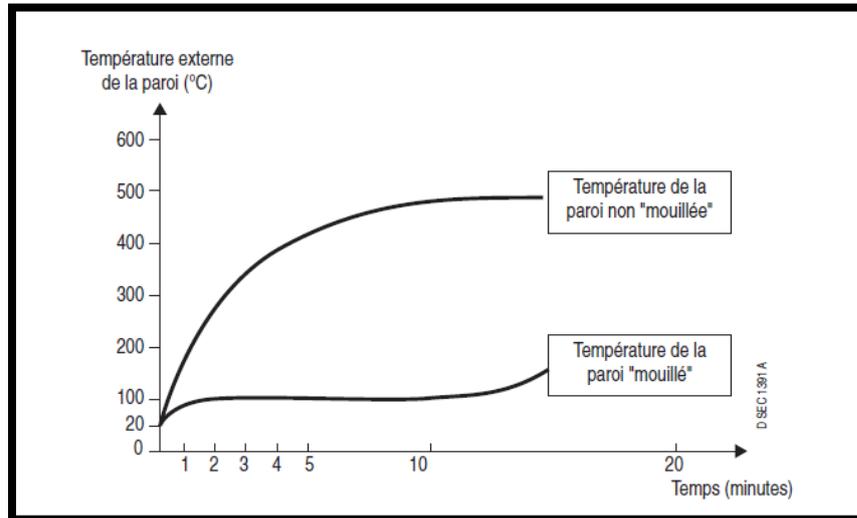


Figure 16: Évolution de la température de la paroi en fonction du temps

- La limite élastique et la résistance à la rupture du métal diminuent.

Exemple : acier A 52

Température (°C)	20	100	300	400	500
Limite élastique (N/mm ²)	315	300	215	180	150

Tableau 5: Exemple: acier A 52

- Après 10 à 20 minutes, formation d'une **boursouffure** par étirement du métal.
- Éclatement de la **boursouffure** et rupture du réservoir avec projection de fragments[17].

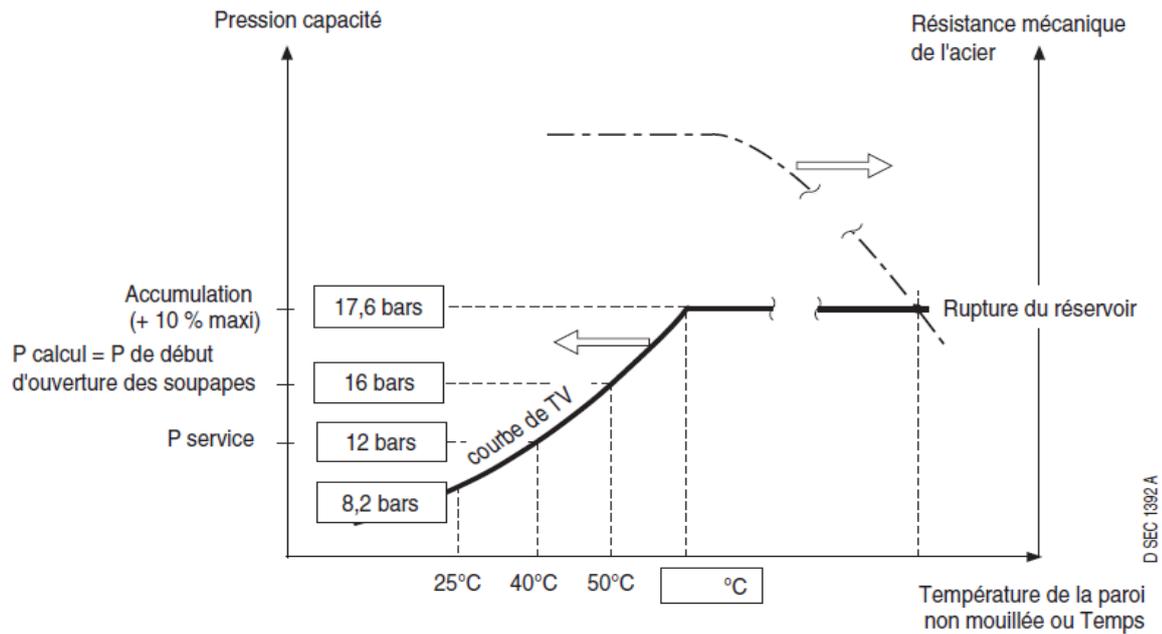


Figure 17: Graphe sur l'évolution de la pression et de la résistance du métal avec la température (échelles non linéaires)

C. Explosion - Boule de feu

- La soudaine décompression, jusqu'à la pression atmosphérique, entraîne :
 - des ondes de surpression
 - la brusque vaporisation d'une partie du propane liquide ($\cong 1/3$) sous forme d'aérosol qui s'enflamme et provoque une boule de feu.
- La chaleur de vaporisation est apportée par les flammes et par le propane liquide restant dans la sphère dont la température atteint la température d'ébullition normale ($\cong -40^\circ\text{C}$).
- La boule de feu croît rapidement, s'élève dans les airs puis se fragmente et s'éteint après consommation du combustible.

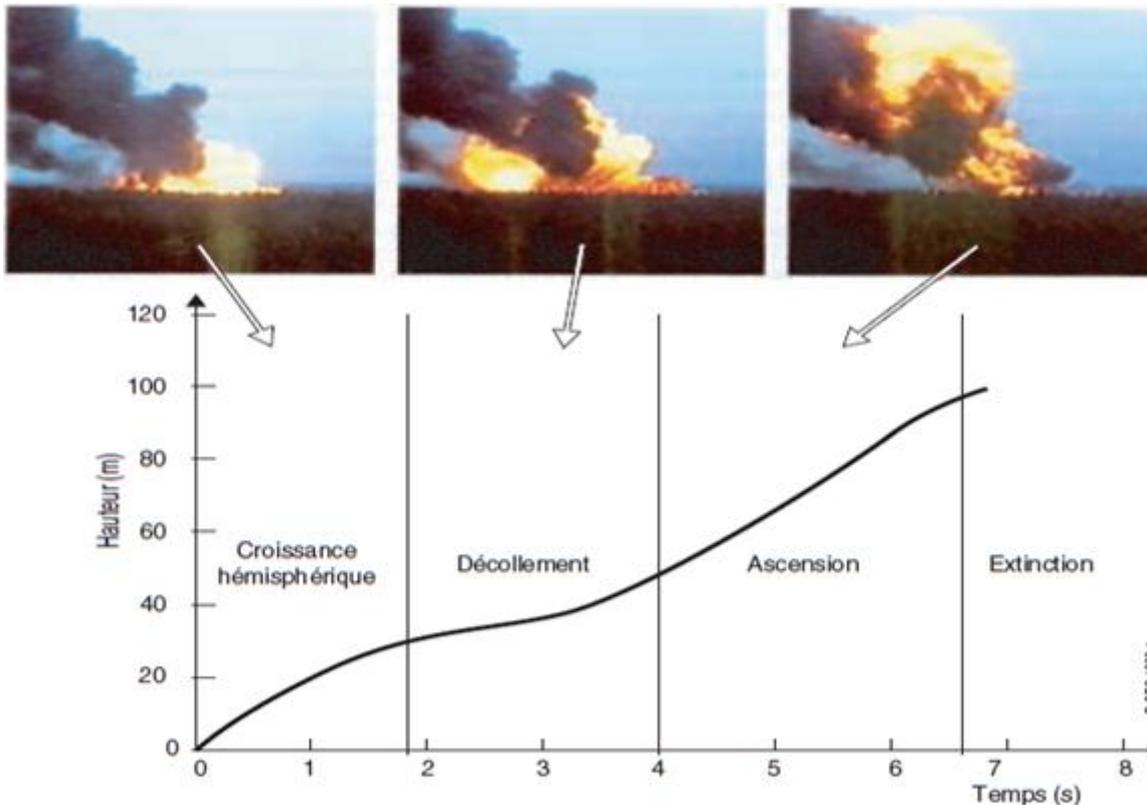


Figure 18: Évolution de la hauteur du centre de la boule de feu en fonction du temps

- La radiation de la boule de feu est suffisante pour enflammer tout combustible ordinaire et causer des brûlures mortelles aux personnes par effets thermiques.

Par ailleurs, du liquide enflammé, retombe au sol.

- L'éclatement du réservoir entraîne la projection de fragments appelés "missiles"[17].

III.7.6 Les conditions nécessaires au BLEVE

Équilibre liquide-vapeur et température limite de surchauffe

Avant rupture du réservoir il y a théoriquement équilibre liquide-vapeur.

Le liquide est à sa température d'ébullition (à la pression interne). Il y a formation de bulles sur les sites actifs que sont les impuretés et les interfaces avec les solides : paroi et équipements internes du réservoir. Ces sites sont appelés sites de nucléation ou "nucleïis".

La vapeur est saturée. Mais, lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation dans le liquide, la température d'ébullition peut être dépassée sans qu'il y ait ébullition : le liquide est surchauffé.

Il existe cependant une limite de température, à une pression donnée, au-delà de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide, même en l'absence de sites de nucléation.

Cette limite est la température limite de surchauffe (T.L.S) appelée encore "température de nucléation spontanée".

La droite passant par la température critique et la température limite de surchauffe est appelée droite limite de surchauffe. Elle détermine le domaine au-delà duquel la nucléation spontanée est possible[19].

La figure ci-dessous illustre ce phénomène.

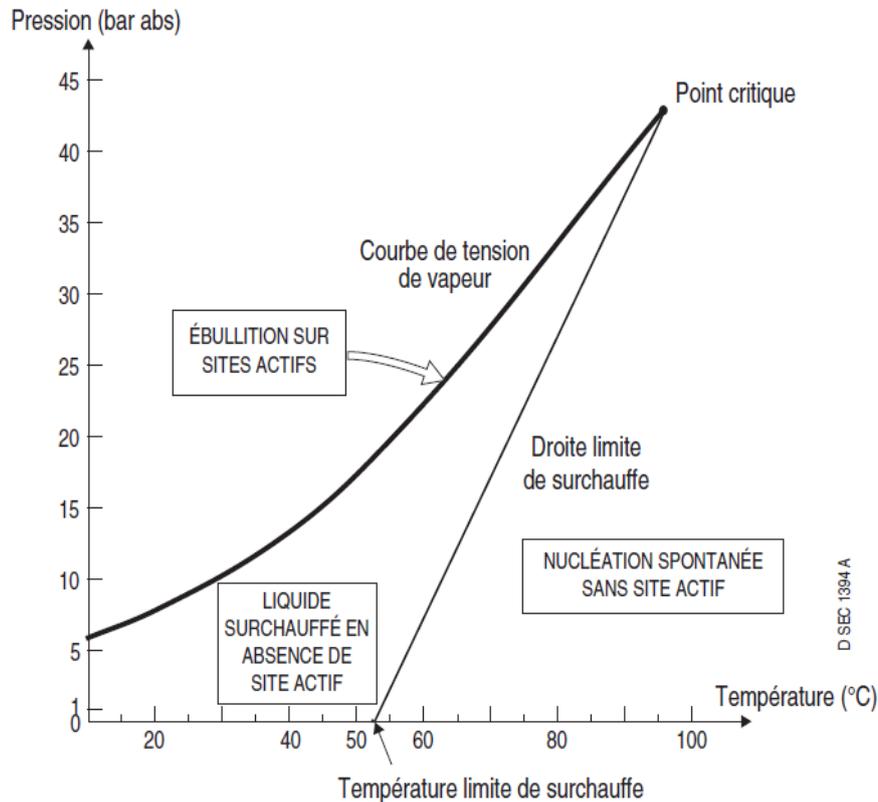


Figure 19: Courbes de tension de vapeur et droite limite de surchauffe

On notera que la température limite de surchauffe d'un produit à pression donnée est le point vérifiant

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_T = 0$$

Il n'existe toutefois pas d'équation d'état avérée décrivant le comportement d'un liquide surchauffé.

On pourra retenir, de façon suffisante pour la pratique, la formule de Reid établie à partir de l'équation d'état de Redlich-Kwong, qui donne la température limite de surchauffe à la pression atmosphérique en fonction de la température critique du produit :

$$TLS = 0,895 T_c \quad (K)$$

Avec :

TLS : température limite de surchauffe en K

Tc : température critique en K

III.7.7 Les différents types de BLEVE

III.7.7.1 BLEVE « Froid »

Le BLEVE se produit avec un réservoir qui contient un liquide sous pression, liquide qui, s'il n'était pas sous pression, serait à l'état gazeux ; le réservoir n'est jamais complètement rempli, il y a un «ciel gazeux» qui maintient cette pression. Le BLEVE survient lorsque le réservoir qui contient le liquide se rompt. Cette rupture peut être due à un choc (**accident de la circulation d'un camion-citerne, déraillement d'un wagon-citerne, impact**), à une mauvaise manipulation (**sur-remplissage du réservoir**), ou à une fragilisation (**corrosion, gel**).

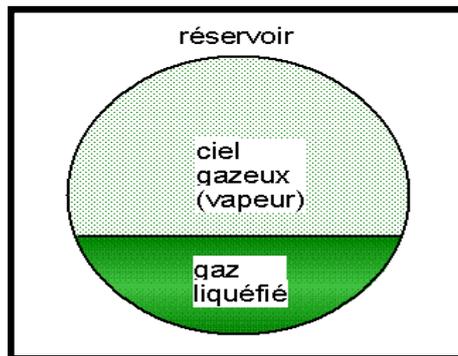


Figure 20: Réservoir rempli d'un gaz liquéfié avec un ciel gazeux sous pression

Donc, une fissure se crée. Au niveau de cette fissure, la pression de l'air, qui était à pression atmosphérique (environ 1 bar), passe brusquement à la pression du réservoir (typiquement plusieurs dizaines à centaines de bar), il y a donc une première onde de surpression, un «bang».

Puis, le gaz s'échappe par cette fissure, sous la forme d'un jet. La pression baisse donc rapidement dans le réservoir, le liquide se met à bouillir, non pas sous l'effet de la chaleur, mais sous l'effet de la chute de pression. Puisque le liquide bout, il se transforme rapidement en gaz, et la pression augmente de manière très importante dans le réservoir. Par ailleurs, le jet de gaz peut entraîner des gouttelettes (aérosol), qui viennent gêner l'échappement du gaz et contribuent ainsi à la montée en pression. Cette **dépressurisation** catastrophique provoque la propagation de la fissure puis la rupture totale du réservoir avec une deuxième onde de surpression[20].

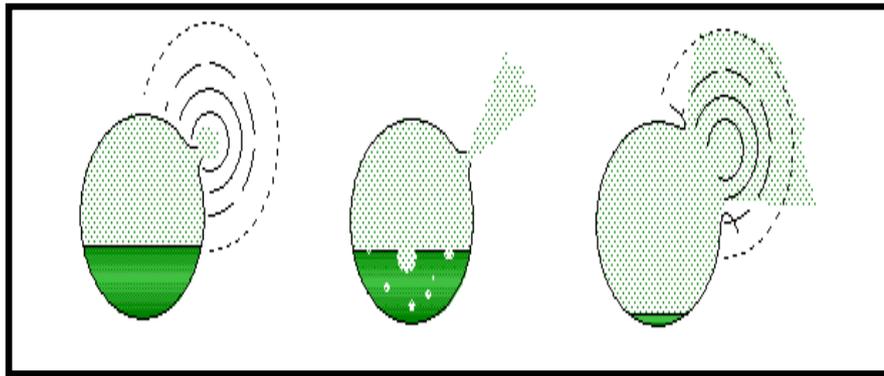


Figure 21: Deux de pression par détente de ciel gazeux puis par ébullition violente

III.7.7.2 BLEVE « Chaud »

Dans les cas les plus graves, la rupture du réservoir est due à un échauffement par un feu extérieur. Sous l'effet de la chaleur, le liquide dans le réservoir se met à bouillir, la pression dans le réservoir augmente ; le gaz s'échappe alors par une valve de surpression (soupape de sécurité), pouvant produire à cette occasion un jet de feu. Le niveau de liquide baisse donc dans le réservoir.

Le gaz conduisant bien moins la chaleur que le liquide, la partie de la paroi du réservoir qui se trouve au-dessus du liquide s'échauffe de manière très importante (dans la partie basse, la chaleur de la paroi est évacuée de l'autre côté par la convection du liquide). La paroi surchauffée s'affaiblit, puis finit par se rompre, provoquant l'accident.

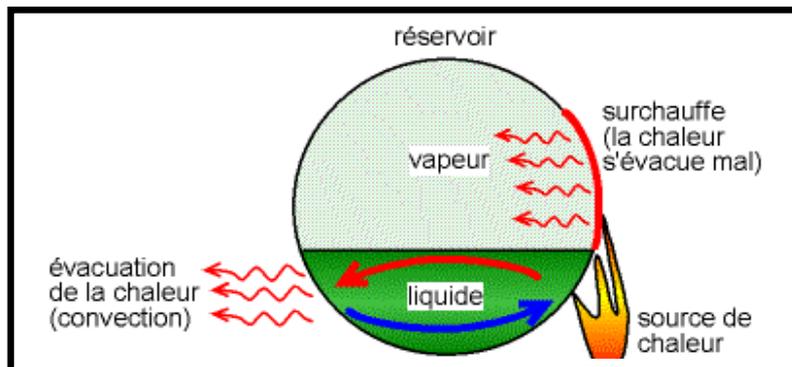


Figure 22: Mécanisme de surchauffe et de rupture du réservoir – évacuation de la chaleur par convection et par rayonnement.

Notons aussi qu'avant la rupture du réservoir, il n'y a que du gaz dedans et pas d'air, il n'y a donc pas de combustion dans le réservoir ; le gaz ne brûle donc qu'après être sorti. Si le gaz n'est pas combustible, on aura juste l'onde de pression provoquée lors de la rupture du réservoir, et un jet de gaz brûlant[20].

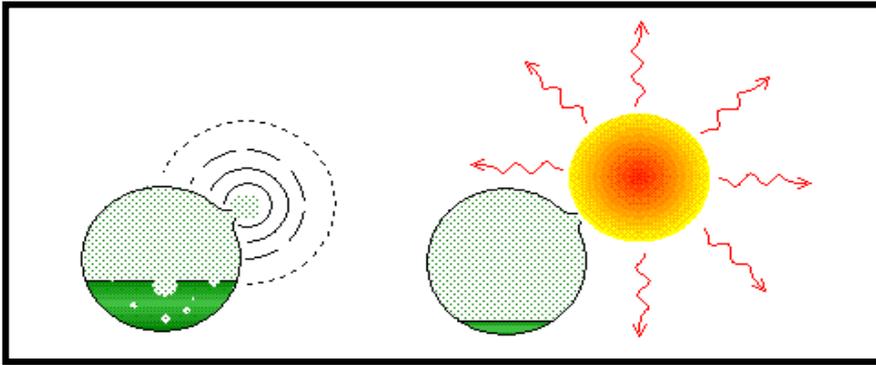


Figure 23: Rupture de réservoir-ondes de surpression avec projection de débris puis boule de feu créée par la combustion du mélange gaz/air avec rayonnement intense

La notion de BLEVE froid ou chaud se réfère uniquement à la température limite de surchauffe (TLS) du produit :

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

III.7.7.3 Comparaison synthétique des BLEVE « froids » et « chauds » [19]

	BLEVE « chaud »	BLEVE « froid »
Instant initiaux	<ol style="list-style-type: none"> 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 réservoir du fait de l'ébullition 6. Ruine du réservoir 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Liquide en dessous de la limite de surchauffe 2. Ruine du réservoir due à des effets essentiellement mécaniques
Durée entre la rupture initiale et lerejet à caractère explosif	Quelques dixièmes de secondes après la formation d'une fissure de 20 cm	Quelques centièmes de secondes
Géométrie du réservoir après le BLEVE	Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles	Le réservoir est aplati au sol avec émission possible de missiles
Mode de rejet	Tout ou majeure partie du liquide est vaporisée instantanément	Une partie du liquide se vaporise instantanément, le reste est dispersé sous forme de gouttelettes
Boule de feu	Boule de feu classique ascendante	Nuage d'aérosol en feu au niveau du sol avec une boule de feu ascendante
Effets de surpression	Le bruit de l'onde de choc suggère d'importantes surpressions	Apparaissent relativement réduits d'après le niveau sonore de ce type de BLEVE
Projectiles	De grandes pressions de rupture ont le potentiel d'envoyer des projectiles sur d'importantes distances	Les faibles pressions de rupture limitent probablement la distance parcourue par les projectiles
Conditions nécessaires	Liquide chaud et rupture locale afin de déclencher une explosion par surchauffe	Réservoir peu résistant conduisant à sa ruine totale

Tableau 6: Tableau d'une comparaison entre un BLEVE froid et un BLEVE chaud

III.7.8 BLEVE des gaz liquéfiés non combustibles

La rupture brusque de la capacité, suite à une perte ou à la résistance mécanique peut être due [17] :

- à un excès de pression dû à un incendie voisin entraînant une rupture ductile du métal sous l'action de la chaleur
- à un excès de pression à la température normale du procédé (soupapes ou disques de rupture isolés ou absents) dû à un sur remplissage par exemple, avec rupture ductile
- à une diminution de l'épaisseur du métal par corrosion
- à une perforation par l'impact d'un missile

III.7.9 Modélisation des conséquences du BLEVE

Le BLEVE produit les conséquences suivantes[21]:

- **Une Boule de Feu:** Si le contenu du réservoir est inflammable, il y a alors ignition de la substance lors du BLEVE et une boule de feu en résulte, des essais effectués sur des réservoirs contenant du liquide inflammable sous pression ont créés des boules de feu.
- **Rayonnement thermique :** Si une boule de feu est générée par le BLEVE, un important rayonnement thermique en découlera. Les intervenants devront donc respecter une certaine distance minimale face au réservoir afin d'être épargnés par la radiation. Cette distance a été établie à 4 fois le rayon de la boule de feu.
- **Onde de Choc (Détonation):** Le BLEVE étant une explosion, il est accompagné d'une détonation et d'un important déplacement d'air. Le seul moyen de ne pas être affecté par ce souffle est la distance. En respectant les normes minimales d'approche, les intervenants demeurent hors de portée des effets d'une détonation.
- **Projection de Débris:** La plus dangereuse des conséquences d'un BLEVE est la projection des débris. Le seul constat que les tests ont pu établir face à la projection des débris est qu'ils sont propulsés majoritairement vers les extrémités du réservoir. Cette projection est donc imprévisible et peut parfois atteindre des proportions énormes. Lors des essais, des débris ont atterris à plus de 230 mètres des lieux du BLEVE. Lors d'un incident survenu au Texas, des débris ont même été retrouvés à plus d'un kilomètre.

