

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
X•O٧•EX •K||E C:K:IA •||K•Z - X:OEO:t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Département Génie mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de  
Fin d'étude**

Filière : Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenter Par :

**MIDOUNE RAID**

**Thème**

***EVALUATION DES RISQUES LIE AU STOCKAGE DE  
GPL***

La date :

Devant le jury composé de :

Président :

Examineur :

Examineur :

Proposé et dirigé par : A.LAOUARI

Année Universitaire 2019-2020

# *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail ;*

*Nos vifs remerciements sont destinés à Monsieur A.Laouari, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire ;*

*Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents, sœurs et frères et amis pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous ;*

*Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail ;*

*Sans oublier, tous les enseignants de département génie mécanique ;*

*Et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant toute la période de faire ce travail ;*

*Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.*



*DIDICASSE*

*Je dédie ce travail*

**A**

**Mes chers grands parents et Mes chères  
tantes**

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et l'estime que j'ai pour vous...*

*Symboles de bonté par excellence, vous êtes la source de tendresse et de dévouement qui n'a cessé de m'encourager et de prier pour moi...*

*Que Dieu Tout Puissant vous protège et vous accorde santé et longue vie...*

**A**

**Mes chers parents, Frères et Sœurs**

*Pour leur aide, leur affection et leur amour. Puisse Dieu vous donner une vie pleine de succès, de joie et de bonheur...*

**A**

**Tous mes amis(es)**

*Pour leur loyauté, encouragement, soutien et engagement...*

**A**

*Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce  
travail...*

*M. RAID*

## Sommaire

*I-Remerciement*

*II-Dédiassse*

*III- Table des figures*

*IV- Liste des tableaux*

*V- Résumé (FR-ENG-AR)*

*VI- Mots clés*

*Introduction générale..... 01*

### **Chapitre I**

#### **Caractéristiques du GPL**

*I-1. Historique des GPL..... 03*

*I-2. Généralités sur le GPL..... 04*

*I-3. Origine du GPL..... 04*

*I-4. La Production des GPL..... 05*

*a- Les champs de gaz..... 05*

*b- Les raffineries de pétrole..... 05*

*I-5. Caractéristique du GPL..... 06*

*I-5-1. Données de combustion ..... 06*

*I-5-2. Point d'ébullition et la masse volumique..... 08*

*I-5-3. Formule chimique du GPL (propane, Butane)..... 08*

*I-6. Utilisation du GPL..... 09*

*I-7. Avantages et inconvénients techniques des GPL..... 12*

*I-8. Demande nationale des GPL..... 13*

*I-9. Consommation mondiale de GPL..... 14*

*Conclusion..... 15*

### **Chapitre II**

#### **Techniques de stockage du GPL**

*II-1. Stockage du GPL ..... 16*

<i>II-2.Types réservoirs de stockage du GPL.....</i>	<i>16</i>
<i>II-2-1.Stockage sous pression.....</i>	<i>16</i>
<i>II-2-2. Stockage sous terrain.....</i>	<i>17</i>
<i>II-2-3. Stockage réfrigéré.....</i>	<i>18</i>
<i>II-2-4. Stockage dans une sphère.....</i>	<i>19</i>
<i>II-3.Types de stockage.....</i>	<i>22</i>
<i>II-4. Distribution.....</i>	<i>22</i>
<i>II-4-1. Réseau de transport par canalisation.....</i>	<i>22</i>
<i>II-5. Pompage du GPL.....</i>	<i>23</i>
<i>II-6. Transport des GPL.....</i>	<i>25</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>28</i>

### **Chapitre III**

#### **Les déferents risques liés au stockage de GPL**

<i>III-1. Introduction.....</i>	<i>29</i>
<i>III-2. BLEVE.....</i>	<i>29</i>
<i>III-2-1. Définition.....</i>	<i>29</i>
<i>III-2-2. Description du phénomène.....</i>	<i>30</i>
<i>III-2-2-1. Combustion interne et température limite de surchauffe.....</i>	<i>31</i>
<i>III-2-2-2. Tenue à la pression et éclatement.....</i>	<i>31</i>
<i>III-2-2-3. Émission de projectiles.....</i>	<i>32</i>
<i>III-2-3. Effets thermiques de la boule de feu.....</i>	<i>32</i>
<i>III-2-4. Les causes identifiées de BLEVE.....</i>	<i>33</i>
<i>III-2-5. Conséquence d'un BLEVE.....</i>	<i>33</i>
<i>III-3.UVCE.....</i>	<i>34</i>
<i>III-3-1.Définition de L'UVCE.....</i>	<i>34</i>

III-3-2. Les facteur sont.....	34
III-3-3. Etapes de développement d'un UVCE.....	35
III-3-4. Les effets générés par UVCE.....	36
III-3-5. Les conditions doivent être réalisées simultanément pour avoir un UVCE.....	37
III-3-6. Des méthodes de calculs sont utilisées pour avoir une modélisation des effets.....	38
III-4. Le feu de nappe.....	38
III-4.1 Rappel sur le feu de nappe.....	38
III-5. Le Jet Enflammé.....	38
III-5-1.Rappel sur le jet enflammé.....	38
Conclusion.....	39

## **Chapitre IV**

### **Partie calcule**

IV-1.Introduction.....	40
IV-2.UVCE (Méthode équivalent TNT).....	40
a) Equivalant masse TNT et surpression.....	40
b) L'expression analytique de surpression.....	42
IV-3.BLEVE (Boule de feu, Fragments).....	43
IV-3-1.Définition .....	43
IV-3-2. Dimensions et durée d'une boule de feu .....	43
a) Méthode Roberts Selon Roberts [Roberts 1982].....	44
b) TNO Méthode .....	44
IV-3-3. Taux de combustion .....	45
IV-3-4.Puissance d'émission de surface maximale.....	46
IV-3-5. Puissance d'émission réelle en surface .....	46
IV-3-6. Le facteur de vue.....	47
IV-3-7. Flux de chaleur.....	48
IV-3-2. Paramètre des fragments .....	48
IV-3-2-1. Calcul de la vitesse des fragments.....	49
IV-3-2-2. Calcul de la portée maximale des fragments.....	51
Exemple 01.....	53
Exemple 02.....	56
Exemple 03.....	57
Exemple 04.....	59

*Conclusion*..... 60

***Conclusion générale***

*Conclusion générale*..... 61

<b>Table des figures</b>	
<b>Figure I.1 : Les produits issus de la distillation du pétrole brut</b> .....	06
<b>Figure I.2 : C4 H10</b> .....	09
<b>Figure I.3 : C3 H8</b> .....	09
<b>Figure I.4 : Utilisation du GPL dans la cuisiner</b> .....	10
<b>Figure I.5 : Les utilisations industrielles du GPL</b> .....	11
<b>Figure I.6 : La demande nationale des GPL</b> .....	13
<b>Figure I.7 : Répartition de la demande du GPL</b> .....	14
<b>Figure II.1 : réservoir de forme cigare</b> .....	16
<b>Figure II.2 : réservoir sous talus</b> .....	17
<b>Figure II.3 : réservoir sous terrain (forme cylindrique)</b> .....	18
<b>Figure II.4 : réservoir réfrigéré (forme sphérique)</b> .....	19
<b>Figure II.5 : réservoir sphérique</b> .....	20
<b>Figure II.6 : Compresseur ballon</b> .....	24
<b>Figure II.7 : les pompes</b> .....	25
<b>Figure II.8 : Transport de GPL par canalisations</b> .....	26
<b>Figure II.9 : Transport du GPL par wagon- citernes</b> .....	27
<b>Figure II.10 : Transport du GPL par bateaux</b> .....	27
<b>Figure II.11 : Transport du GPL par camions-citernes</b> .....	28
<b>Figure III.1 : accidents de la raffinerie ELF de Feyzin en 1984(MEXICO)</b> .....	30
<b>Figure III.2 : Etapes de développement d'un BLEVE</b> .....	32
<b>Figure III.3: UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion)</b> .....	34
<b>Figure III.4 : Etapes de développement d'un UVCE</b> .....	36
<b>Figure IV.1 : la Surpressions en fonction de la distance de mise à l'échelle</b> .....	41
<b>Figure IV.2 : la Surpression en fonction de la distance.</b> ....	42
<b>Figure IV.3 : Graphe de Comparaison des méthodes de Roberts et TNO</b> .....	45
<b>Figure IV.4 : Boule de feu</b> .....	47
<b>Figure IV.5 : Vitesse adimensionnelle du fragment en fonction de la pression adimensionnelle</b> .....	49