III.7.10 Modélisation des effets du BLEVE

III.7.10.1 Effets Thermiques

Les effets thermiques sont liés au rayonnement thermique de la boule de feu et, le cas échéant, de la combustion de la flaque au sol. La durée d'exposition au rayonnement, qui dépend de la composition, de la quantité et de la température du produit présent, est de courte durée (d'environ quelques secondes pour un petit camion-citerne à environ quelques dizaines de secondes pour une sphère de 1000 m³).

Le rayonnement suit la cinétique du phénomène. Pendant la phase d'inflammation du nuage et décroissance de la boule de feu, le flux thermique atteint rapidement le maximum de son intensité, pour décroître (au niveau du sol) **à mesure que la boule de feu s'élève dans le ciel, avant de chuter rapidement quand la boule de feu se résorbe.**

L'estimation des effets sur l'homme en cas d'une exposition à un flux thermique est complexe car dépendant de très nombreux facteurs, dont notamment [19]:

- La nature
- L'importance des surfaces brûlées
- L'âge des personnes exposées
- Les obstacles au rayonnement pouvant constituer autant d'abris
- La rapidité d'accès à des soins
- Les effets thermiques radiatifs d'une boule de feu formée lors d'un BLEVE

Effet sur l'Homme	Onde de surpression (mbar)	Flux thermique
Seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'Homme	20	/
Seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine (blessure aux tympans)	50	3 kW/m ²
Seuils des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers grave pour la vie humaine (hémorragie pulmonaire)	140	5 kW/m ²
Seuils des effets létaux correspondant à la zone des dangers très grave pour la vie humaine	200	8 kW/m ²

Tableau 7: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression thermique sur l'Homme

Effet sur les structures	Flux thermique (kW/m ²)
Seuil des destructions significatives de vitres	5
Seuil des effets dominos et correspondant à un seuil de dégâts graves sur les structures	8
Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant à un seuil de dégâts très graves sur les structures, hors structures béton	16
Seuil de tenue de béton pendant plusieurs heures et correspondant à un seuil de dégâts très graves sur les structures béton	20
Seuil de ruine de béton en quelques dizaines de minutes	200

Tableau 8: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques sur les structures

III.7.10.2 Effets de surpression

La pression est une force par unité de surface susceptible d'induire des efforts de flexion ou de cisaillement dans les structures, éventuellement de compression pour le corps humain. Une onde de pression peut également propulser des projectiles [19].

Effets sur les structures	Onde de surpression (mbar)
Seuil des destructions significatives de vitres	20
Seuil des dégâts légers sur les structures	50
Seuil des dégâts graves sur les structures	140
Seuil des effets dominos	200
Seuil des dégâts très graves sur les structures	300

Tableau 9: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression sur les structures

III.7.10.3 Effets missiles

Les BLEVE « chauds » et les BLEVE « froids » produisent des effets missiles. Le retour d'expérience montre que lors d'un BLEVE, la rupture du réservoir produit un nombre limité de fragments, en général moins de quatre ou cinq. Des fragments peuvent être projetés à des distances très élevées (plusieurs de mètres), car leur impulsion initiale, communiquée par la vaporisation quasi-instantanée du liquide, est très grande[19].

III.7.11 Quelque BLEVE connus dans le monde [16]

Date et lieu	production	Évènement	Victime		Quantité (Kg)
			Morts	Blessé	
28/6/1959 MELDRIN (USA)	GPL	Déraillement d'un train au voisinage d'une zone de loisir	23	-	-
12/11/1970 HUDSON (USA)	GPL	Arrachement de flexible par camion quittant le poste de chargement sans être déconnecté	6	-	432000
01/11/2012 RIYAD (ARABIE SAOUDITE)	GPL	déraillement d'un camion citerne de butane	22	133	-
14/04/2009 PEROU NC	GPL	Une collision entre un autocar transportant une trentaine de passagers et un camion-citerne de gaz liquéfié	22	6	-
19/12/1984 SAN JURANICO (MEXICO)	GPL	Rupture d'une canalisation qui alimente une sphère de GPL, explosion de toutes les sphères sauf les deux grosses	500	7000	12000

Tableau 10: Quelques exemples des BLEVE

III.8 Conclusion

Le développement anormal dans le déroulement d'une activité industrielle, entraînant un danger grave, immédiat ou différé, pour les travailleurs, la population ou l'environnement à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation, telle que La pollution de l'air, des eaux de surface, la contamination des sols, les pertes d'exploitation qui sont souvent économique irrémédiables.

Pour cela il faut mettre en œuvre des démarches à suivre obligatoirement concernant la prévention surtout ainsi que l'intervention au cas des défaillances ou des dégâts.

IV

Calculs Du BLEVE Et Feu De Nappe

IV.1 Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties, dans la première nous allons effectuer des calculs de feu de nappe par deux méthodes, le point source et le modèle de radiation afin d'estimer le flux thermique reçu.

La deuxième est consacrée au calcul du BLEVE selon les méthodes classique (TNO, TRC et UFIP) et les méthodes numériques (ALOHA et PHAST) sur une sphère et un camion-citerne rempli de butane au niveau de la zone de stockage de la raffinerie d'Alger.

IV.2 Modélisation des conséquences d'un feu de nappe

Les feux de nappe tendent à être localisés en effet et sont concernées principalement en établissant le potentiel pour des effets domino et des zones de sécurité du personnel, plutôt que pour le risque de la communauté. Les effets primaires de tels feux sont dus au rayonnement thermique de la source de flamme. Les issues de l'inter tank et interplantent l'espace, l'isolation thermique, les spécifications de mur coupe-feu, etc., peuvent être adressées sur la base des analyses spécifiques de conséquence pour une gamme des scénarios possibles du feu de nappe.

IV.2.1 Description de la technique des modèles de feux de nappe

Des modèles de feu de nappe sont composés de plusieurs sous-modèles. Un choix de ces derniers considère:

- ❖ la quantité brûlée
- ❖ taille de nappe
- ❖ la géométrie de flamme, la taille, l'inclinaison.
- ❖ la puissance émise par la surface de flamme.
- ❖ facteur de vue de la géométrie en ce qui concerne la source de réception
- ❖ Transmissivité atmosphérique
- ❖ flux thermique reçu

IV.2.2 Modèle théorique

IV.2.2.1 La quantité brûlée

Pour calculer la quantité brûlée il faut d'abord passé par le taux de diminution de niveau du liquide qui est donnée par la relation suivante [22]:

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad (\text{IV.1})$$

\dot{y}_{\max} : est le taux vertical de la diminution de niveau du liquide (m/s),

ΔH_c : est la chaleur nette de la combustion (Kj/Kg),

ΔH^* : est la chaleur modifiée de la vaporisation au point d'ébullition du liquide donné par l'Eq. (IV.2)(KJ/Kg).

Remarque 1 : Les taux verticaux typiques sont : $0.7 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$ (essence) à $2 \cdot 10^{-2} \text{m/s}$ (GPL).

La chaleur modifiée de la vaporisation inclut la chaleur de la vaporisation, plus un ajustement pour chauffer le liquide de la température ambiante, T_a , au point d'ébullition du liquide, T_{BF} .

$$\Delta H^* = \Delta H_V + \int_{T_a}^{T_{BF}} C_p dT \quad (\text{IV.2})$$

ΔH_V : est la chaleur de la vaporisation du liquide à la température ambiante ((KJ /Kg)

C_P : est capacité de chaleur du liquide (KJ /Kg K).

La quantité brûlée est déterminée en multipliant le taux brûlant vertical par la densité du liquide. Si les données de densité ne sont pas disponibles, le taux de masse brûlante de la piscine est estimé près:

$$m_B = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_C}{\Delta H^*} \quad (IV.3)$$

m_B : est la quantité brûlée (kg/m² s).

Remarque 2 : Les valeurs typiques pour la quantité brûlée pour les hydrocarbures sont dans la gamme de **0,05 kg/m²s** (essence) à **0,12 kg/m² s** (GPL)

IV.2.2.2 La taille de nappe

Le diamètre maximum de nappe est déterminé par l'équation (IV.4) [22] :

$$D_{MAX} = 2 \sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \dot{y}}} \quad (IV.4)$$

D_{max} : est le diamètre d'équilibre de la nappe (m),

\dot{V}_L : est le flux volumique du liquide (m³/s);

IV.2.2.3 La géométrie de la flamme

a- La taille de la flamme (hauteur)

Beaucoup d'observations des feux de nappe prouvent qu'il y a un rapport approximatif entre la taille de flamme et le diamètre [23]:

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (IV.5)$$

H : est la taille évidente de flamme (m) ;

D : est le diamètre équivalent de piscine (m) ;

m_B : est la quantité brûlée (kg/m² s) ;

ρ_a : est la densité d'air (1,2 kg/m³ à 20°C et à 1 atmosphère.) ;

g : est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²).

Si on considère l'effet de vent l'équation (IV.5) devienne :

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.254} u_{10}^{*-0.044}$$

* u_{10} : est la vitesse du vent adimensionnelle, déterminé comme suit :

$$u_{10}^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g m_B D}{\rho_v}\right)^{1/3}} \quad (\text{IV. 6})$$

U_w : est la vitesse de vent mesurée à une taille de 10 m (m/s)

ρ_v : est la densité de vapeur au point d'ébullition de liquide (kg/m³).

b- Inclinaison de la flamme

L'inclinaison de la flamme est déterminée suivant les valeurs de u^* comme suit [23]:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= 1 & \text{Si } u^* &\leq 1 \\ \cos \theta &= \frac{1}{\sqrt{u^*}} & \text{Si } u^* &> 1 \end{aligned}$$

Où u^* est la vitesse de vent de non-dimensionnel donnée par Eq (IV.6)

la flamme a une inclinaison d'angle θ repéré par rapport à la verticale comme indiquée sur le schéma suivant :

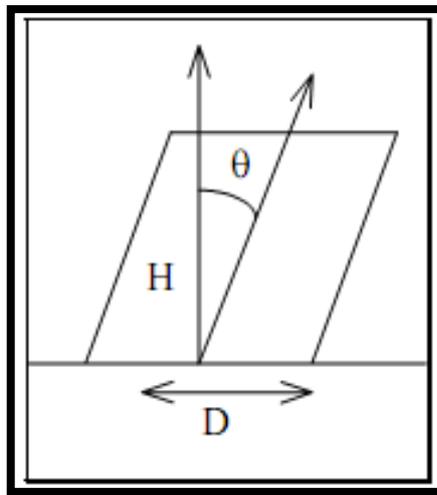


Figure 24: Inclinaison de la flamme sous l'effet du vent

IV.2.2.4 La puissance émise

Deux approches disponibles pour estimer la puissance émise extérieure: le « point source » et « solidplume radiation ».

a- Le modèle de « point source »

La puissance émise extérieure par unité de surface est estimée en utilisant la méthode de fraction de rayonnement comme suit[22]:

1. Calculer la puissance totale de combustion (basée sur le taux brûlant et le secteur de piscine total).
2. Multiplier cette puissance par la fraction de rayonnement pour déterminer la puissance totale rayonnée.
3. Déterminer la superficie de flamme (généralement utilisation seulement le secteur de côté de cylindre).
4. Divisez la puissance rayonnée par la superficie de flamme.

b- Le modèle de « radiation»

la puissance émise est estimée par l'équation suivante[22]:

$$E_{av} = E_m e^{-SD} + E_s (1 - e^{-SD}) \quad (IV.7)$$

E_{av} : est la puissance émissive moyenne (kW/m²).

E_m : est la puissance émissive maximum des taches lumineuses (approximativement 140kW/m²).

E_s : est la puissance émissive de la fumée (approximativement 20 kW/m²).

S : est un paramètre expérimental (0.12 m⁻¹)

D : est le diamètre de la nappe (m)

IV.2.2.5 Le facteur géométrique de vue

$$F_p = \frac{1}{4\pi x^2} \quad (IV.8)$$

F_p : est le facteur de vue (m⁻²).

X : est la distance du point de source à la cible (m)[22].

IV.2.2.6 Le flux thermique reçu

Le calcul du flux thermique reçu dépend du modèle de rayonnement choisi. Si le modèle « point source » est choisi, alors le flux thermique reçu est déterminé à partir du taux d'énergie totale de combustion[22]:

$$E_r = \tau_a Q_r F_p = \tau \eta m_B \Delta H_c A F_p \quad (IV.9)$$

Si le modèle « solid Plume radiation » est choisi, le flux reçu est basé sur des corrélations du flux émis extérieur:

$$E_r = \tau_a \Delta H_c F_{21} \quad (\text{IV.10})$$

E_r : est le flux thermique reçu de la cible (kJ/m^2) ;

τ_a : est la transmissivité atmosphérique ;

Q_r : est le taux total d'énergie de la combustion (kJ/h) ;

F_p : est le facteur de vue du modèle de « point source » (m^{-2}) ;

η : est la fraction de l'énergie de combustion rayonnée, en général 0,15 à 0,35 ;

m_b : est le taux de masse brûlée, ($\text{Kg/m}^2 \text{ s}$) ;

ΔH_c : est la chaleur de la combustion pour le liquide brûlant (kJ/Kg) ;

A : est la surface totale de la nappe (m^2) ;

F_{21} : est le facteur de vue du modèle « solidplume radiation ».

IV.2.3 Modèle pratique « Scénario: Rayonnement d'une nappe de Butane''

Soit une fuite de butane dans la conduite d'expédition vers Naftal dans la raffinerie d'Alger a Sidi Arcine, qui a un taux volumétrique de fuite égale à $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Une chaussée circulaire avec un diamètre de 27 m contient la fuite. Le feu s'enflamme sur une source d'ignition inconnue, l'incendie se développe rapidement

Dans notre étude sur le feu de nappe on va estimer le flux thermique reçu par un récepteur situé à 50 m, supposons la vitesse du vent très faible avec une humidité relative de 50 %. Pour calculer le flux thermique de feu de nappe en utilisant la méthode du point source et le modèle de rayonnement de plume de solide.

Les données sont additionnelles:

- La chaleur de la combustion du liquide : $\Delta H_c = 45700 \text{ kJ/kg}$;
- La chaleur de la vaporisation du liquide: $\Delta H_v = 362 \text{ kJ/kg}$;
- Point d'ébullition du liquide: $T_{eb} = 272,5\text{K}$;
- La température ambiante de: 298 K ;
- Densité liquide de: $\rho = 573 \text{ kg/m}^3$;
- Capacité de chaleur de liquide (constant): $C_p = 0.66 \text{ (KJ/Kg k)}$;
- La densité de l'air : $\rho_a = 1.2 \text{ Kg/m}^3$;
- La densité du butane a la température d'ébullition $\rho_v = 2,44 \text{ kg/m}^3$;
- L'accélération de la pesanteur : $g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$;

SOLUTION

IV.2.3.1 Étapes de calcul

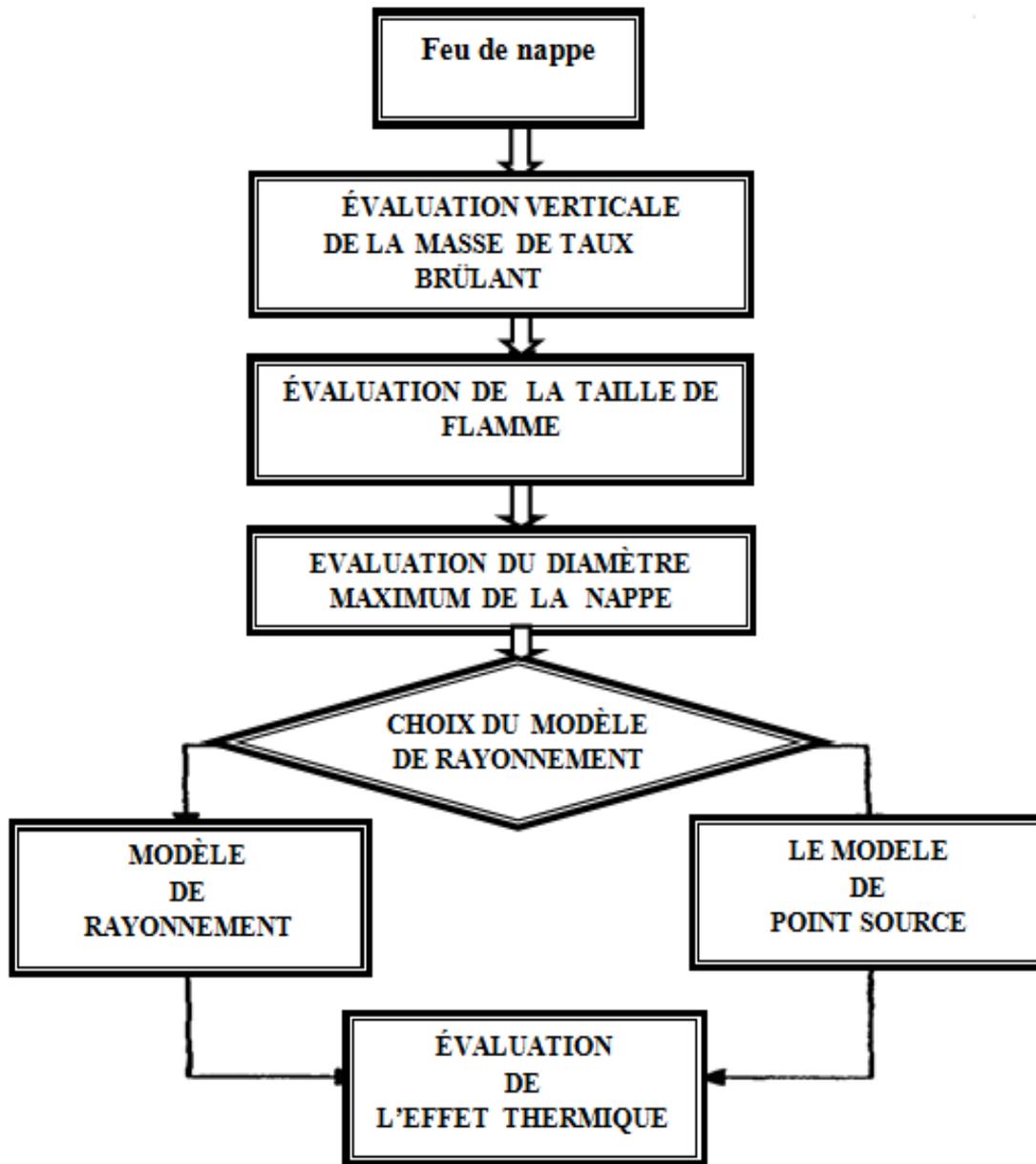


Figure 25: Le diagramme logique de calcul de rayonnement d'une nappe en feu

IV.2.3.2 La quantité brûlée

a- La chaleur de vaporisation du liquide à la température ambiante

$$\Delta H^* = \Delta H_V + \int_{T_a}^{T_{BF}} C_p dT$$

$$\Delta H^* = 362 + 0,66 \times (272,5 - 298) \Rightarrow \boxed{\Delta H^* = 345.17 \text{ kJ/kg}}$$

b- Le taux de diminution du niveau du liquide

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_C}{\Delta H^*}$$

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \times 10^{-6} \frac{45700}{345.17} \Rightarrow \boxed{\dot{y}_{\max} = 1.68 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}}$$

c- La quantité de masse brulée de piscine

$$m_{\infty} = 1 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta H_C}{\Delta H^*}$$

$$m_{\infty} = 10^{-3} \times \frac{45700}{345.17} \Rightarrow \boxed{m_{\infty} = 1.32 \cdot 10^{-1} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}}$$

d- La quantité de la masse brulée

$$m_B = \dot{y}_{\max} \times \rho$$

$$m_B = 1,68 \cdot 10^{-4} \times 573$$

$$\boxed{m_B = 9.62 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}}$$

IV.2.3.3 Le diamètre maximum de la nappe

À l'état d'équilibre est donné par l'équation :

$$D_{MAX} = 2 \sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \dot{y}}}$$

$$D_{MAX} = 2 \times \sqrt{\frac{0.1}{3.14 \times 0.000168}} \Rightarrow \boxed{D_{\max} = 27.53 \text{ m}}$$

On admet pour la boule de feu $D = 27 \text{ m}$, on aura

a- Le secteur de la nappe de feu

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow A = \frac{3,14 \times (27)^2}{4}$$

$$\boxed{A = 572.27 \text{ m}^2} \text{ taille de la flamme}$$

a- La hauteur de la flamme

Sans considération du vent, la hauteur de la flamme est calculée par la relation suivante :

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$$

$$\frac{H}{D} = 42 \times \left(\frac{0,0962}{1,2 \sqrt{9,81 \times 27}} \right)^{0,61} \Rightarrow \frac{H}{D} = 1,64$$

$$H = 1,64 \times D \Rightarrow$$

$$\boxed{H = 45,14 \text{ m}}$$

- Si on considère le vent, la formule de la hauteur de la flamme devient :

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.254} u_{10}^{*-0.044}$$

$$\text{Avec ; } u_{10}^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g m_B D}{\rho_v} \right)^{1/3}}$$

On suppose la vitesse du vent : $u_w = 10 \text{ m/s}$

La vitesse du vent adimensionnelle est :

$$u_{10}^* = \frac{10}{\left(\frac{9,81 \times 0,0962 \times 27,53}{601,26} \right)^{1/3}}$$

$$\boxed{u_{10}^* = 28.50 \text{ m/s}}$$

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.254} u_{10}^{*-0.044}$$

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{0,0962}{1,2 \times \sqrt{9,81 \times 27,53}} \right]^{0,254} 28,50^{-0,044} \Rightarrow \frac{H}{D} = 1,40$$

$$H = 1,4 \times D \Rightarrow$$

$$\boxed{H = 38,62 \text{ m}}$$

On remarque que la vitesse du vent provoque une diminution de la hauteur de la flamme.

b- Evaluation de la hauteur de la flamme en fonction de la vitesse du vent

Vitesse du vent (m/s)	10	20	30	40	50	60	70	80

Hauteur de la flamme (m)	38,00	36,86	36,21	35,75	35,40	35,12	34,88	34,68
--------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tableau 11: La vitesse de vent en fonction de la hauteur de la flamme

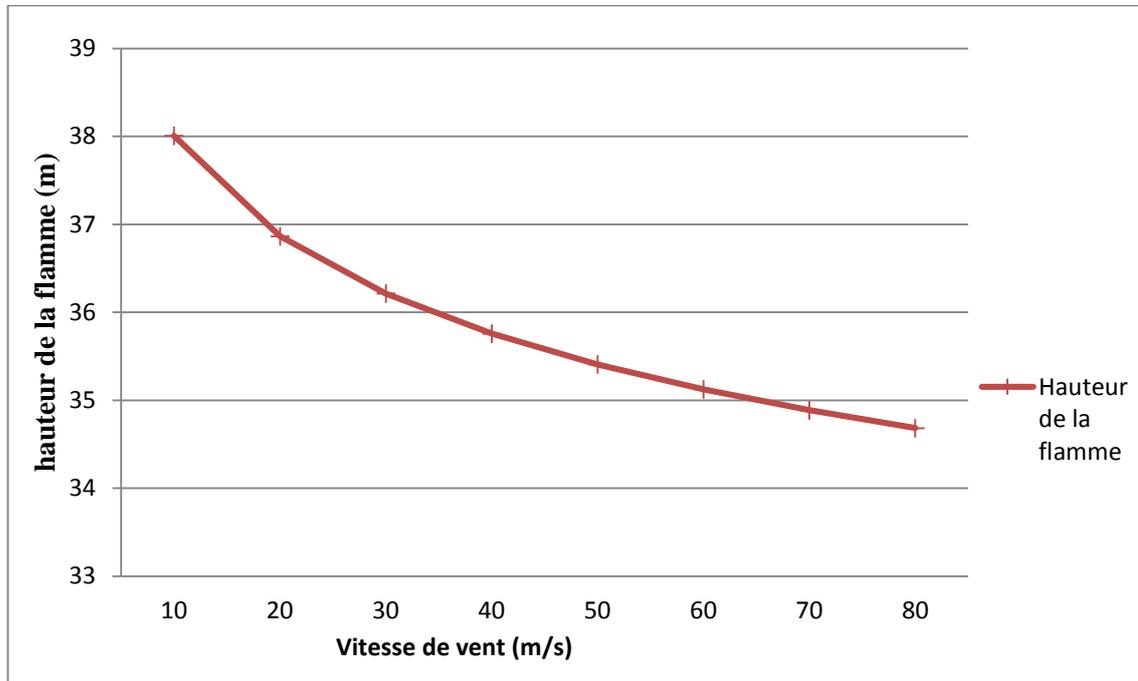


Figure 26: Graphe de l'évolution de la hauteur de la flamme en fonction de la vitesse du vent

➤ **Interprétation**

Ce graphe représente la variation de la hauteur de la flamme en fonction de la vitesse du vent, on remarque que la courbe est décroissante, on peut constater que la hauteur de la flamme a sensiblement diminué de 38 m jusqu'à 34,68 m tout en augmentant la vitesse du vent jusqu'à 80 m/s. Cela est dû à l'inclinaison de la flamme par l'effet du vent.

c- L'inclinaison de la flamme

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}}$$

Avec ;

$$u_{10}^* = 28.50 \text{ m/s}$$

$$\cos\theta = 0.1873 \Rightarrow \theta = 79.20^\circ$$

IV.2.3.5 Le dimensionnement du point de source

Le point source est situé au centre de la nappe, à une taille égale à la moitié de la taille de la flamme (voir la figure ci-dessous)

$$H_s = \frac{H}{2} = \frac{45,14}{2}$$

$$H_s = 22,57\text{m}$$

$$X_s^2 = H_s^2 + \left(\frac{D}{2} + X\right)^2$$

$$X_s^2 = (22,57)^2 + (13,76+50)^2 = 4574,74 \text{ m}^2$$

$$X_s = 67,64 \text{ m}$$

a- Calcul de facteur de vue

$$F_P = \frac{1}{4 \times \pi X_s^2}$$

$$F_P = \frac{1}{4 \times 3,14 \times 67,64^2} \Rightarrow F_P = 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

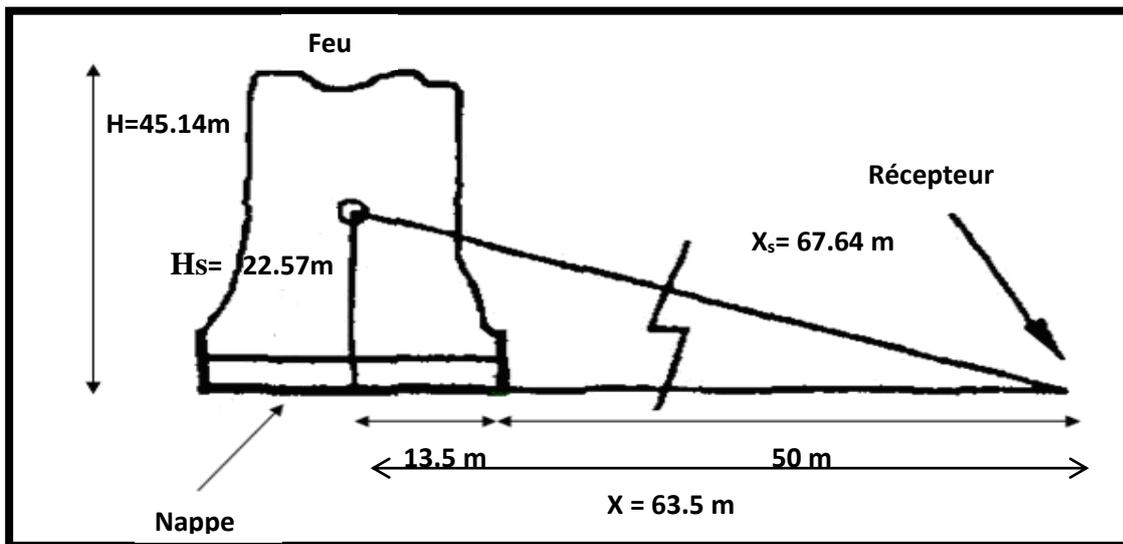


Figure 27: Schéma analogique d'une flamme de butane

b- Calcul de la pression partielle de l'eau

$$P_w = 101325RH \exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (\text{IV.11})$$

$$P_w = 1580Pa$$

P_w : est la pression partielle de l'eau ;

RH : est l'humidité relative.

c- Calcul de la transmittivité atmosphérique

$$\tau_a = 2,02(P_w X_s)^{-0,09}$$

$$\tau_a = 2,02(1580 \times 67,64)^{-0,09}$$

$$\tau_a = 0,71$$

d- Calcul de flux thermique reçu par le récepteur

$$E_r = \tau_a Q_r F_p = \tau \eta m_B \Delta H_c A F_p$$

On prend pour le Butane : $\eta = 0,3$

$$E_r = 0,71 \times 0,3 \times 0,0962 \times 45700 \times 572,27 \times 1,74 \times 10^{-5}$$

$$E_r = 9,32 \text{ kW/m}^2$$

IV.2.3.6 Le model de solid-plume radiation

a- Calcul de flux rayonne à la source

$$E_{av} = E_m e^{-SD} + E_s (1 - e^{-SD})$$

$$E_{av} = 140 e^{-0,12 \times 27} + 20 (1 - e^{-0,12 \times 27})$$

$$E_{av} = 24,69 \text{ kW/m}^2$$

b- Détermination de facteur géométrique de vue

$$\frac{H}{D} = 1,64 \text{ donc } \frac{H}{R} = 2 \times 1,64 = 3,38$$

La distance sans dimension au récepteur est $\frac{X}{R}$:

$$X = X_s + R \Rightarrow X = 50 + 13,76$$

$$X = 63,76 \text{ m}$$

$$\frac{X}{R} = 4,63$$

Du schéma on aura : $F_{21} = 0,083$

Le schéma (IV.3) est employé pour déterminer le facteur géométrique de vue, pour les valeurs suivantes :

À distance sans dimension au récepteur est X/R , où R est le rayon de la piscine et X est la distance de matrice de l'axe de flamme au récepteur,

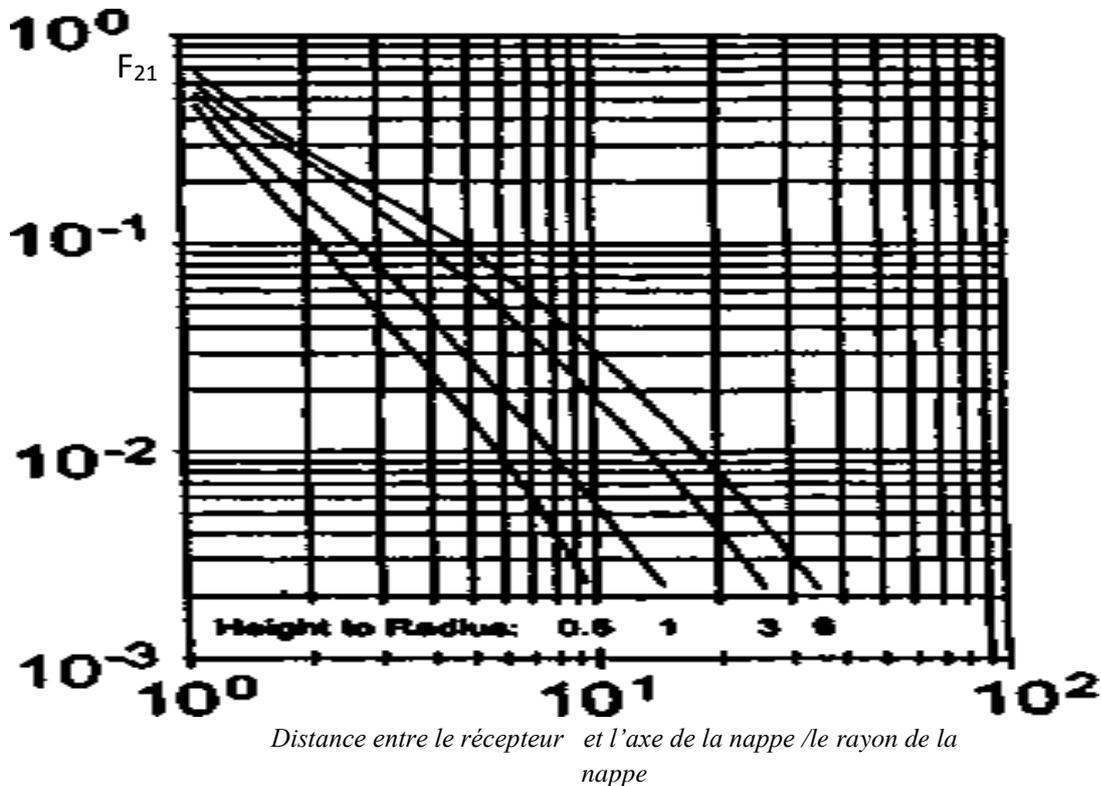


Figure 28: variation de F_{21} en fonction de X/R

c- Calcul de la transmissivité spécifique :

La transmissivité spécifique atmosphérique est donnée par Eq (IV.12) telle que $X_s=50m$

$$\tau_a = 2.02 \times (1580 \times 50)^{-0.09} = 0.732$$

c-Le flux rayonné au récepteur est déterminé à partir d'Eq (VI.10)

$$E_r = \tau_a \Delta H_C F_{21}$$

$$E_r = (0.732 \times 25.97 \times 0.07) \Rightarrow$$

$$E_r = 1.33 \text{ kW/m}^2$$

IV.2.4 Extinction d'un feu de nappe

Calcul de la quantité d'émulseur nécessaire pour l'extinction de feu de nappe du butane

Afin d'éteindre ce feu de nappe étudié sur une surface de 572 m², la raffinerie d'Alger utilise un émulseur protéinique à 5% avec des engins pompe de 1500 L/min à 15 bars[24].

Le taux d'application

Le taux d'application opérationnel « réflexe » est :

- 5 L/min/m² pour les hydrocarbures ;
- 8 L/min/m² pour les liquides polaires.

Avec ; **A** : la surface de la nappe(m²)

TA : taux d'application

Q : le débit de la solution moussante (L/ min)

Q_e : le débit de l'engin (L/ min)

N : le nombre de pompe nécessaire

C : la concentration de l'émulseur (%)

M : la quantité d'émulseur en 1 min (L/ min)

M' : la quantité d'émulseur en 20 min (L)

1- Calcul de solution moussante nécessaire pour 1 min

$$TA = \frac{Q}{A} \Rightarrow Q = TA \times A$$

$$572 \times 5 = 2860 \text{ litres} \Rightarrow$$

$$Q = 2860 \text{ L/min}$$

2- Calcul du nombre de pompes nécessaires:

$$N = \frac{Q}{Q_e}$$

$$\frac{2860}{1500} = 1.9 \text{ soit } 2 \text{ engins pompes} \Rightarrow$$

$$N = 2 \text{ pompes}$$

3- Calcul de la quantité en émulseur pour 1 mn

$$M = N \times Q_e \times C$$

$$3000 \times 0.05 = 150 \text{ L /min} \Rightarrow$$

$$M = 150 \text{ l/ min}$$

4- Calcul de la quantité d'émulseur pour 20 mn

$$M' = M \times 20$$

20 x 150 = 3000 litres d'émulseur.

La quantité d'émulseur = 3m³

5- Interprétation des résultats

L'extinction d'une nappe de feu de 572 m² nécessite l'intervention de 2 engins en utilisant 3m³ d'émulseur avec un débit de 2860 litres/min

IV.2.5 Conclusion

Le résultat du modèle de rayonnement est plus petit que le modèle de point source. C'est très probablement dû à la considération de l'obscurcissement de rayonnement par suie de flamme, un dispositif non traité directement par le modèle de point source. Les différences entre les deux modèles sont plus grandes à une distance plus étroite aux feux de nappe.

La taille de la flamme dépend du diamètre de la nappe ainsi que la vitesse de vent telle qu'il augmente avec l'augmentation du diamètre et diminue avec l'augmentation de la vitesse de vent.

IV.3 modélisation des conséquences du BLEVE

IV.3.1 Etude comparative entre BLEVE du butane et propane

IV.3.1.1 Cas N°01 : la sphère du butane (S5) est remplie à 85%

Suite à une agression thermique extérieure (feu de nappe de butane précédente) provoquant la montée en température et en pression de butane stocké, on envisage le BLEVE de la sphère (S5).

a- Modélisation par méthode classique (formule de calcul)

❖ Estimation des effets du BLEVE

Lors du déclenchement d'un BLEVE, on peut avoir une boule de feu avec des caractéristiques suivant [25]:

1- Rayon de la boule de feu: RBF

$$\text{RBF} = 3.24 M^{0.325}$$

Avec ; **RBF** en (m)

M : masse de liquide en (kg)

Données de départ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Volume de sphère } V_{\text{sphère}} = 3000 \text{ m}^3 \\ \text{Taux de remplissage } 85\% \\ \text{Masse volumique de butane } \rho = 601.26 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

Calcul de la masse du butane en (kg)

$$M = V_{\text{sphère}} \cdot \rho_{\text{butane}} \cdot 85\%$$

$$\text{Alors ; } M_{\text{butane}} = 3000 \times 601,26 \times 0.85$$

$$\boxed{M_{\text{butane}} = 1533213 \text{ Kg}}$$

On a donc ;

$$\text{RBF} = 3.24 \times (1533213)^{0.325} \Rightarrow$$

$$\boxed{\text{RBF} = 331.79 \text{ m}}$$

Si on calcul le diamètre de la boule de feu: **DBF**

$$\text{DBF} = 6.48 M^{0.325}$$

$$\text{DBF} = 6.48 \times (1533213)^{0.325} \Rightarrow$$

$$\boxed{\text{DBF} = 663.58 \text{ m}}$$

2- La durée de la boule de feu TBF

$$\text{TBF} = 0.852 M^{0.26}$$

Avec ; TBF en (s)

M : masse de liquide en (kg)

$$\text{TBF} = 0.852 \times (1533213)^{0.26} \Rightarrow \boxed{\text{TBF} = 34.57 \text{ s}}$$

3- La hauteur de la boule de feu: h

$$h = 0.5 \text{ DBF}$$

Avec ; DBF en (s)

$$\boxed{h = 331.79 \text{ m}} \times 663.58 \Rightarrow$$

4- L'énergie théorique libérée : Q

$$Q = M \times H_c$$

Avec ; Q en Kj

H_c : chaleur de combustion de butane

M : masse de liquide en (kg)

On a ; $H_c = 45700 \text{ Kj/Kg}$

$$\text{Alors ; } Q = 1533213 \times 45700 \Rightarrow \boxed{Q = 7.006 \times 10^{10} \text{ Kj}}$$

5- La puissance de la boule de feu: P

$$P = \frac{Q}{\text{TBF}}$$

Avec ; Q en (Kj)

TBF en (s)

$$P = \frac{7.006 \times 10^{10}}{34.57} \Rightarrow \boxed{P = 2026612670 \text{ W}}$$

6- Effets thermique au sol et distance de sécurité

On peut définir une zone de « forte probabilité de brûlures mortelles » causé par une boule de feu composé d'hydrocarbures par la formule :

$$D_g = 1,26 \times DBF$$

Où : D_g est la zone de forte probabilité de brûlures mortelle.

DBF est le diamètre de la boule de feu en (m)

Donc ; $D_g = 1,26 \times 663.58 \Rightarrow \boxed{D_g = 836.11 \text{ m}}$

7- La Zone de danger

On le définit comme étant le rayon double de la boule de feu.

$$R_f = 2 \times RBF$$

Avec ; RBF en (m)

$R_f = 2 \times 331.79 \Rightarrow \boxed{R_f = 663.58 \text{ m}}$

Paramètres caractéristiques des effets du BLEVE	Résultats
Rayon de la boule de feu RBF	331.79 m
La durée de la boule de feu TBF	34.57 s
La hauteur de la boule de feu h	331.79 m
L'énergie théorique libérée Q	7.006×10^{10} Kj
La puissance de la boule de feu PFB	2026612670 W
Effets thermique au sol et distance de sécurité D_g	836.11 m

Tableau 12: Paramètres caractéristiques les effets du BLEVE de butane

❖ **Calculs des distances retenues du BLEVE de Butane**

a- Par la méthode de calcul de TNO

• **Effets de surpression**

Comme données de départ, les valeurs de seuil suivantes, on été retenues pour [25]:

- 170 mbar, seuil de létalité

- 50 mbar, seul des effets significatifs

1- Distance correspondante au seuil de létalité (170 mbar)

$$d_L = 3.84 M^{0.33}$$

avec: d_L en (m)

M : masse de liquide en (kg)

On a donc d'après TNO;

$$d_L = 3.84 \times (1533213)^{0.33} \Rightarrow \boxed{d_L = 422.26 \text{ m}}$$

2- Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50 mbar)

$$d_s = 8,7 M^{0.33} \text{D'après TNO}$$

avec: d_s en (m)

M : masse de liquide en (kg)

$$\text{Donc ; } d_s = 8.7 \times (1533213)^{0.33} \Rightarrow \boxed{d_s = 956.68 \text{ m}}$$

• **Effets thermiques**

On a comme données de départ, les valeurs de seuils retenues pour des durées d'incendie inferieur à 60 secondes [25]:

- 5 Kw/m² : pour les seuils de létalité

- 3 Kw/m² : pour les seuls des effets significatifs

1- Distance correspondante au seuil de létalité: (5kw/m² = mortalité 1% par brûlure)

$$d_L(1\%) = d_L = 3.12 M^{0.425} \text{D'après TNO}$$

Avec: d_L en (m)

M : masse de liquide en kg

$$\text{Donc ; } d_L = 3.12 \times (1533213)^{0.425} \Rightarrow \boxed{d_L = 1327.50 \text{ m}}$$

2- Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3 kw/m²)

$$d_s = 4.71 M^{0.405} D \text{ d'après TNO}$$

Avec ; d_s en (m)

M : masse de liquide en kg

Donc ; $d_s = 4.71 \times (1533213)^{0.405} \Rightarrow \boxed{d_s = 1507.27}$

	Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE d'après TNO	Résultats
Effets de surpression	Distance correspondante au seuil de létalité (170 mbar)	422.26 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50 mbar)	956.68 m
Effets thermiques	Distance correspondante au seuil de létalité: (5kW/m ²)	1327.50 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3 kW/m ²)	1507.27 m

Tableau 13: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de butane d'après TNO

b- D'après le modèle TRC

Les effets thermiques du BLEVE de butane [25]

1- Distance d'isolement relatif au seuil des effets irréversibles (600 kW/m²)^{4/3}.s

$$d_I = 2.44 M^{0.427}$$

Avec ; d_I en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_I = 2.44 \times (1533213)^{0.427} \Rightarrow \boxed{d_I = 1068.17 \text{ m}}$

2- Distance d'isolement relative au seuil des premiers effets létaux (1000 kW/m³)^{4/3}.s

$$d_{PL} = 1.72 M^{0.437}$$

Avec ; d_{PL} en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_{PL} = 1.72 \times (1533213)^{0.437} \Rightarrow \boxed{d_{PL} = 868.23 \text{ m}}$

**3- Distance d'isolement relative au seuil des effets létaux significatifs
(1800kW/m³)^{4/3}.s**

$$d_{LS} = 0.81 M^{0.471}$$

Avec ; d_{LS} en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_{LS} = 0.81 \times (1533213)^{0.471} \Rightarrow$ **$d_{LS} = 663.60$**

	Paramètres caractéristiques les distances retenues d'après TRC	Résultats
Effets thermiques	Distance d'isolement relative au seuil des effets létaux significatifs (1800kW/m ³) ^{4/3} .s	663.60 m
	Distance d'isolement relative au seuil des premiers effets létaux (1000 kW/m ³) ^{4/3} .s	868.23m
	Distance d'isolement relatif au seuil des effets irréversibles (600 kW/m ²) ^{4/3} .s	1068.17 m

Tableau 14: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE d'après TRC

c- D'après le modèle UFIP

• Effet missile du BLEVE de butane

L'UFIP utilise l'approche surpression positive/équivalent TNT pour calculer l'effet missile du BLEVE.