<b>Figure IV.6 :</b> Facteur d'ajustement $K$ pour la masse des fragments d'après Baker et Al (1983).....	51
<b>Figure IV.7 :</b> Courbes échelonnées pour les prédictions de gamme de fragments (Baker et al.1983)...	53
<b>Figure IV.8 :</b> Graphe Flux chaleur en fonction de diamètre de la flamme.....	55

<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Tableau I.1 :</b> La masse volumique et le point d'ébullition des GPL.....	08
<b>Tableau I.2 :</b> Consommation mondiale des GPL.....	15
<b>Tableau III.1 :</b> Effets (causes et Résultats) d'un UVCE.....	37
<b>Tableau IV.2 :</b> La surpression en fonction de la distance.....	60



## Mots clés

**GPL** : Gaz Propane Liquéfiée ;

**GNL** : Gaz Naturel Liquéfiée ;

**PCI** : Pouvoir Calorifique Inferieure ;

**PCS** : Pouvoir Calorifique Supérieure ;

**BLEVE**: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion;

**UVCE**: Unconfined Vapour Cloud Explosion;

## *Introduction générale*

### **Introduction générale**

L'énergie occupe une place primordiale dans le développement économique dans le monde, qui dépend essentiellement de la valorisation des hydrocarbures (pétrole et gaz).

Les gaz de pétrole liquéfié GPL est un gaz liquéfié à faible pression contenant un ou plusieurs hydrocarbures légers qui est principalement constitué de propane, de propène, de butane, des isomères du butane, de butène avec des traces d'autres gaz d'hydrocarbures. Le propane et le butane en sont les constituants principaux. Le gaz de pétrole peut être stocké et/ou manipulé en phase liquide dans des conditions de pression modérées et à température ambiante (Lim, 2008; Pierini, 2015).

Les GPL proviennent principalement des champs de gaz naturel pour plus de 60%, et pour moins de 40% du raffinage du pétrole brut. En effet, en chauffant du pétrole, on obtient environ 2 à 3% de GPL. Les GPL sont stockés dans des réservoirs aériens, sous talus ou cavernes, puis ils sont acheminés jusqu'au client final. Le GPL consommé en Europe provient principalement du Royaume-Uni, de la Norvège et du pourtour méditerranéen (Lim, 2008; Pierini, 2015). Le transport des GPL obéit à la réglementation du transport des marchandises dangereuses: l'ADR (Accord Européen relatif au Transport International des marchandises Dangereuses par Route), et le RID (Règlement concernant le Transport International Ferroviaire des Marchandises Dangereuses).

Les GPL présentent plusieurs risques, qui ne cessent d'augmenter lors de l'exploitation, le transport et le stockage parmi ces risques, on cite les risques d'incendie et les risques d'explosion.

Ces risques peuvent entraîner plusieurs sinistres dont les conséquences sont:

-Conséquences humaines: tel que les maladies, les blessures, le décès etc....

-Conséquences matérielles: dommages, pertes de productivité et perte de la qualité.

Dans notre travail, nous avons étudié la présentation des caractéristiques du GPL ainsi que le stockage de GPL, et on a identifié et analysé les risques liés à ce stockage et en fin les différents méthodes de calcul des paramètres liés à ces risques (UVCE, BLEVE).

Pour arriver à ce but, ce mémoire est composé de 04 chapitres:

Dans le 1er chapitre, nous avons mis en évidence les caractéristiques du GPL ;

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques de stockage de GPL, types de stockage, sa production, ses caractéristiques et ses domaines d'utilisation.