Une source d'énergie contribue à l'effet missile dans le phénomène de **BLEVE** (La détente adiabatique de la phase vapeur du réservoir).

La masse équivalente de TNT pour l'énergie de détente adiabatique se calcule par [26]:

$$M_{TNT} \times Q_{TNT} = \frac{F \times \Delta p \times V}{K}$$

Et :

$$K^{-1} = (1 + \varepsilon_{fr})^{3\gamma-3} \times (\gamma - 1)$$

$$M_{TNT} = \frac{F \times \Delta p \times V}{Q_{TNT} \times (1 + \epsilon_{fr})^{3\gamma-3} \times (\gamma - 1)}$$

Avec Q_{TNT} , la chaleur de combustion du TNT (J/Kg) = $4,69 \cdot 10^6$ J/Kg

$$M_{TNT} = \frac{F(P_1 - P_0) \times V}{4.69 \times 10^6 \times (1 + \epsilon_{fr})^{3\gamma-3} \times (\gamma - 1)}$$

Avec :

- M_{TNT} : La masse équivalente de TNT
- P_0 : Pression atmosphérique (Pascal)
- P_1 : Pression de rupture du réservoir de butane (Pression de tarage des soupapes PSV vers atmosphère: $P_1 = 7.54$ bars = 754000 Pa)
- ϵ_{fr} : Taux d'élongation du matériau

($\epsilon_{fr} = 0,06$ pour les aciers spéciaux et $\epsilon_{fr} = 0.38$ pour les aciers au carbone)

- F : Le facteur de rendement d'énergie de fragmentation
($F = 0,6$ pour une rupture ductile et $F = 0,2$ pour une rupture fragile)
- V : Volume du réservoir (3000 m^3)
- γ : Le rapport des chaleurs spécifiques de butane 1.1052

A.N :

$$M_{TNT} = \frac{0.6 (7.54 - 1.01) \times 10^5 \times 3000}{4.69 \times 10^6 \times (1 + 0.06)^{3(1.1052)-3} \times (1.1052 - 1)}$$

$M_{TNT} = 2338.89 \text{ kg}$

L'application de l'équivalent TNT s'exprime dès lors :

$$R_{MIS} = \lambda \times (M_{TNT})^{\frac{1}{3}}$$

Avec :

- R_{MIS} : Rayon d'effet missile
- M_{TNT} : La masse équivalente de TNT
- λ : Valeur de référence relative aux seuils d'effets missile Selon le seuil UFIP

Nous prenons λ correspondant à une surpression positive incendie

Les résultats de modélisation du BLEVE de butane selon les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets missile obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Surpression positive Δp^+	Risques	λ	Distance des effets missile (m)
$\Delta p^+ = 70000\text{Pa}$	Risque léthal direct	3.8	50.42
$\Delta p^+ = 30000\text{Pa}$	Destruction et dégâts lourds	6.1	80.94
$\Delta p^+ = 17000\text{Pa}$	Risque léthal indirect	7.83	103.90
$\Delta p^+ = 5000\text{Pa}$	Blessures et dégâts préalables	25.5	338.38

Tableau 15: Les zones d'effets missile du BLEVE de butane

• **Paramètres de surchauffe de butane au moment du déclenchement de BLEVE**

Selon UFIP la température de surchauffe du fluide au moment du déclenchement d'un BLEVE, s'exprime par [26]:

$$T_1(k) = T_0 + \Delta T$$

La température du liquide dans le réservoir au moment du BLEVE est théoriquement la température d'équilibre correspondant à la pression de tarage des soupapes.

Soit :

$$VP = 7,5 \times 10^{-3} P_1$$

Avec ;

P_1 : pression de rupture du sphère de butane

D'après la théorie la pression de sphère au moment de BLEVE atteint au maximum 110 % de la pression de début d'ouverture de la soupape

$$P_1 = P_{tarage} \times 110 \%$$

On a la pression de tarage de soupape de la sphère du butane S5 :

$$P_{tarage} = 6.86 \text{ bars}$$

Alors ;

$$P_1 = 6.86 \times 1.1 = 7.54 \text{ bars}$$

On a ; (1 bars = 750 mm Hg)

$$VP = 7.54 \times 750 \Rightarrow VP = 5655 \text{ mmHg}$$

L'équation d'Antoine permet de calculer T_1 :

$$T_1 = \left(\frac{-ANTB}{\ln VP - ANTA} \right) - ANTC(k)$$

Ou : P_1 : Pression de rupture du réservoir (mmHg)

T_0 : Température d'ébullition du liquide à P_0 (K)

T_1 : Température du liquide à la pression de rupture (K)

ANTA, ANTB, ANTC : Constantes d'Antoine du butane

$$T_1 = \left(\frac{-2154.9}{\ln 5655 - 15.6782} \right) - (-34.42)$$

$T_1 = 340.6 \text{ K} = 67.6 \text{ °C}$

b- Modélisation par méthode numérique

1- Résultats obtenus par logiciel ALOHA

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Valeurs
Diamètre de la boule de feu: DBF	669 m
La durée de la boule de feu TBF	32 s
Rayon de la zone des dangers très graves pour la vie humains (8 kW/m ²)	1.7 km
Rayon de la zone des dangers significatifs pour la vie humains (5.0 kW/m ²)	2.2 km
Rayon de la zone des dangers grave pour la vie humains(3 kW/m ²)	2.8 km

Tableau IV.7: Un tableau récapitulatif des différents résultats obtenu par ALOHA

❖ Les zones des effets thermiques du BLEVE de butane obtenus par logiciel ALOHA

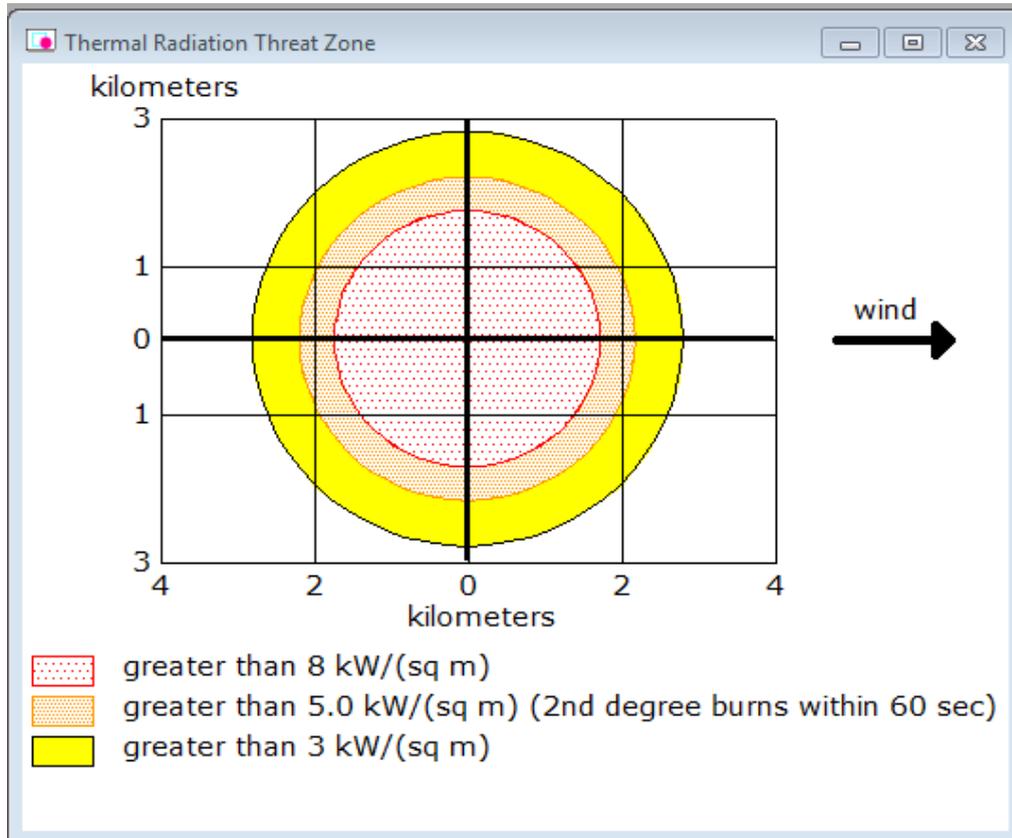


Figure 29: Les zones des effets thermiques d'un BLEVE par logiciel ALOHA

- Ro**  **1.7 Km** --- 8 kW/m² seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine
-  **Orange : 2.2 Km** --- 5 kW/m² seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
-  **Jaune : 2.8Km** --- 3 kW/m² seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine

❖ *Vue satellite des zones des effets thermiques du BLEVE de butane*

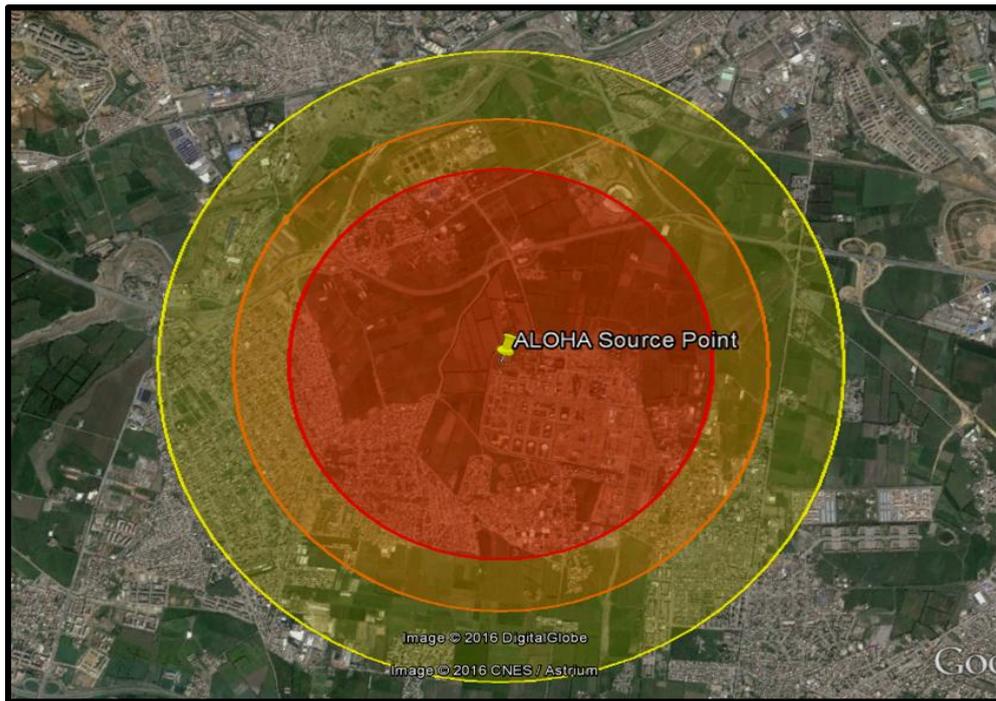


Figure 30: Vue satellite des zones des effets thermiques du BLEVE de butane dans la raffinerie d'Alger

2- Résultats obtenus par logiciel PHAST

- **Effet de surpression**

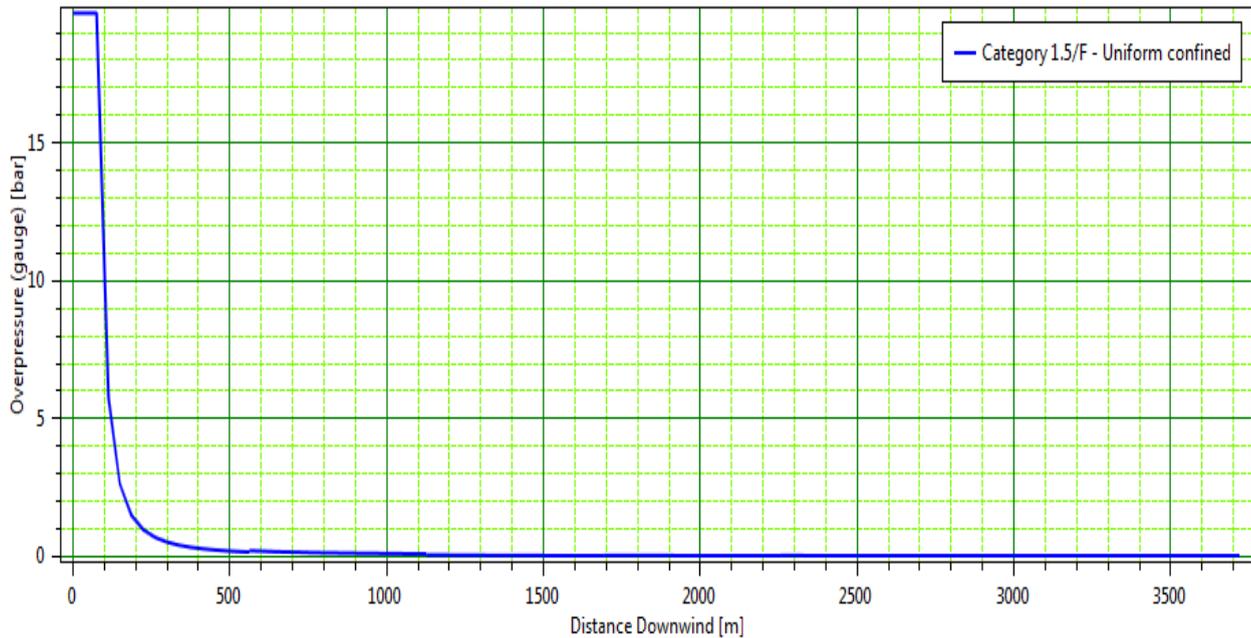


Figure 31: Graphe représente la variation de l'effet de surpression du BLEVE de butane en fonction de distance

• Effet thermique

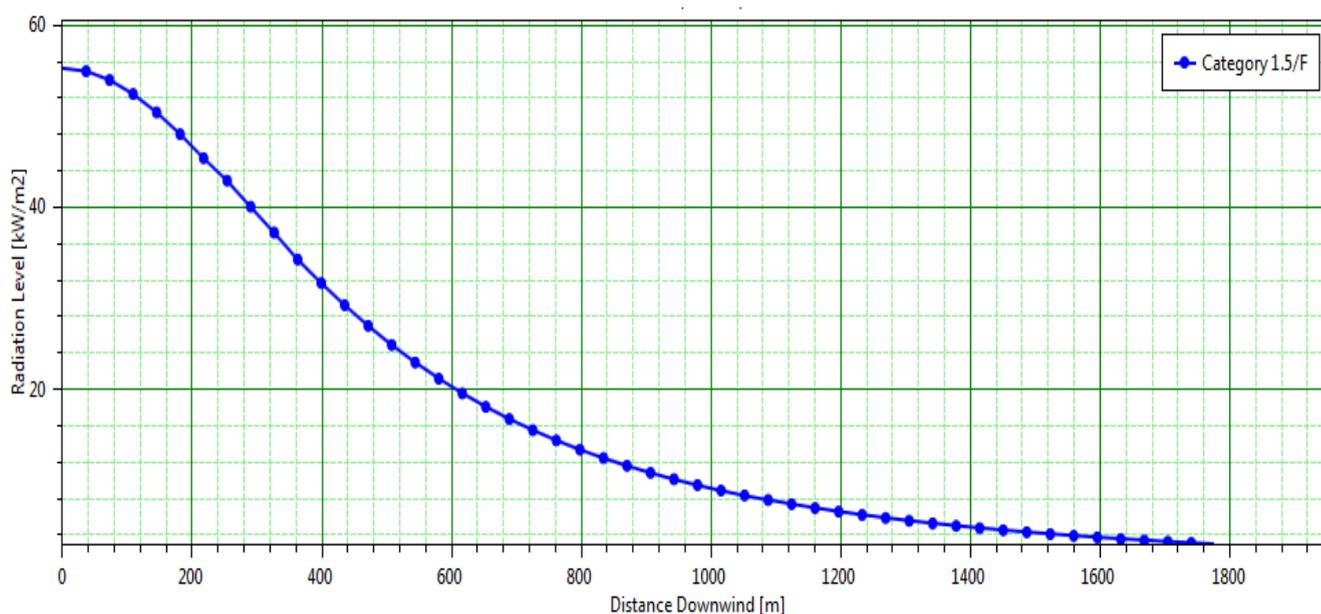


Figure 32: Graphe représente la variation de l'effet thermique du BLEVE de butane en fonction de distance

Selon les deux graphes des effets de surpression et des effets thermiques d'un BLEVE de butane obtenus par le logiciel PHAST on peut définir les seuils dans un tableau ce dessous:

	Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE d'après PHAST	Résultats
Effets de surpression	Distance correspondante au seuil de létalité (170 mbar)	601.40 m
	Distance correspondante au seuil des premierseffets létaux (140 mbar)	714.17 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50 mbar)	1653.87 m
Effets thermiques	Distance correspondante au seuil des effets létaux significatifs (8 kW/m ²)	1060.44 m
	Distance correspondante au seuil des premiers effets létaux (5kW/m ²)	1377.75 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3 kW/m ²)	1776.57m

Tableau 16: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de butane par logiciel PHAST

c- Comparaisons des résultats des différentes méthodes classiques et numériques du BLEVE de butane

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Résultats obtenus par				
	Formule de TNO	Formule de TRC	Formule d'UFIP	ALOHA	PHAST
Diamètre de la boule de feu DBF	663.58 m			669 m	
La durée de la boule de feu TBF	34.57 s			32 s	
Paramètres de surchauffe de butane au moment du déclenchement de BLEVE			67.6 °C		
Distance de la zone des dangers très graves (8 kW/m ²) ou (1800 kW/m ²) ^{4/3} .s		663.60m		1700 m	1060.44 m
Distance correspondante au seuil des effets létaux (5.0 kW/m ²) ou (1000 kW/m ²) ^{4/3} .s	1327.50 m	868.23 m		2200 m	1377.75 m
Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3.0 kW/m ²) ou (600kW/m ²) ^{4/3} .s	1507.27 m	1068.17m		2800 m	1776.57m
Distance correspondante au seuil de létalité(170 mbar)	422.26 m				601.40 m
Distance correspondante au seuil des premierseffets létaux (140 mbar)					714.17 m
Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50mbar)	956.68 m				1653.87 m
Risque léta1 direct(70 KPa)			48.60 m		
Destruction et dégâts lourds (30 kPa)			78.01 m		
Risque léta1 indirect (17 kPa)			100.14 m		
Blessures et dégâts préalables (5 kPa)			326.14 m		

Tableau 17: Tableau comparatif des résultats obtenus

❖ Interprétation des résultats

Après les résultats obtenus par l'utilisation des deux logiciels ALOHA et PHAST, et les formules classiques (TNO, TRC) concernant la modélisation d'un scénario du BLEVE de butane au niveau de la raffinerie d'Alger, nous avons constaté un écart entre les résultats du seuil des effets, ceci est dû à la différence entre les paramètres utilisés au niveau des différentes formules.

- Les effets de surpression d'un accident majeur au niveau de la raffinerie peuvent atteindre une distance de 960 m selon TNO et 1653 m selon PHAST au centre d'accident, et les radiations thermiques peuvent atteindre une distance de 1 km jusqu'à 2.8 km selon des différentes formules déjà utilisées.

Ces effets sont dus au volume du réservoir (3000 m³) et à la nature de produit stocké (butane est un produit inflammable)

- les effets missiles calculés par la formule UFIP peuvent atteindre au maximum une distance de 327 m à cause de la haute pression pendant la rupture ductile de réservoir.

- Afin d'assurer la sécurité totale des opérateurs et des équipements on doit respecter chaque distance calculée de chaque effet mais malheureusement la réalisation pratique de tous ces calculs théorique est un peu délicate pour des raisons divers tel que :

- ❖ La zone de stockage est située à proximités des autres services et départements
- ❖ Le grand volume de la sphère qui provoque des effets à des très grandes distances non respectables.
- ❖ La diminution de la quantité du butane stocké peut causer des fluctuations d'approvisionnement
- ❖ Et plus de ça, l'augmentation de la surface de la raffinerie nécessite un coût très cher.

- Pour ce genre de dégât on ne peut pas assurer la protection des opérateurs et des équipements donc on doit se baser sur les mesures de prévention.

d- Evaluation de diamètre de la boule de feu du butane

- **Variation du diamètre de la boule de feu en fonction de masse (taux de remplissage)**

D'après TNO on a : $DBF = 6.48 M^{0.325}$

Pourcentage (%)	55	65	75	85	100
Masse (Kg)	992079	1172457	1352835	1533213	1803780
Diamètre (m)	567.04	608.18	637.13	663.58	699.58

Tableau 18: La variation du DBF en fonction de la masse

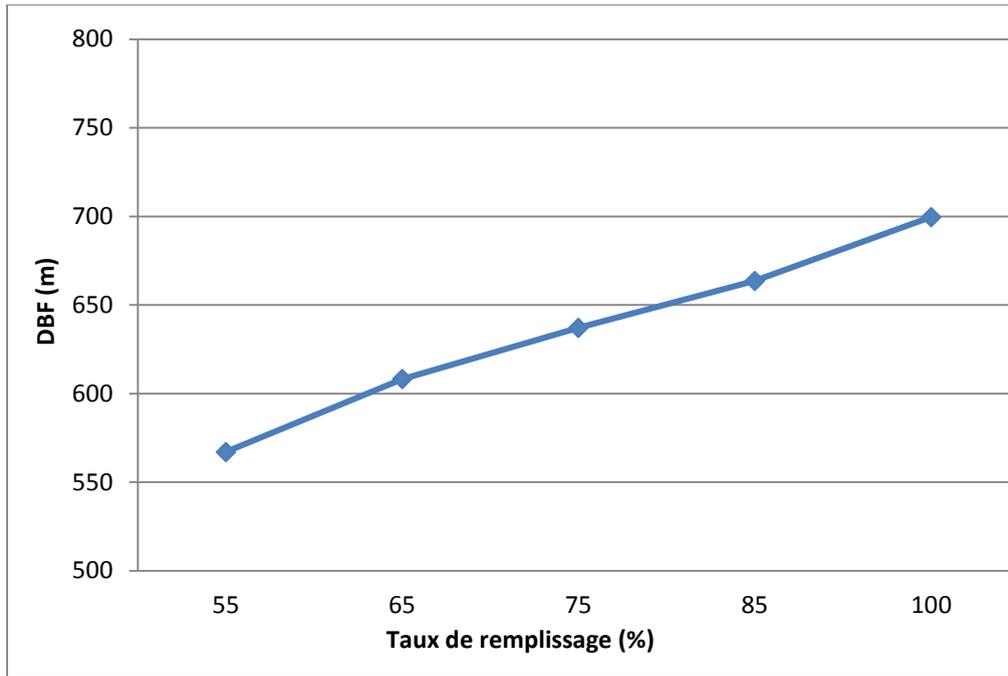


Figure 33: Variation du diamètre de la boule de feu en fonction de taux de remplissage

❖ **Interprétation**

Ce graphique représente la variation du diamètre de la boule de feu en fonction du taux de remplissage, on voit que la courbe est croissante, on peut constater que le DBF a sensiblement augmenté de 567.04m jusqu'à 688.01m tout en garantissant la masse. Cela est dû à la consommation du liquide inflammable qui est le butane.

- **Variation du diamètre de la boule de feu de butane en fonction du temps et différents taux de remplissage**

Selon **BENEDICK** le diamètre de la boule de feu est donné par la formule suivante[28]:

$$D(t) = 8.664M^{1/4}t^{1/3} \dots\dots\dots \text{BENEDICK (1978)}$$

- La sphère est remplie à 95% : $M_b = 1713591 \text{ kg}$
- La sphère est remplie à 85% : $M_b = 1533213 \text{ Kg}$
- La sphère est remplie à 75% : $M_b = 1352835 \text{ Kg}$
- La sphère est remplie à 65% : $M_b = 1172457 \text{ Kg}$
- La sphère est remplie à 55% : $M_b = 992079 \text{ Kg}$

		Temps (s)						
		5	10	15	20	25	30	34
Taux de remplissage	55%	467,57	589,10	674,35	742,22	799,53	849,63	885,83
	65%	487,51	614,23	703,11	773,87	833,63	885,86	923,60
	75%	505,27	636,59	728,72	802,06	863,99	918,13	957,24
	85%	521,32	656,82	751,88	827,55	891,45	947,31	997,26
	100%	542,94	684,06	783,05	861,86	928,41	986,59	1028,62

Tableau 19: La variation du DBF en fonction du temps avec des différents taux de remplissages

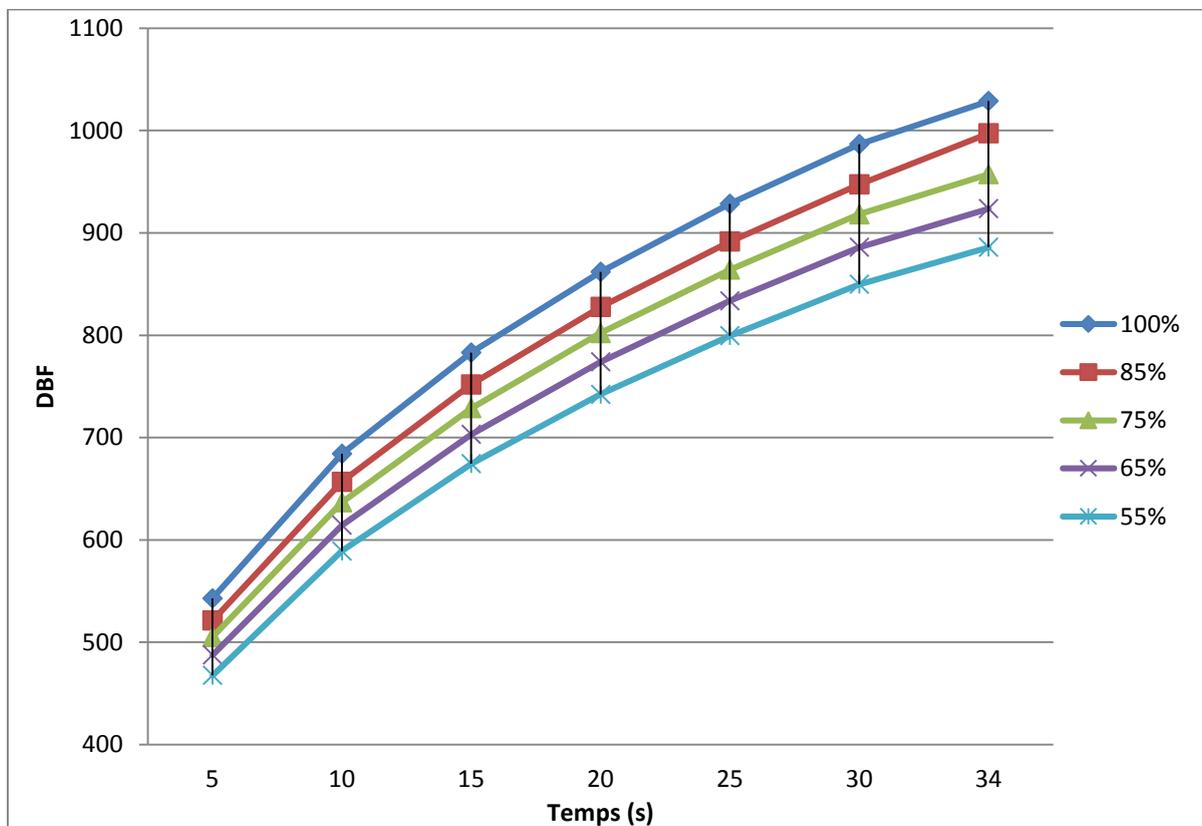


Figure 34: Graphe représente l'évolution de DBF en fonction du temps et taux de remplissage

❖ **Interprétation :**

Ces graphes représentent la variation du diamètre de la boule de feu en fonction du temps avec des différents remplissages. On remarque que ces courbes sont croissantes, on peut constater que le DBF progresse plus hâtivement en augmentant le taux de remplissage. Cela est dû à l'augmentation de la quantité consommée de butane stocké dans la sphère.

IV.3.1.2 Cas N°02 : La sphère de propane est remplie à 85%

Nous avons supposés que la sphère (S5) est remplie de propane à 85% dans le but de faire une étude comparative entre les effets et les caractéristiques d'un BLEVE de butane et propane.

Données de départ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Volume de sphère } V_{\text{sphère}} = 3000 \text{ m}^3 \\ \text{Taux de remplissage } 85\% \\ \text{Masse volumique de propane } \rho = 580.88 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right.$$

Calcul de la masse de propane en (kg)

$$M = V_{\text{sphère}} \cdot \rho_{\text{propane}} \cdot 0.85$$

$$\text{Alors ; } M_{\text{propane}} = 3000 \times 580.88 \times 0.85 \quad \Rightarrow \quad \boxed{M_{\text{propane}} = 1481244 \text{ Kg}}$$

Nous avons recalculés les caractéristiques du BLEVE de propane par les mêmes formules des méthodes numérique (TNO et TOTAL) de 1^{er} cas (BLEVE de butane), mais les formules de TRC et UFIP seront changées.

a- Modélisation par méthode classique

• Récapitulation des différents résultats du BLEVE de propane

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Valeurs
Rayon de la boule de feu RBF	328.09 m
La durée de la boule de feu TBF	34.26s
La hauteur de la boule de feu: h	328.09 m
L'énergie théorique libérée : Q	6.86 × 10¹⁰ Kj
La puissance de la boule de feu: PFB	2004392056 W
Effets thermique au sol et distance de sécurité	826.80 m
La Zone de danger	656.18 m

Figure 35: Un tableau récapitulatif des différents résultats obtenus

• D'après le modèle TRC (formule de propane)

Effet thermique de propane

1- Distance d'isolement relative au seuil des effets létaux significatifs
(1800kW/m³)^{4/3}.s

$$d_{LS} = 1.28 M^{0.448}$$

Avec ; d_{LS} en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_{LS} = 1.28 \times (11481244)^{0.448} \Rightarrow$

$$d_{LS} = 744.13$$

2- Distance d'isolement relative au seuil des premiers effets létaux (1000 kW/m³)^{4/3}.s

$$d_{PL} = 1.92M^{0.442}$$

Avec ; d_{PL} en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_{PL} = 1.92 \times (1481244)^{0.442} \Rightarrow$

$$d_{PL} = 1024.98 \text{ m}$$

3- Distance d'isolement relatif au seuil des effets irréversibles (600 kW/m²)^{4/3}.s

$$d_I = 2.97 M^{0.425}$$

Avec ; d_I en (m)

M masse de liquide en kg

Donc ; $d_I = 2.97 \times (1481244)^{0.425} \Rightarrow$

$$d_I = 1245.30 \text{ m}$$

• D'après le modèle UFIP

1- Effet missile du BLEVE de propane

La masse équivalente de TNT pour l'énergie de détente adiabatique se calcule par :

$$M_{TNT} \times Q_{TNT} = \frac{F \times \Delta p \times V}{K}$$

$$M_{TNT} = \frac{F \times \Delta p \times V}{Q_{TNT} \times (1 + \varepsilon_{fr})^{3\gamma-3} \times (\gamma - 1)}$$

Avec Q_{TNT}, la chaleur de combustion du TNT (J/Kg) = 4,69.10⁶ J/Kg

$$M_{TNT} = \frac{F(P_1 - P_0) \times V}{4.69 \times 10^6 \times (1 + \epsilon_{fr})^{3\gamma-3} \times (\gamma - 1)}$$

Avec :

- M_{TNT} : La masse équivalente de TNT
- P_0 : Pression atmosphérique (Pascal)
- P_1 : Pression de rupture du réservoir (Pression de tarage des soupapes PSV vers atmosphère: $P_1 = 17.6 \text{ bars} = 1760000 \text{ Pa}$)
- ϵ_{fr} : Taux d'élongation du matériau
($\epsilon_{fr} = 0,06$ pour les aciers spéciaux et $\epsilon_{fr} = 0.38$ pour les aciers au carbone)
- F : Le facteur de rendement d'énergie de fragmentation
($F = 0,6$ pour une rupture ductile et $F = 0,2$ pour une rupture fragile)
- V : Volume du réservoir (3000 m^3)
- γ : Le rapport des chaleurs spécifiques de propane 1.1364

A.N :

$$M_{TNT} = \frac{0.6 (17.6 - 1,01) \times 10^5 \times 3000}{4.69 \times 10^6 \times (1 + 0.06)^{3(1.1364)-3} \times (1.1364 - 1)}$$

$M_{TNT} = 4558.02 \text{ Kg}$

➤ Les distances des effets missiles du BLEVE de propane

Surpression positive Δp^+	Risques	λ	Distance des effets missile (m)
$\Delta p^+ = 70000 \text{ Pa}$	Risque léthal direct	3.8	63.00
$\Delta p^+ = 30000 \text{ Pa}$	Destruction et dégâts lourds	6.1	101.13
$\Delta p^+ = 17000 \text{ Pa}$	Risque léthal indirect	7.83	129.82
$\Delta p^+ = 5000 \text{ Pa}$	Blessures et dégâts préalables	25.5	422.79

Tableau 20: Les zones d'effets missile du BLEVE d'une sphère de propane

2- Paramètres de surchauffe de propane au moment du déclenchement de BLEVE

Selon UFIP la température de surchauffe du fluide au moment du déclenchement d'un BLEVE de propane, s'exprime par :

$$T_1 (k) = T_0 + \Delta T$$

Soit :

$$VP = 7,5 \times 10^{-3} P_1$$

Avec ;

P_1 : pression de rupture du sphère de propane

On a la pression de tarage de soupape de la sphère du propane S5 :

$$P_{\text{tarage}} = 16 \text{ bars}$$

Alors ;

$$P_1 = P_{\text{tarage}} \times 110 \%$$

$$P_1 = 16 \times 1.1 = 17.6 \text{ bars}$$

On a ; (1 bars = 750 mm Hg)

$$VP = 17.6 \times 750 \Rightarrow VP = \mathbf{13200 \text{ mmHg}}$$

L'équation d'Antoine permet de calculer T_1

$$T_1 = \left(\frac{-ANTB}{\ln VP - ANTA} \right) - ANTC(k)$$

Où :

P_1 : Pression de rupture du réservoir (mmHg)

T_0 : Température d'ébullition du liquide à P_0 (K)

T_1 : Température du liquide à la pression de rupture (K)

ANTA, ANTB, ANTC : Constantes d'Antoine de propane

A.N :

$$T_1 = \left(\frac{-1872.46}{\ln 13200 - 15.726} \right) - (-25.16)$$

$T_1 = 325.33 \text{ K} = 52.33^\circ\text{C}$

b- Modélisation par méthode numérique

1- Résultats obtenus par logiciel (ALOHA)

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Valeurs
Diamètre de la boule de feu: DBF	644 m
La durée de la boule de feu TBF	31 s
Rayon de la zone des dangers très graves pour la vie humains (8 kW/m ²)	1.7 km
Rayon de la zone des dangers significatifs pour la vie humains (5.0 kW/m ²)	2.1 km
Rayon de la zone des dangers grave pour la vie humains (3 kW/m ²)	2.7 km

Tableau 21: Un tableau récapitulatif des différents résultats obtenu par ALOHA

❖ *Les zones des effets thermiques d'un BLEVE par logiciel ALOHA*

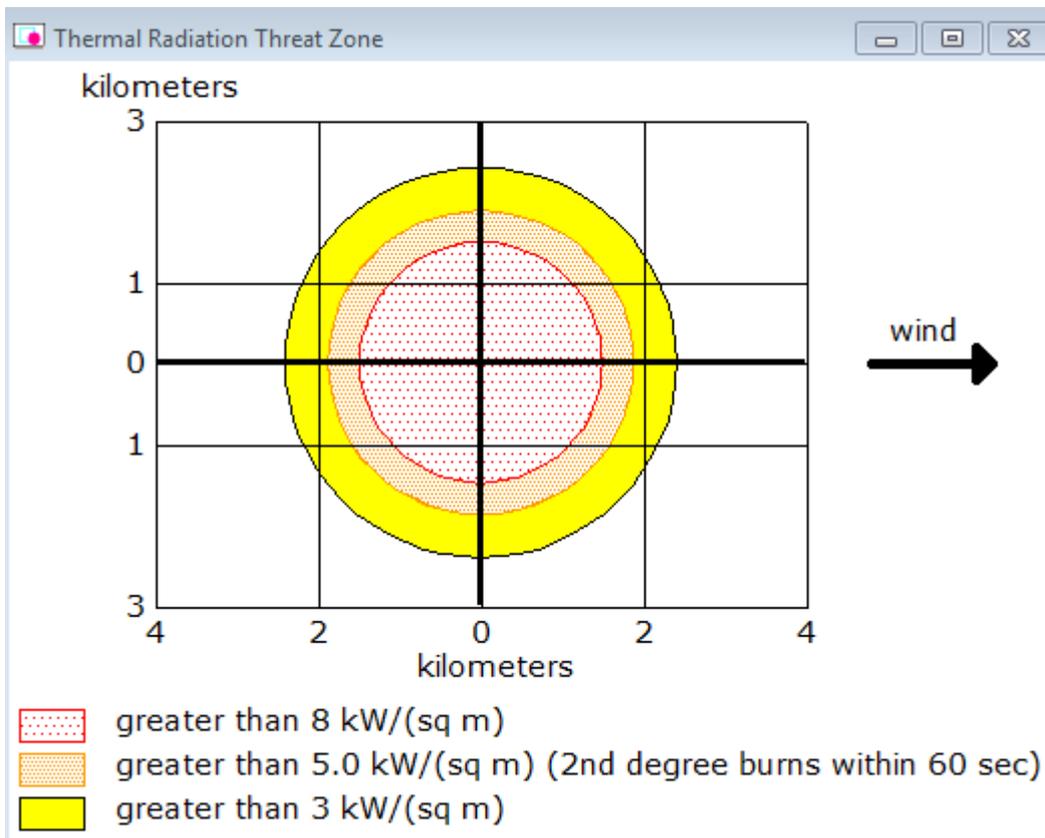


Figure 36: Les zones des effets thermiques d'un BLEVE de propane par logiciel ALOHA

Clé de la figure 22 :

- Ro**  **7 Km** --- 8 kW/m² seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine
-  **Orange : 2.1 Km** --- 5 kW/m² seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
-  **Jaune : 2.7Km** --- 3 kW/m² seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.