Le troisième chapitre consiste les différents risques liés au stockage du GPL (BLEVE et UVCE.....).

## *Introduction générale*

Le quatrième chapitre est basé sur les différentes méthodes (méthode équivalent TNT et méthode TNO) de calcul des paramètres liés à ces risques tels que l'UVCE et le BLEVE.

**I-1. Historique des GPL**

C'est au cours de processus de croissance du marché des produits pétroliers qu'un ingénieur de la Riverside Oil Compagnie en Virgin (20<sup>ème</sup> Siècle) a découvert les gaz de pétrole liquéfier (GPL).

Le 24 décembre 1910, H.STUKEMAN réussit pour la première fois a obtenir les 658 premières litres de GPL liquide. Cet ingénieur avait entrepris ses travaux sous l'impulsion de son directeur générale, A.N. Kerr, qui dirigeait la raffinerie. Ce dernière se trouvait depuis un certain temps confronté au problème de l'évaporation des essences minérales (extraites de gaz naturel associé aux gisements de pétrole) qui étaient stockées dans ces bac a ciel ouvert. Pour limiter ses pertes, il eut l'idée de la vapeur et d'essayer de les décondenser ; ainsi étaient nés le gaz de pétrole liquéfier (GPL).

C'est en 1912 que fut expérimentée la première installation domestique au GPL.

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

Pour l'Europe, c'est en France que débutera le GPL en 1932, en usage domestique. En revanche, le GPL carburant n'y a été autorisé qu'en 1979. [1]

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

## **I-2. Généralités sur le GPL**

GPL est l'abréviation de gaz de pétrole liquéfié. Lorsqu'il est utilisé comme carburant pour des véhicules. Le GPL est un mélange d'hydrocarbures butane et propane. On obtient alors des GPL butane et propane à l'état liquide sont tous les deux des gaz à température ambiante normale et à la pression atmosphérique mais sous une pression moyenne ils deviennent liquides. Ceci permet un transport et un stockage faciles du GPL sous sa forme liquide concentrée.

Le GPL provient du raffinage du pétrole brut (40%) ou est extrait du gaz naturel ou du pétrole brut provenant de gisements souterrains (60%). Le GPL sous sa forme pure est inodore mais est rendu odorant pour aider à la détection des fuites. Le gaz est légèrement plus lourd que l'air et s'introduira dans les points bas et cavités en cas de fuite. Lorsqu'on supprime la pression le GPL se dilate et 1 litre de liquide génère 250 litres de vapeur.

Le GPL sous sa forme liquide augmente de volume de 2% par 10 degrés d'augmentation de la température (°C). Pour cette raison, les réservoirs de GPL ne doivent jamais être remplis à plus de 85%.

Si le GPL doit servir de carburant pour véhicule, le butane et le propane sont mélangés dans des proportions optimales pour obtenir une combustion complète du produit. Le GPL donne moins de pollution due aux gaz d'échappement. Peut souvent être beaucoup plus économique que les autres carburants (essence...etc.) et ses performances sont comparables à celles de l'essence et du diesel.

Le GPL est légèrement moins sujet à l'inflammation que l'essence. Environ entre 2% et 9% de vapeurs de GPL dans l'air créent une atmosphère inflammable. Un déversement de GPL liquide s'évaporerait rapidement mais en contact avec la peau il peut provoquer des brûlures froides. [3]

## **I-3. Origine du GPL**

Le GPL est extrait à partir de diverses sources qui peuvent être :

- de la récupération à partir de la liquéfaction des gaz associés (gaz devient liquide).
- comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL.
- du pétrole brut après raffinage comme sous-produit. de la récupération à partir des champs gaziers. [4]

**I-4. La Production des GPL**

Les GPL proviennent extrait à partir de diverses sources qui peuvent être :

- a-** comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL.
- b-** du pétrole brut après raffinage comme sous-produit, de la récupération à partir des champs gaziers.