2- Résultats obtenus par logiciel PHAST

- **Effet de surpression**

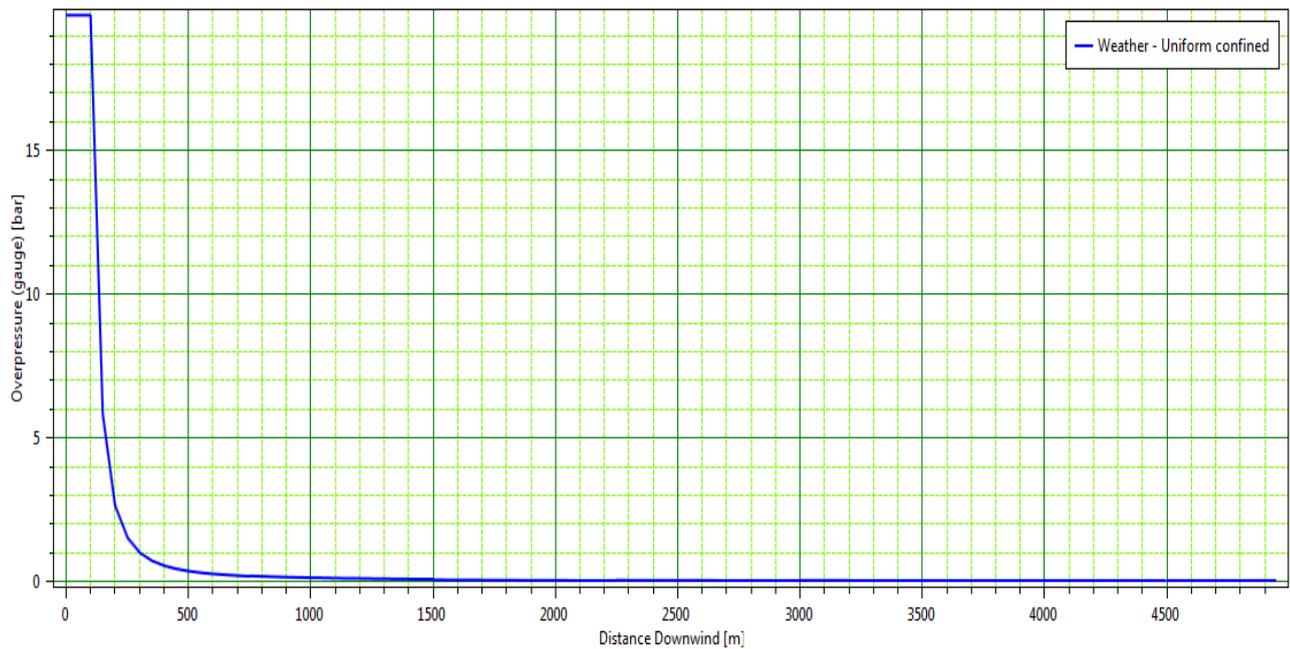


Figure 37: Graphe représente la variation de l'effet de surpression du BLEVE de propane en fonction de distance

• Effet thermique

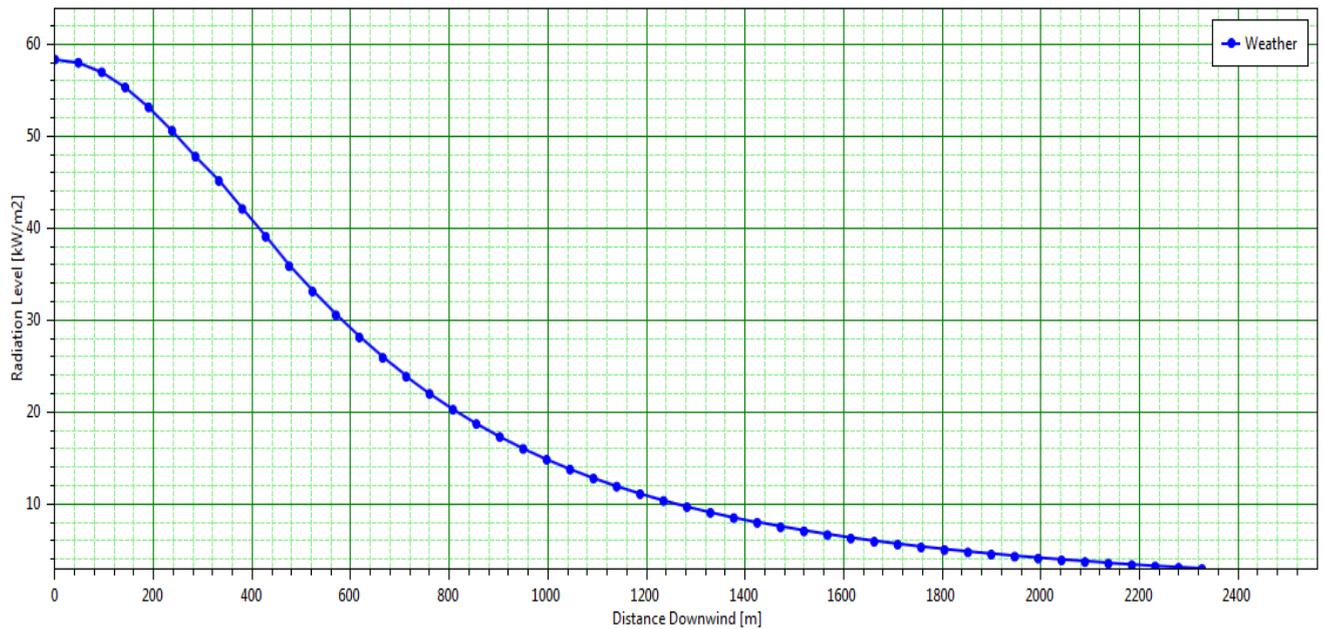


Figure 38 : Graphe représente la variation de l'effet thermique du BLEVE de propane en fonction de distance.

Selon les deux graphes des effets de surpression et des effets thermiques d'un BLEVE de butane obtenus par le logiciel PHAST on peut définir les seuils dans un tableau ce dessous:

	Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE d'après PHAST	Résultats
Effets de surpression	Distance correspondante au seuil de létalité (170 mbar)	799.07 m
	Distance correspondante au seuil des premierseffets létaux (140 mbar)	948.89 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50 mbar)	2197.44 m
Effets thermiques	Distance correspondante au seuil des effets létaux significatifs (8 kW/m²)	1424.74 m
	Distance correspondante au seuil des premiers effets létaux (5kW/m²)	1804.67 m
	Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3 kW/m²)	2327.07 m

Tableau 22: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de propane par logiciel PHAST

c- Récapitulation des résultats des différentes méthodes classiques et numériques du BLEVE de propane

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Résultats obtenus par				
	Formule de TNO	Formule de TRC	Formule d'UFIP	ALOHA	PHAST
Diamètre de la boule de feu DBF	656.19 m			644 m	
La durée de la boule de feu TBF	34.26s			31s	
Paramètres de surchauffe de propane au moment du déclenchement de BLEVE			52.33 °C		
Distance de la zone des dangers très graves (8 kW/m ²) ou (1800 kW/m ²) ^{4/3} .s		744.13 m		1700 m	1424.74 m
Distance correspondante au seuil des effets létaux (5.0 kW/m ²) ou (1000 kW/m ²) ^{4/3} .s	1308.19 m	1024.98 m		2100 m	1804.67 m
Distance correspondante au seuil des effets significatifs (3.0 kW/m ²) ou (60kW/m ²) ^{4/3} .s	1486.36 m	1245.03 m		2700 m	2327.07 m
Distance correspondante au seuil de létalité(170 mbar)	417.48 m				799.07 m
Distance correspondante au seuil des premierseffets létaux (140 mbar)					948.89 m
Distance correspondante au seuil des effets significatifs (50 mbar)	945.86 m				2197.44 m
Risque létal direct(70 KPa)			63.00		
Destruction et dégâts lourds (30 kPa)			101.13		
Risque létal indirect (17 kPa)			129.82		
Blessures et dégâts préalables (5 kPa)			422.79		

Tableau 23: Récapitulation des résultats du BLEVE de propane obtenus

d- Évaluation de diamètre de la boule de feu du butane et propane

Diamètre de la boule de feu de propane est donnée par :

Selon BENEDICK le diamètre de la boule de feu est donné par la formule suivante :

$$D(t) = 8.664M^{1/4}t^{1/3} \dots\dots\dots \text{BENEDICK (1978)}$$

Nous avons la masse du propane : $M_p = 1481244 \text{ Kg}$

Pour évaluer la variation du diamètre de la boule de feu en fonction du temps nous allons tracer la courbe $f(t) = \text{DBF}$

Temps (s)	5	10	15	20	25	30	35
Diamètre (m)	516,85	651,19	745,42	820,45	883,80	939,18	979,19

Tableau 24:La variation du DBF de propane en fonction de temps

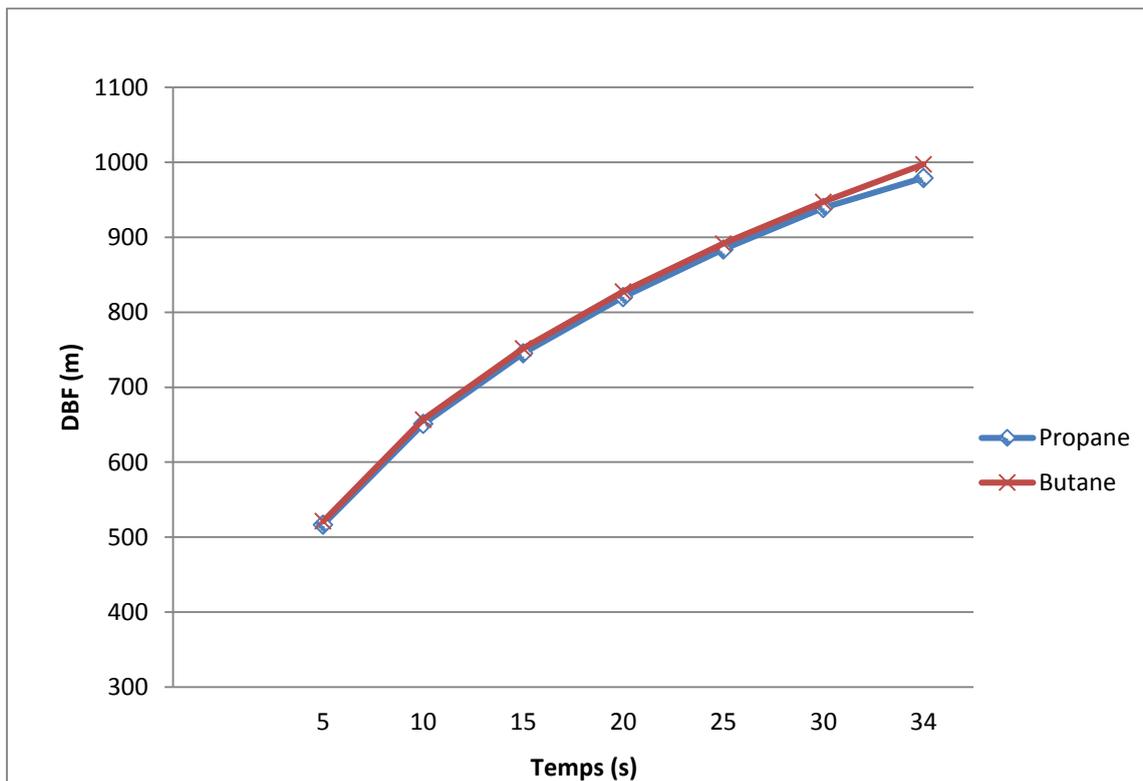


Figure 39: Graphe comparatif de l'évolution du DBF du butane et propane en fonction du temps.

❖ **Interprétation :**

Ces deux graphes représentent la variation du diamètre de la boule de feu du butane et propane en fonction du temps. On remarque que ces courbes sont croissantes et identiques dans l'intervalle de temps compris entre 5-30s mais il y a une légère augmentation du diamètre de la boule de feu de butane dans les 5 dernières secondes avec une valeur de diamètre maximale de butane égale à 997.26m est supérieur à celle du propane qui est égal à 979.19 m.

IV.3.1.3 Conclusion

D'après notre étude comparative entre BLEVE de butane et propane de même équipement (sphère 05) nous avons remarqué une similitude entre les paramètres caractéristiques (la hauteur et la durée de la boule de feu, l'énergie libérée et la puissance de la boule de feu... etc.)

Mais la comparaison entre les distances retenues des deux BLEVE montre un léger écart entre les effets à savoir les effets thermiques, surpressions et missiles de chaque méthode (numériques ou classiques).

- Les distances aux seuils des effets thermiques calculées par logiciel PHAST sont supérieures à celles calculées par les autres modèles (ALOHA, TNO et TRC), quel que soit le produit considéré (butane ou propane).

- L'écart entre les distances des effets (thermiques et surpression) de propane et butane selon le modèle TNO est presque négligeable (écart = 20 m) car les corrélations du TNO ne sont fonction que de la masse.

- La nature du produit a une influence non négligeable dans l'application du modèle TRC. Ainsi, les distances des effets calculées pour le propane sont de l'ordre de 15 % supérieures à celles calculées pour le butane.

- Les distances des effets missiles calculées pour le propane d'après UFIP sont de l'ordre 23% supérieures à celles de butane dû à la différence entre les deux pressions de rupture de réservoir au moment de déclenchement d'un BLEVE

$$P_{propane}^{rupture} = 17.6 \text{ bars} > P_{butane}^{rupture} = 7.54 \text{ bars}$$

D'après ces méthodes de calculs classiques et numériques, les industries pétrolières prennent en considération les distances des différents effets calculés par le logiciel PHAST qui est le plus fiable, car cette simulation est faite suivant des conditions météorologiques comme des entrées, le type de matériau de conception (sphère) et le produit stocké.

Alors les impacts sur l'Homme, l'environnement et les installations seront presque les mêmes.

IV.3.1.4 Les Impacts du BLEVE sur les infrastructures et les installations de la raffinerie d'Alger

a. Les Impacts sur les bâtiments

Le département finance, le service formation, HSE et technique, le laboratoire, l'infirmerie, et les salles de contrôle et leurs occupants seront affectés par les combinaisons d'effets (thermiques et surpression) selon la vue satellite obtenue par ALOHA et ces derniers ne sont pas touchés par l'effet missile. En gros toute la raffinerie sera détruite dans le cas d'une explosion,

Les zones touchées par ces effets sont les suivantes :

- Effets létaux: il touche toute la ville de Baraki tel que Masjid Ansar, Omar ibn el khatab, salle de sport et la route East ouest.

- Premiers effets létaux: il touche le CEM IB Nou Taimia, le centre-ville de Baraki et le nouveau projet de grand stade d'Alger.

- Effets significatifs: il touche la ville Okaliptus, le jardin de Baraki, la maison des voitures Renault, l'hôtel el Forssen, Masjid malek ibn nabi, la nouvelle cité, La gare de gué de Constantine et la mairie de Barak.

b. Les Impacts sur les installations

Les unités, (100, 200 et 300) seront détruites, la pompe et le réseau anti-incendie seront touchés par des différents effets :

L'effet thermique peut provoquer d'autres 6 scénarios du BLEVE au niveau de la zone de stockage de GPL (présence de 4 sphères et 2 cigares à proximité de la sphère (5).

Destruction des bacs de stockage de pétrole brut et des produits finis et semi-finis, aussi des conduites d'expéditions et des chaudières.

c. Les Impacts sur la population:

L'effet thermique englobe toute la raffinerie (zone rouge), il peut atteindre toute la région de Baraki jusqu'à Al Harach, par contre l'effet de surpression repose sur des distances moins que celles des effets thermiques. C'est pour cela ils ont coupé la route voisine et c'est pour cela aussi que la raffinerie est éloignée de la ville afin de minimiser le risque sur la population et les bâtiments.

d. Les Impacts sur l'environnement:

Le produit GPL est intrinsèquement non polluant, les impacts potentiels sur l'environnement sont une pollution atmosphérique dans notre cas le propane et le butane sont des produits combustibles et les déchets solides résultants d'un accident majeur (destruction des équipements)

e. Les Impacts Économiques et Financiers Prévisibles:

Les coûts des dommages en cas d'accidents sont représentés par les montants des investissements réalisés et le chiffre d'affaire quotidien en cas d'arrêt de l'activité.

La raffinerie d'Alger dispose d'un plan d'opération interne (POI) opérationnel et régulièrement testé, il doit permettre de gérer les situations pour lesquelles les effets liés à certains phénomènes dangereux ne sortent pas des limites de complexité.

Aussi la raffinerie d'Alger est menée d'un plan de sécurité bien assuré, ce plan est testé chaque lundi en suivant un programme bien défini dans le but d'entraîner les opérateurs et de consulter le matériel.

IV.3.2 BLEVE d'un Camion-citerne de butane rempli à 85%

Vu la probabilité élevée du BLEVE camion constaté après INERIS qui a consulté le BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles) qui gère la base de données ARIA ; l'interrogation de cette base a permis à l'INERIS de retenir 59 références d'accidents du BLEVE s'étant produits dans le monde entre 1951 et 2000. Parmi ces 59 accidents 35 concernent directement le transport de marchandises dangereuses.

A cause du débit de chargement d'environ 8 camions-citernes par jour dans la raffinerie d'Alger, nous avons décidé d'effectuer une simulation sur un camion-citerne dans la zone de stockage étudiée,

On suppose le déclenchement d'un feu de nappe proche d'un camion-citerne de butane en chargement au poste de chargement dans la zone de GPL, pour l'estimation d'un BLEVE du camion.

IV.3.2.1 Estimation des effets du BLEVE

Lors du déclenchement d'un BLEVE, on peut avoir une boule de feu avec des caractéristiques suivant:

Données de départ :

La longueur de la citerne du camion $L = 17.2$ m
 Le diamètre de la citerne du camion $D = 3.3$ m
 Taux de remplissage 85%
 Masse volumique de butane $\rho = 601.26$ kg/m³

a- Calcul du volume de la citerne

$$V_{\text{citerne}} = \left(\frac{\pi \times D^2}{4} \right) \times L$$

$$V_{\text{citerne}} = \left(\frac{\pi \times 3.3^2}{4} \right) \times 17.2 \Rightarrow \boxed{V_{\text{citerne}} = 147.11 \text{ m}^3}$$

b- Calcul du volume de butane dans la citerne

$$V_{\text{butane}} = \boxed{V_{\text{butane}} = 125 \text{ m}^3}$$

c- Calcul de la masse de butane en (kg)

$$M_{\text{butane}} = V_{\text{citerne}} \cdot \rho_{\text{butane}}$$

$$\text{Alors ; } M_{\text{butane}} = 125 \times 601.26 \Rightarrow \boxed{M_{\text{butane}} = 75157.5 \text{ kg}}$$

Récapitulation des différents résultats du BLEVE de camion-citerne de butane

Paramètres caractéristiques du BLEVE	Valeurs
Rayon de la boule de feu: RBF	124.50 m
La durée de la boule de feu TBF	15.78 s
La hauteur de la boule de feu: h	124.50 m
L'énergie théorique libérée : Q	3.43 × 10⁹ Kj
La puissance de la boule de feu: PFB	217363751.6 W
Effets thermique au sol et distance de sécurité	313.75 m
La Zone de danger	249.01 m

Tableau 25: Paramètres caractéristiques des effets du BLEVE d'un camion-citerne de butane

IV.3.2.2 Calculs de rayon de la zone d'exclusion d'après TNO

a- Rayon de la zone d'exclusion correspondante à la dose thermique : 400 kJ/m² (mortalité 1%) [27]

$$r_1 = \text{RBF} (0.5 \text{ TBF})^{0.5}$$

Avec ; **r** : rayon de la zone d'exclusion correspondante à la dose thermique : 400 kJ/m²

RBF : rayon de la boule de feu

TBF : durée de la boule de feu

$$r_1 = 123.77 \times (0.5 \times 15.70)^{0.5} \Rightarrow \boxed{r_1 = 346.77 \text{ m}}$$

b- Rayon de la zone d'exclusion correspondante à l'effet de surpression : 140 mbar (Des premiers effets létaux) [25]

$$r_1' = \lambda_1 (M_{\text{TNT}})^{\frac{1}{3}}$$

Avec ; **r₁'** : Rayon de la zone d'exclusion correspondante à l'effet de surpression : 140 mbar

λ_i : Distance réduite, en fonction du seuil de surpression recherché, et obtenue par lecture des abaques TM5-1300

M_{TNT} : la masse équivalente TNT

Surpression(mbar)	Distance réduite l(Abaque TM5-1300)(m)
50	22
140	10,1

Tableau 26: Les distances réduites selon l'Abaque TM5 -1300

Donc ; $r_1' = 10.1 (M_{TNT})^{\frac{1}{3}}$

d- Calcul de la masse équivalente TNT

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

Avec ;

M_{butane} : la masse du butane dans le camion -citerne

α : rendement du BLEVE est 10% (taux de confiance=97% D'après Lannoy 1984)

E_{gaz} : représente l'énergie que le combustible considéré peut libérer après combustion.

E_{TNT} : représente l'énergie libérée par l'explosion d'un kg de TNT soit environ 4690 KJ/Kg

A.N :

$$M_{TNT} = 75157.5 \times 0.1 \times \frac{45700}{4690}$$

$M_{TNT} = 73234.49 \text{ Kg}$

Alors ;

$$r_1' = 10.1 (73234.49)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow$$

$r_1' = 416.82$

IV.3.2.3 Calculs de rayon de la zone contrôlée d'après TNO

**a- Rayon de la zone contrôlée correspondante à la dose thermique : 150 kJ/m²
(brûlures 1^{er} degré) [25]**

$$r_2 = \text{RBF} (1.33 \text{ TBF})^{0.5}$$

$$r_2 = 123.77 \times (1.33 \times 15.70)^{0.5}$$

AN :

$r_2 = 565.57 \text{ m}$

**b- Rayon de la zone d'exclusion correspondante à l'effet de surpression : 50 mbar
(Des effets irréversibles) [27]**

$$r_2' = \lambda_1 (M_{\text{TNT}})^{\frac{1}{3}}$$

$$r_2' = 22 \times (73234.49)^{\frac{1}{3}}$$

AN :

$r_2' = 920.44 \text{ m}$

IV.3.2.4 Présentation de différentes zones d'exclusion ; de contrôle et zone de soutien

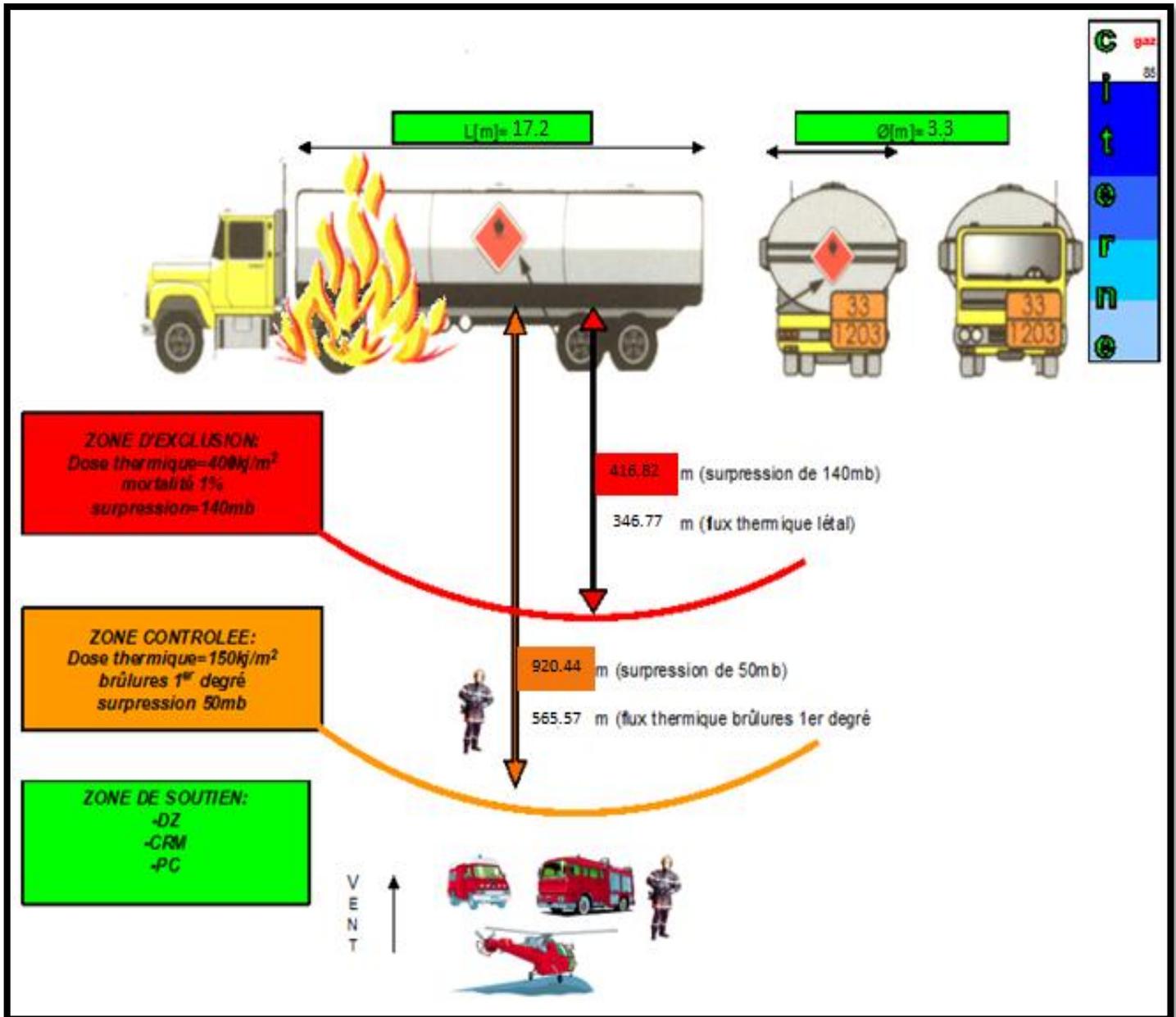


Figure 40: Présentation de différentes zones d'exclusion ; de contrôle et zone de soutien

IV.3.2.5 Estimation des effets du BLEVE des différents camions-citernes

Pour le but de contrôler les effets du BLEVE des différents camions-citernes avec des différents volumes existants en Algérie, nous avons recalculé et récapitulé les résultats dans le tableau suivant :

CYLINDRE		LIQUIDE			EFFETS THERMIQUES				SURPRESSION	
L[m]	Ø[m]	[%]	V[m ³]	M [kg]	RBF[m]	TBF[s]	R létal 1%	R brûlés 1 ^{er} °	140 mb	50mb
1,5	0,3	85	0,09	54,07	11,8512	2,40	12,99	21,19	37,84	83,25
1,5	0,61	85	0,373	223,56	18,7975	3,47	24,78	40,42	60,73	133,61
3	0,96	85	1,846	1107,42	31,6189	5,27	51,33	83,72	103,53	227,77
4,9	1	85	3,271	1962,65	38,0819	6,11	66,60	108,62	125,29	275,64
6,5	1,25	85	6,78	4068	48,2607	7,39	92,79	151,34	159,74	351,44
6,7	2,1	85	19,72	11834,8	68,2845	9,76	150,84	246,02	228,04	501,70
11,8	2,1	85	34,74	20843,4	82,0747	11,30	195,15	318,28	275,40	605,87
13,7	2,75	85	69,16	41498,6	102,661	13,52	266,96	435,40	346,45	762,20
17,2	3,3	85	125	75157,5	124,50	15,78	349,51	570,04	422,06	928,53

Tableau 27: Représentaion des zones d'exclusions et de contrôles des différents volumes des camions-citernes

IV.3.2.6 Conclusion

Afin de délimiter les distances des effets thermiques et de surpressions en cas d'un BLEVE d'un camion-citerne au niveau de la zone de chargement, nous avons calculé les rayons des zones d'exclusion, contrôle et soutien pour protéger les agents de sécurité en respectant ces distances pendant l'extinction.



Prévention Et Intervention

V.1 Introduction

La production, le stockage et l'utilisation d'une quantité toujours croissante de produits dangereux entraînent dans l'industrie une augmentation considérable des risques d'accident majeur. 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 définies.

V.2 Prévention

V.2.1 Introduction

Nombreux sont les risques spécifiques de stockage de GPL, pour réduire les dommages sur le personnel et le matériel, une mise en place d'une politique de sécurité basée sur la prévention des risques et de leur transfert ainsi que les moyens humains et matériels pour une intervention adéquate sont nécessaires.

V.2.2 Prévention des risques d'incendie et d'explosions

Pour les risques d'incendie on se base surtout sur la prévention car si l'incendie se déclare, on aura beaucoup de mal à le contrôler vu la nature de produit stocké et sa quantité, en plus il s'ensuit une explosion dans certain cas.

Prévenir l'incendie c'est de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter la formation de triangle de feu (combustible comburant et source d'énergie).

Le risque d'explosion est le plus fréquent dans le cas de GPL ou il peut être une cause d'incendie (incendie en aval) ou bien une conséquence (incendie en amont), dans le premier cas il faut prévenir l'incendie ou lutter contre l'explosion. Dans le deuxième il faut prévenir l'explosion et lutter contre l'incendie.

Il n'y a pas que la zone de stockage qui est exposé au danger, mais il y a aussi les autres locaux qui se trouvent à proximité de la zone de stockage, car si l'incendie se déclare tout le périmètre est exposé au danger.

V.2.2.1 La prévention des risques au voisinage de la zone de stockage

Parmi les mesures préventives qui tendent à diminuer les risques d'incendies et d'explosion, on peut citer :

- La construction des ateliers et les locaux exposés au danger d'incendie ou d'explosion, doivent être construits en matériaux présentant une résistance suffisante au feu tel que le béton, maçonnerie.
- Équiper les locaux avec des détecteurs de gaz qui détectent les fuites s'il y'en a, et faire des prélèvements avec l'explosimètre pour voir si la concentration du gaz dans le local est dans les normes.
- La maintenance des installations électriques et des mises à la terre doit être constamment surveillé et contrôlé périodiquement selon la législation en vigueur.
- Couper le courant lors du changement des impalas au des fusibles, en présence d'un agent de sécurité.
- Éviter d'allumer des feux nus à côté de ces zones.
- Interdiction d'utiliser les allumettes, briquets et cigarettes.
- Les zones dangereuses doivent être tenue en état de propreté et être complètement débarrassé des débris de chiffon, papiers, bios, herbes sèches et autres éléments combustible.
- Placer des alarmes à l'intérieur de ces locaux pour prévenir en cas d'accident ou d'un problème quelconque.

- Des consignes affichées d'une manière très apparente en fixant à chacun son rôle en cas d'incendie. Indiquant les manœuvres à exécuter.
- Prescrire des essais périodiques par fausse alerte pour vérifier la compétence de personnel et l'état de matériel.
- **Interdit de fumer.**
- **Interdit** l'accès aux étrangers.

V.2.2.2 la prévention des risques dans la zone de stockage

Dans la zone de stockage on trouve les réservoirs contenant le GPL, alors il faut doubler la prévention car le danger est multiplié dans cette partie.

Pour éviter tout problème dans cette zone il faut prendre des mesures afin de diminuer le danger :

- Éviter la sortie à l'atmosphère de produit combustible GPL.
- Limiter la quantité des produits inflammables déchargés.
- Empêcher l'amorçage de produit inflammable sorti accidentellement.
- Éviter l'augmentation de la pression de produit à l'intérieur des réservoirs pour éviter la surpression.

Ces mesures sont en générale pour éviter les pressions excessives, on a prévu pour cela de doubler les soupapes de sécurité.

V.2.3 préventions de la sphère

V.2.3.1 Éléments et dispositifs de Sécurité

a- Soupape jumelée PSV vers atmosphère

Installée sur la partie haute de la sphère, cette soupape s'ouvre pour chasser les gaz vers l'atmosphère lorsque la pression à l'intérieur de la sphère augmente jusqu'à 6,8 Kg/Cm ou encore dans le cas de surpression au niveau des lignes.

b- Système de refroidissement

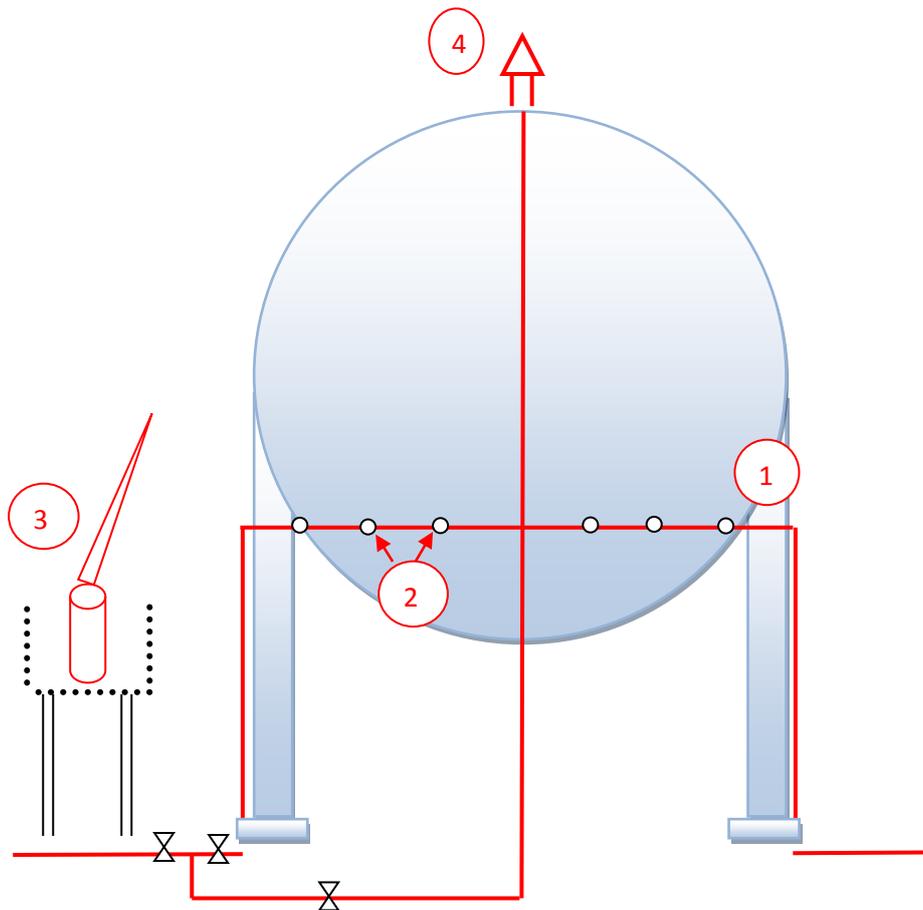
- Couronne de refroidissement sur la partie inférieure de la sphère
- Buses d'arrosage : des pulvérisateurs répartis sur la couronne d'arrosage permettent d'assurer un arrosage homogène sur la paroi basse de la sphère, assure un refroidissement par quadrillage
- Deux (02) lances monitors

Système de déluge sur la partie supérieure de la sphère permet le refroidissement de sa partie supérieure.

Les éléments liés au système de sécurité de la sphère sont présentés dans les figures ci-dessous

Il existe d'autres éléments de sécurité qui garantissent la protection du système tels que :

- Les prises d'eau,
- Trois (03) vannes motorisées liées à un circuit maillé (non exploitées jusqu'à maintenant),
- Les extincteurs à poudre/CO₂,
- Lances monitor mobile,
- Camion de sécurité émulsif, émulsif/eau, à poudre.



- | | |
|---|---------------------------------------------------------------------------|
| 1 | ouronne de refroidissement sur la partie inférieure de la sphère, |
| 2 | ises d'arrosage : des pulvérisateurs répartis sur la couronne d'arrosage, |
| 3 | eux (02) lances monitors, |
| 4 | ystème de déluge. X : Vanne pneumatique manuelle. |

Figure 41: Dispositif de refroidissement de la sphère (S5) des GPL

Remarque 01: Le système de refroidissement présenté dans la figure ci-dessus sert aussi à l'intervention, en plus des camions à poudre de sécurité, des différents extincteurs, rampe d'arrosage, réseau d'incendie maillé.

Remarque 02 : l'absence des couronnes d'arrosage en haut et au milieu de la sphère n'assure pas un arrosage homogène sur la paroi.

V.2.3.2 Des dispositions garantissant la sécurité des sphères

a- Contrôle journaliers des équipements

Des contrôles journaliers des installations sont effectués par les inspecteurs de HSE et les inspecteurs du métal ainsi que les opérateurs en vue de vérifier le bon état des équipements et d'identifier les défaillances éventuelles.

b- Maintenance décennale des sphères GPL

La maintenance décennale se réalise conformément aux exigences réglementaires régissant l'exploitation des appareils à pression de gaz (Décret exécutif N° 90-245 du 18/08/1990 portant réglementation des appareils à pression de gaz).

c- Contrôle des paramètres de fonctionnement :

En règle générale, tous les paramètres de fonctionnement dont la dérive est susceptible d'engendrer un risque sont :

- mesurés.
- enregistrés dans un registre spécial.
- contrôlés par la présence d'alarmes dans la salle de contrôle et éventuellement de dispositifs de sécurité installés sur place.

V.2.3.3 Alarmes et mise en sécurité de la zone de stockage GPL

a- Un réseau d'alarme permet à toute personne apercevant une situation anormale de déclencher l'alarme pour actionner le système de refroidissement des sphères.

b- Les 16 détecteurs de gaz, installés dans la zone de stockage des GPL dont 4 autour de la sphère (S5) sont capables de détecter très tôt une fuite des GPL. Ces détecteurs permettent de détecter et d'agir au même temps.

Les indications des détecteurs de gaz sont comme suit:

- 18 % LIE : première alarme
- 25 % LIE : deuxième alarme
- 30% LIE : troisième alarme

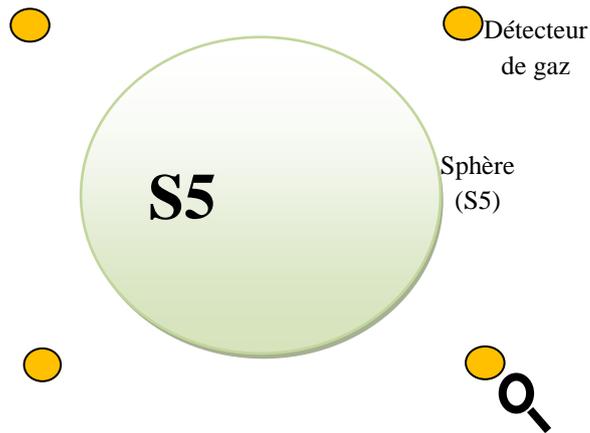


Figure 42: Emplacement des détecteurs de gaz

Un zoom sur le détecteur de gaz -3- est présenté dans la figure suivante :



Figure 43: Détecteur de gaz

V.2.4 Prévention des risques des pressions et phénomènes de BLEVE

V.2.4.1 Protection technologique (mesure d'ordre technique)

- Tenir compte des règlements en respectant les codes de construction (calculs, métaux, épreuves, distance de sécurité...) des sphères.
- Cuvette en pente avec réceptacle déporté.
- Instrumentations suffisantes et adaptée (indicateur de niveau, de pression, de température et de débit...)
- Injection de l'eau sur les équipements (refroidissement)
- Ligne de purge d'eau en pente, calorifuge et tracée avec robinetterie adéquate.
- Vanne de dépression pour diminuer la pression.
- Arrosage déluge ou par pulvérisation en s'assurant de la continuité du film d'eau.
- Arrosage complémentaire localisé par lance moniteur sur le feu de dard

- Rideaux d'eau pour réaliser un barrage à une autre installation
- Détecteurs de gaz et de la fumée.

V.2.4.2 Protections opératoires (mesure d'ordre organisationnel)

- Formation de personnel (exercice simulé et réel sur les fuites et sur les incendies) pour les adapter en cas d'incendie mineur ou grave.
- Respect des consignes opératrices manœuvre de purge.
- Vérification périodique d'organes de sécurité et de protection incendie.
- Vérification quotidienne des moteurs et des pompes.

Avant de recevoir la sphère et avant la mise en service, on doit avoir le dossier d'épreuves qui doit obligatoirement contenir les résultats des épreuves tel que :

- Les conditions d'utilisation et du service
- La forme et diamètre
- Les épaisseurs minimales et principales
- Implantation et la nature des soudures
- La note et la procédure du calcul
- Contrôler l'état des réservoirs quotidiennement.

Un programme de contrôle comme suite :

- Une visite extérieure tous les trois ans.
- Une visite intérieur tous les trois ans.

Les contrôles doivent toucher :

- Contrôle de l'étanchéité du fond
- État de peinture intérieur et extérieur
- Essai de pression et de dépression
- Le contrôle des soupapes de sécurité
- Le contrôle de dispositif d'indication de niveau
- Le contrôle de la mise à la terre

V.2.4.3 Protection contre la foudre

Les sphères de stockage des GPL de fait qu'elles sont installées sous l'air libre, donc elles sont exposées à un risque potentiel de la foudre, alors elles nécessitent des mesures de protection contre la foudre, tel que le paratonnerre. Cette opération consiste à écouler les charges électriques de la foudre vers la terre.

Si un coup de foudre tombe sur une sphère de GPL il peut aller jusqu'à la percer en produisant une fuite de GPL allumé, donc on aura une explosion. Pour cela on a prévu de renforcer l'épaisseur de **la robe** de la sphère afin d'éviter les percements.

Toutes les accessoires tuyauteries doivent être reliées à la sphère qui est relié au paratonnerre afin d'éviter l'électrocution des opérateurs dans le site.

V.2.4.4 Protection contre la corrosion

La protection des sphères de stockages de GPL contre la corrosion par la mise en place d'une protection cathodique, a pour but d'empêcher la corrosion des parois métalliques ainsi que le sol du réservoir (fond) afin d'éviter les fuites, car la corrosion consiste à user le métal par diminution de son épaisseur en produisant un orifice (corrosion par pic).

V.3 Mesures d'intervention (lutte contre l'incendie)

La réserve d'émulseur maintenue sur le site doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- **La temporisation** : en attendant l'arrivée de l'ensemble des moyens nécessaires pour effectuer l'extinction, estimée à environ 60 minutes
- **L'extinction du feu** : estimée à 20 minutes. Cette première phase permet d'agir face au feu, en ayant pour objectif, la diminution d'intensité, la protection des installations et limitation des risques de propagation.

Pour la réalisation de ces missions, seules les lances canon d'un débit supérieur à 1000 l/mn sont prises en compte

V.3.1 Moyens de lutte contre l'incendie

V.3.1.1 Le réseau d'eau

Cette réserve doit pouvoir assurer la production de solution moussante et la protection des réservoirs menacés.

V.3.1.2 Le débit d'eau

Ce débit, fixé par arrêté préfectoral, doit:

Éteindre en 20 minutes un feu sur le réservoir le plus important, tout en assurant son refroidissement et la protection des installations voisines.

Être égal à la plus grande valeur calculée selon les hypothèses suivantes :

- Débit de solution moussante pendant 20 minutes sur le toit du réservoir le plus contraignant.
- Refroidissement du réservoir en feu sur la base de 15 l/mn/m² de circonférence.
- Débit de solution moussante pour contrôler le feu pendant 60 minutes en fonction de la catégorie la plus contraignante.
- Protection des installations voisines dans un rayon de 50 mètres avec des rideaux d'eau à 500 l/mn pour une portée de 30 mètres et à 1000 l/mn pour une portée de 40 mètres.

V.3.1.3 La réserve d'émulseur

- Remplacement des fûts de 200 litres par des conteneurs de 1000 litres minimum.
- Si le dépôt est mixte, hydrocarbures et produits polaires, la réserve doit être faite à base d'émulseur polyvalent.
- La réserve doit être égale à la somme des deux quantités suivantes:
 - Réserve permettant d'éteindre un feu sur le réservoir le plus contraignant en 20 minutes.
 - Réserve permettant de contrôler un feu dans la plus grande cuvette et la plus contraignante, pendant 60 minutes.

V.3.1.4 Taux d'application

$T=Q/S$ Exprimé en litres/minute/m²

Le **taux d'application** est la combinaison du **débit** en litres/minute et de **surface** en m²

Il varie en fonction de divers paramètres que sont la **nature** du liquide combustible sa température, l'**épaisseur** de la couche du liquide portée à haute température, le mode d'**application** de cette mousse et le **type** d'émulseur utilisé.

La connaissance du taux d'application recommandé pour un émulseur, est primordiale dans la **détermination des moyens** nécessaires pour mener à bien les opérations d'attaques. Il permettra de définir:

- Les besoins en eau.
- La quantité d'émulseur nécessaire.
- La quantité de matériels à mettre en œuvre.
- Le personnel nécessaire pour l'intervention.