**a- Les champs de gaz :** (pour plus de 60%). En moyenne, un champ de gaz naturel fournit près de 90 % de méthane (CH<sub>4</sub>) mais aussi 5 % de propane et 5 % d'autres gaz dont le butane. Schématiquement, on refroidit le gaz naturel extrait pour en séparer les différents constituants. On obtient alors des GPL (butane et propane à l'état liquide) alors que le méthane se trouve encore à l'état gazeux, ces gaz ayant des points de liquéfaction différents. Du butane et du propane sont également récupérés lors de l'extraction de pétrole, sous forme de gaz associés dissous (d'où l'appellation de gaz « de pétrole » liquéfiés).

Les pourcentages de butane et de propane contenus dans le gaz naturel et le pétrole brut sont très variables d'un gisement à un autre ;

**b- Les raffineries de pétrole :** (pour moins de 40%). Lors du raffinage du pétrole brut, le butane et le propane constituent entre 2 et 3 % de l'ensemble des produits obtenus. Ils constituent les coupes les plus légères issues de la distillation du pétrole brut. Ces gaz sont également récupérés à l'issue d'opérations de traitement « secondaires », après la phase de distillation. Selon sa provenance, une tonne de pétrole brut traitée produit 20 à 30 kg de GPL.

[4]

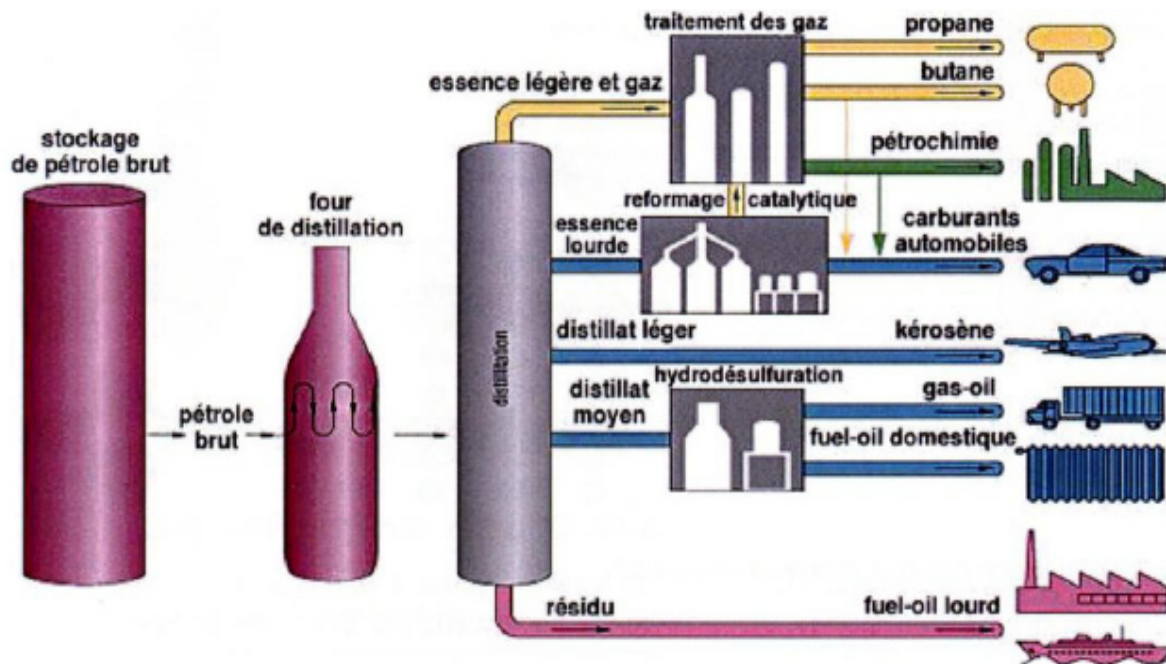


Figure I.1 : Les produits issus de la distillation du pétrole brut

## I-5. Caractéristique du GPL [4]

### I-5-1. Données de combustion:

- **Pouvoir calorifiques du GPL :**

Les GPL ont un pouvoir calorifique élevé et constant. Le butane offre un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 12,66 kWh par kg, le propane un PCI de 12,78 kWh par kg. Si l'on considère leur pouvoir calorifique supérieur (PCS), le butane et le propane affichent respectivement 13,7 kWh et 13,8 kWh par kg.