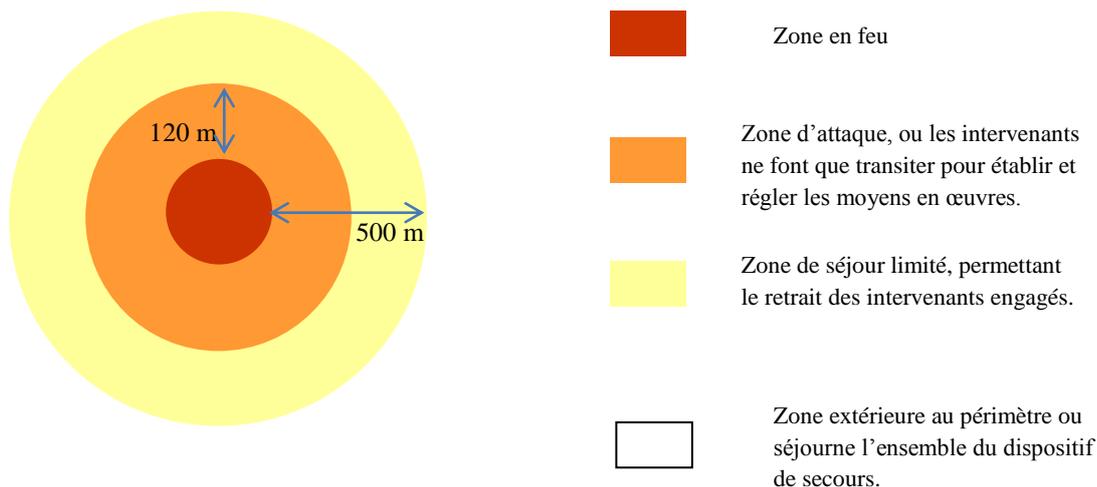


Figure 44: Zone extérieure au périmètre ou séjourne l'ensemble du dispositif de secours

V.3.1.5 Aménagement du dépôt

- Les réservoirs de liquides volatils > **1500 m³**, doivent être dotés de toit ou écran flottant.
- Les vannes de pied de bac doivent être de type « **sécurité feu** », commandables à distance.
- Les pompes de transfert doivent être équipées d'une **temporisation** arrêtant le fonctionnement en cas de débit nul.
- Les zones de type I sont équipées de **détecteurs** d'hydrocarbures avec report d'alarme.
- Les cuvettes situées à **moins de 100 mètres** des bâtiments existants, doivent être équipées de déversoirs à mousse.

V.3.1.6 Facteurs aggravants

- La nature du liquide combustible (volatilité et miscibilité avec l'eau)
- La température du liquide combustible, rayonnement, hauteur de la flamme... etc.
- Épaisseur et dimension de la couche en feu.
- La nature des infrastructures.
- Mode d'application de la mousse (directe ou indirecte)
- Conditions météorologiques (vent, pluie)
- Chaleur.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les différents types des réservoirs de stockage	8
Tableau 2 : Les produits dangereux présents au niveau de la zone de stockage	9
Tableau 3: Exemple d'un incendie	27
Tableau 4: Les différents types de BLEVE à différent nature de réservoir	29
Tableau 5: Exemple : acier A 52.....	31
Tableau 6: Tableau d'une comparaison entre un BLEVE froid et un BLEVE chaud	38
Tableau 7: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression thermique sur l'Homme.....	40
Tableau 8: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques sur les structures	41
Tableau 9: Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression sur les structures	41
Tableau 10: Quelques exemples des BLEVE	42
Tableau 11: La vitesse de vent en fonction de la hauteur de la flamme	53
Tableau 12: Paramètres caractéristiques les effets du BLEVE de butane	61
Tableau 13: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de butane d'après TNO.....	63
Tableau 14: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE d'après TRC	64
Tableau 15: Les zones d'effets missile du BLEVE de butane.....	66
Tableau 16: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de butane par PHAST	70
Tableau 17: Tableau comparatif des résultats obtenus	71
Tableau 18: La variation du DBF en fonction de la masse	72
Tableau 19: La variation du DBF en fonction du temps avec des différents taux de remplissages	74
Tableau 20: Les zones d'effets missile du BLEVE d'une sphère de propane	77
Tableau 21: Un tableau récapitulatif des différents résultats obtenu par ALOHA.....	79
Tableau 22: Paramètres caractéristiques les distances retenues du BLEVE de propane par PHAST	81
Tableau 23: Récapitulation des résultats du BLEVE de propane obtenus.....	82
Tableau 24: La variation du DBF de propane en fonction de temps	83
Tableau 25: Paramètres caractéristiques des effets du BLEVE d'un camion-citerne de butane	88
Tableau 26: Les distances réduites selon l'Abaque TM5 -1300.....	89
Tableau 27: Représentaion des zones d'exclusions et de contrôles des différents volumes des camions-citernes.....	92

Liste des figures

Figure 1: Vue satellite sur la raffinerie d'Alger.....	3
Figure 2: Schéma synoptique de la raffinerie d'Alger.....	7
Figure 3: Les trois modes de stockage pour des liquides avec point normal d'ébullition (PNE) inférieur à la température ambiante.....	12
Figure 4: Bac de stockage cryogénique	14
Figure 5 : Réservoir cylindrique horizontal	15
Figure 6 : Sphère sur poteaux.....	16
Figure 7: Schéma descriptif des équipements de la sphère. « S5 ».....	17
Figure 8: Sphère existante sous talus	19
Figure 9: Réservoir GPL 1500 m ³ sur lit de sable.....	20
Figure 10: Réservoir de gaz liquéfié sous talus sur support.....	21
Figure 11: Phénomène du Boil-over	23
Figure 12: Phénomène du Froth-over	24
Figure 13: Mécanisme de la combustion auto-entretenu.....	26
Figure 14: Feu de cuvette à l'origine d'une fuite	26
Figure 15: Déformation de la paroi non mouillée du réservoir et initiation du BLEVE	30
Figure 16: Évolution de la température de la paroi en fonction du temps	31
Figure 17: Graphe sur l'évolution de la pression et de la résistance du métal avec la température (échelles non linéaires).....	32
Figure 18: Évolution de la hauteur du centre de la boule de feu en fonction du temps.....	33
Figure 19: Courbes de tension de vapeur et droite limite de surchauffe.....	34
Figure 20: Réservoir rempli d'un gaz liquéfié avec un ciel gazeux sous pression	35
Figure 21: Deux de pression par détente de ciel gazeux puis par ébullition violente.....	36
Figure 22: Mécanisme de surchauffe et de rupture du réservoir – évacuation de la chaleur par convection et par rayonnement.	36
Figure 23: Rupture de réservoir-ondes de surpression avec projection de débris puis boule de feu créée par la combustion du mélange gaz/air avec rayonnement intense	37
Figure 24: Inclinaison de la flamme sous l'effet du vent.....	47
Figure 25: Le diagramme logique de calcul de rayonnement d'une nappe en feu.....	50
Figure 26: Graphe de l'évolution de la hauteur de la flamme en fonction de la vitesse du vent	53
Figure 27: Schéma analogique d'une flamme de butane	54
Figure 28: variation de F_{21} en fonction de X/R.....	56
Figure 29: Les zones des effets thermiques d'un BLEVE par logiciel ALOHA	68
Figure 30: Vue satellite des zones des effets thermiques du BLEVE de butane dans la raffinerie d'Alger.....	69
Figure 31: Graphe représente la variation de l'effet de surpression du BLEVE de butane en fonction de distance.....	69
Figure 32: Graphe représente la variation de l'effet thermique du BLEVE de butane en fonction de distance.....	70
Figure 33: Variation du diamètre de la boule de feu en fonction de taux de remplissage	73

Figure 34: Graphe représente l'évolution de DBF en fonction du temps et taux de remplissage.....	74
Figure 35: Un tableau récapitulatif des différents résultats obtenus	75
Figure 36: Les zones des effets thermiques d'un BLEVE de propane par logiciel ALOHA .	79
Figure 37: Graphe représente la variation de l'effet de surpression du BLEVE de propane en fonction de distance.....	80
Figure 38 : Graphe représente la variation de l'effet thermique du BLEVE de propane en fonction de distance.....	81
Figure 39: Graphe comparatif de l'évolution du DBF du butane et propane en fonction du temps.	83
Figure 40: Présentation de différentes zones d'exclusion ; de contrôle et zone de soutien	91
Figure 41: Dispositif de refroidissement de la sphère (S5) des GPL.....	96
Figure 42: Emplacement des détecteurs de gaz	98
Figure 43: Détecteur de gaz	98
Figure 44: Zone extérieure au périmètre ou séjourne l'ensemble du dispositif de secours ..	101

Bibliographie

- [1] Sonatrach. *Présentation de la raffinerie d'Alger*.
- [2] (01-janvier-2006). *Manuel opératoire carburant (MO PROD 01)* .
- [3] bertin. *Etude de danger Sonatrach/Activité Aval/Division raffinage Alger.chapitre B5: stockages*. 2009.
- [4] IAP, S. i. *Parc de stockage* . Skikda,Algerie.
- [5] ENSPM formation industrie, I. t. (13-7-2005). *Stockage des gaz liquéfiés*.
- [6] mémoire. (2007-2008). *les différents risques liés au stockage des hydrocarbures*. boumerdes.
- [7] Sonatrach. *Risques majeurs. Raffinerie d'Alger / Sphère de stockage des GPL*.
- [8] INERIS. (Juin 2007) . *Les boil over et autres phénomènes générant des boules de feu concernant les bacs des dépôts de liquides inflammables* .
- [9] *Le dictionnaire du sapeur-pompier* . (s.d.). Récupéré sur <https://dictionnairepompier.wordpress.com/2014/06/12/froth-over-2/>
- [10] *Wikipedia*. (s.d.). Récupéré sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Slop_over
- [11] *Explosion de gaz à l'air libre -UVCE- (Les phénomènes dangereux associés aux GPL)* . (Décembre 2006).
- [12] INERIS. (2014). *INERIS (feux de nappe)*. Récupéré sur <http://primarisk.ineris.fr/taxonomy/term/1466>
- [13]
- [14] CLEFS.CEA. (2002-2003). *La simulations des feux d'hydrocarbures*.
- [15] FKG. *Etude expertise & controle industriel -feu de nappe-*.
- [16] ARIA, R. d. *Résultats de recherche d'accidents sur www.aria.developpement-durable.gouv.fr*. 14/05/2016.
- [17] ENSPM Formation industrie, I. t. (2005). *PHÉNOMÈNES DE LA COMBUSTION (phénomène du BLEVE)*.
- [18] sectoriel, G. (7 de décembre 2006). *Le BLEVE -Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie-*.
- [19] INERIS. (Septembre 2002). *Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (Le BLEVE,Phénoménologie et modélisation des effets)*.
- [20] Mr. Zouaneb Abdelkader, M. .. (2014). *Mémoire fin d'étude master, Analyse des risques et modélisation des conséquences d'explosion d'une sphère GPL*. Faculté d'Oran.

- [21] iracle. *Le B.L.E.V.E* -<http://www.iracle.fr.st->.
- [22] Bénichou, N. (November 2002). *FIERAsystem Enclosed Pool Fire Development Model: Theory Report*. Canada.
- [23] INERIS. (2014). *Modélisations de feux industriels de liquides*.
- [24] *dictionnaire du sapeur pompier* . (2012, 06 12). Récupéré sur <https://dictionnairepompier.wordpress.com/2014/06/12/taux-dapplication/>
- [25] Mme.Benrahou. (2015-2016). *Phénomènes dangereux-BLEVE-*.
- [26] UFIP. (juillet 2002). *GUIDE METHODOLOGIQUE UFIP POUR LA RÉALISATION DES ÉTUDES DE DANGERS EN RAFFINERIES, STOCKAGES ET DÉPÔTS DE PRODUITS LIQUIDES ET LIQUEFIÉS*. France.
- [27] Sonatrach. (2012-2013). *Calcul-BLEVE- d'un camion citerne* .
- [28] Marx, W. E. (September 28 - October 1, 1999). *AN IMPROVED MODEL FOR THE PREDICTION OF RADIANT HEAT FROM FIREBALLS*. San Francisco, California.

Liste d'abréviations

GPL Gaz de pétrole liquéfié

HSE Hygiène, Sécurité et Environnement

Unité 100 : Topping Unité de distillation atmosphérique

Unité 200 : Platforming Unité de reforming catalytique

Unité 300 : gaz plant Unité de traitement du gaz

Essence SR **Essence super**

Fuel BTS Fuel à très basse teneur en soufre

PNE Point d'ébullition normale

Technigaz Une société française d'ingénierie navale

S5 Sphère de stockage du butane dans la raffinerie d'Alger

UVCE Unconfined Vapour cloud Explosion

BLEVE Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

TLS Température limite de surchauffe

TNO (Organisation Néerlandaise de recherche scientifique et appliquée)

ALOHA Areal Locations of Hazardous Atmospheres

PHAST Process Hazard Analysis Software Tool (Processus d'analyse des risques Outil logiciel).

Table des matières

Introduction	1
---------------------------	----------

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Alger

I.1 Introduction.....	2
I.2 Situation géographique	3
I.3 Historique de la raffinerie	3
I.4 Capacité de production.....	4
I.5 La réception du brut	4
I.6 Organisation du département HSE.....	4
I.6.1 Service intervention	5
I.6.2 Service prévention.....	5
I.6.3 Cellule environnement	5
I.7 Présentation des unités de la raffinerie.....	6
I.7.1 Unité de distillation atmosphérique du brut « unité 100: Topping »	6
I.7.2 Unité de reforming catalytique « unité 200: Platforming »	6
I.7.3 Unité de traitement du gaz « unité 300 : gaz plant ».....	6
I.8 La zone de stockage de la raffinerie.....	8
I.8.1 Description des stockages	8
I.8.1.1 Stockage des GPL	8
I.8.1.2 Stockage des liquides inflammables	8
I.8.1.3 Autres stockages	9
I.8.2 Présentation des potentiels de dangers	9
I.8.2.1 Potentiels de dangers liés aux produits	9
I.8.2.2 Potentiels de dangers liés aux stockages	10

Chapitre II: Stockage des gaz liquéfiés

II.1 Introduction	11
II.2 Les différents modes de stockage des gaz liquéfiés.....	12
II.2.1 Stockages sous pleine pression.....	13
II.2.2 Stockage semi-réfrigérés	13
II.2.3 Stockages réfrigérés et cryogéniques.....	13
II.3 Les différents types des réservoirs de stockage des gaz liquéfiés	14
II.3.1 Réservoirs cryogénique	14

II.3.1.1 Stockage aérien	14
II.3.1.2 Stockage en cavités réfrigérées.....	14
II.3.2 Stockages aérien sous forte et faible pression	15
II.3.2.1 Réservoir cylindrique horizontal (Cigare)	15
II.3.2.2 Réservoir cylindrique vertical.....	16
II.3.2.3 Réservoir sphérique	16
II.3.2.4 Sécurité incendie de stockage aérien sous forte et faible pression	18
II.3.3 Stockage sous terrains et sous talus sous pression.....	19
II.3.3.1 Réservoir sous terrains.....	19
II.3.3.2 Réservoir sous talus	19
II.4 Conclusion	21

Chapitre III: les phénomènes dangereux liés au stockage des hydrocarbures

III.1 Introduction	22
III.2 Boil-over.....	23
III.3 Froth-over	23
III.4 Slop-over	24
III.5 UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion).....	24
III.6 Les feux de nappe.....	25
III.6.1 Définition	25
III.6.2 Les différents cas de feu de nappe.....	25
III.6.3 Description du phénomène	25
III.6.4 Origines de la nappe	26
III.6.5 Exemple réel d'un incendie [16]	27
III.7 BLEVE : « Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion » « Explosion due à l'expansion des vapeurs d'un liquide en ébullition ».....	28
III.7.1 Définition du BLEVE.....	28
III.7.2 Produits concernés.....	28
III.7.3 Equipements concernés	28
III.7.4 Origines du BLEVE	29
III.7.5 Déroulement du BLEVE : gaz liquéfiés combustibles	30
III.7.5.1 Scénario	30
III.7.6 Les conditions nécessaires au BLEVE	33
III.7.7 Les différents types de BLEVE.....	35
III.7.7.1 BLEVE « Froid »	35
III.7.7.2 BLEVE « Chaud ».....	36
III.7.7.3 Comparaison synthétique des BLEVE « froids » et « chauds »	38

III.7.8 BLEVE des gaz liquéfiés non combustibles	39
III.7.9 Modélisation des conséquences du BLEVE.....	39
III.7.10 Modélisation des effets du BLEVE.....	39
III.7.10.1 Effets Thermiques	39
III.7.10.2 Effets de surpression.....	41
III.7.10.3 Effets missiles.....	42
III.7.11 Quelques BLEVE connus dans le monde [16].....	42
III.8 Conclusion.....	43

Chapitre IV: Calculs du BLEVE et feu de nappe

IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Modélisation des conséquences d'un feu de nappe.....	45
IV.2.1 Description de la technique des modèles de feux de nappe	45
IV.2.2 Modèle théorique	45
IV.2.2.1 La quantité brûlée.....	45
IV.2.2.2 La taille de nappe	46
IV.2.2.3 La géométrie de la flamme	46
a- La taille de la flamme (hauteur)	46
b- Inclinaison de la flamme	47
IV.2.2.4 La puissance émise.....	47
a- Le modèle de « point source ».....	48
b- Le modèle de « radiation»	48
IV.2.2.5 Le facteur géométrique de vue	48
IV.2.2.6 Le flux thermique reçu	48
IV.2.3 Modèle pratique « Scénario: Rayonnement d'une nappe de Butane".....	49
IV.2.3.1 Étapes de calcul.....	50
IV.2.3.2 La quantité brûlée.....	50
IV.2.3.3 Le diamètre maximum de la nappe	51
IV.2.3.4 La taille de la flamme.....	51
a- La hauteur de la flamme	51
b- Evaluation de la hauteur de la flamme en fonction de la vitesse du vent.....	52
c- L'inclinaison de la flamme	53
IV.2.3.5 Le dimensionnement du point de source.....	53
a- Calcul de facteur de vue	54
b- Calcul de la pression partielle de l'eau	54
c- Calcul de la transmittivité atmosphérique	55
d- Calcul de flux thermique reçu par le récepteur.....	55

IV.2.3.6 Le model de solid-plume radiation.....	55
a- Calcul de flux rayonne à la source	55
b- Détermination de facteur géométrique de vue.....	55
c-Le flux rayonné au récepteur est déterminé à partir d'Eq (VI.10)	56
IV.2.4 Extinction d'un feu de nappe	56
IV.2.5 Conclusion	58
IV.3 modélisation des conséquences du BLEVE	58
IV.3.1 Etude comparative entre BLEVE du butane et propane.....	59
IV.3.1.1 Cas N°01 : la sphère du butane (S5) est remplie à 85%	59
a- Modélisation par méthode classique (formule de calcul)	59
b- Modélisation par méthode numérique	67
c- Comparaisons des résultats des différentes méthodes classiques et numériques du BLEVE de butane	71
d- Evaluation de diamètre de la boule de feu du butane	72
IV.3.1.2 Cas N°02 : La sphère de propane est remplie à 85%	75
a- Modélisation par méthode classique	75
b- Modélisation par méthode numérique	79
c- Récapitulation des résultats des différentes méthodes classiques et numériques du BLEVE de propane	82
d- Évaluation de diamètre de la boule de feu du butane et propane	83
IV.3.1.3 Conclusion.....	84
IV.3.1.4 Les Impacts du BLEVE sur les infrastructures et les installations de la raffinerie d'Alger	85
IV.3.2 BLEVE d'un Camion-citerne de butane rempli à 85%	87
IV.3.2.1 Estimation des effets du BLEVE	87
IV.3.2.2 Calculs de rayon de la zone d'exclusion d'après TNO	88
IV.3.2.3 Calculs de rayon de la zone contrôlée d'après TNO	89
IV.3.2.4 Présentation de différentes zones d'exclusion ; de contrôle et zone de soutien	91
IV.3.2.5 Estimation des effets du BLEVE des différents camions-citernes	92
IV.3.2.6 Conclusion.....	92

Chapitre V: Prévention et Intervention

V.1 Introduction	93
V.2 Prévention.....	94
V.2.1 Introduction	94
V.2.2 Prévention des risques d'incendie et d'explosions	94
V.2.2.1 La prévention des risques au voisinage de la zone de stockage	94
V.2.2.2 la prévention des risques dans la zone de stockage	95

V.2.3 préventions de la sphère	95
V.2.3.1 Éléments et dispositifs de Sécurité	95
V.2.3.2 Des dispositions garantissant la sécurité des sphères	97
V.2.3.3 Alarmes et mise en sécurité de la zone de stockage GPL.....	97
V.2.4 Prévention des risques des pressions et phénomènes de BLEVE.....	98
V.2.4.1 Protection technologique (mesure d'ordre technique).....	98
V.2.4.2 Protections opératoires (mesure d'ordre organisationnel).....	99
V.2.4.3 Protection contre la foudre	99
V.2.4.4 Protection contre la corrosion.....	100
V.3 Mesures d'intervention (lutte contre l'incendie)	100
V.3.1 Moyens de lutte contre l'incendie	100
V.3.1.1 Le réseau d'eau.....	100
V.3.1.2 Le débit d'eau	100
V.3.1.3 La réserve d'émulseur	100
V.3.1.4 Taux d'application.....	101
V.3.1.5 Aménagement du dépôt.....	101
V.3.1.6 Facteurs aggravants	102
Conclusion et recommandation.....	102