- **Température de fusion:**

Butane: 0°C

Propane: -44°C

- **Densité** : Dans l'état gazeux il est plus lourd que l'air : La densité du propane est de 0.51 et celle du butane est de 0.58.
- **Dilatation** : à l'état liquide, il a un coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage, car les sphères ne doivent jamais être remplies complètement.
- **Tension de vapeur** : Soumis à des températures supérieures à leur point d'ébullition, le propane et le butane ne peuvent être amenés à l'état liquide sous pression ou par réfrigération .Le GPL à une tension de vapeur à 20 °C égale à :
  - Pour le butane : 2 bars.
  - Pour le propane : 8 bars.
- **Température d'ébullition** : A la pression atmosphérique, la température d'ébullition du butane est de  $-0.6$  °C et celle du propane est de  $-40$  °C.
- **Impuretés** : Le GPL produit au niveau des différents champs doit répondre aux spécifications suivantes :
  - Teneur en gaz sec inférieure ou égale à 3 % mol.
  - Teneur en condensât inférieur ou égale à 0.4 % mol.
- **Odeur et couleur** : Le GPL est incolore, soit à l'état vapeur ou liquide et pratiquement inodore. Pour des raisons de sécurité un odorant doit être ajouté pour la détection des fuites. Cet odorant est à base de sulfures appelés Mercaptans.
- **Toxicité** : Le GPL s'enflamme dans l'air, il émet un gaz considéré comme toxique. Le gaz en question dénommé le monoxyde de carbone est formé suite à une combustion.

**I-5-2. Point d'ébullition et la masse volumique :**

La masse volumique et le point d'ébullition sont représentés dans le Tableau I.1 ;

	Point d'ébullition (°C)	Masse volumique du liquide (Kg/m <sup>3</sup> ) à 15 °C	Masse volumique du gaz (Kg/m <sup>3</sup> ) à 15 °C
Butane :	<b>0</b>	<b>585</b>	<b>2,50</b>
Propane :	<b>-42</b>	<b>515</b>	<b>1,85</b>

*Tableau I.1 : La masse volumique et le point d'ébullition des GPL*

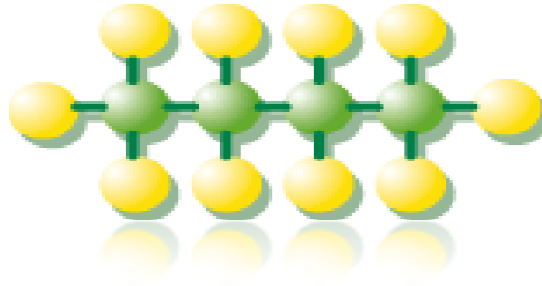
- 1 litres du butane liquide libéré 239 litres de gaz (15°C 1 bar)
- 1 litres du propane liquide libéré 311 litres de gaz (15°C 1 bar)

Ces caractéristiques physiques confèrent à cette énergie un avantage indéniable du point de vue du stockage et du transport.

**I-5-3. Formule chimique du GPL (propane, Butane) : [5]**

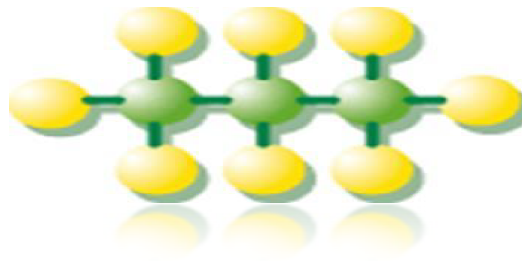
Les gaz butane et propane sont des hydrocarbures saturés dont les molécules sont composées d'hydrogène et de carbone ;

- **Butane :** molécule de butane est composé de 4 atomes de carbone et de 10 atomes d'hydrogène.



*Figure I.2 : C4 H10*

- **Propane** : molécule de propane est composé de 3 atomes de carbone et de 8 atomes d'hydrogène.

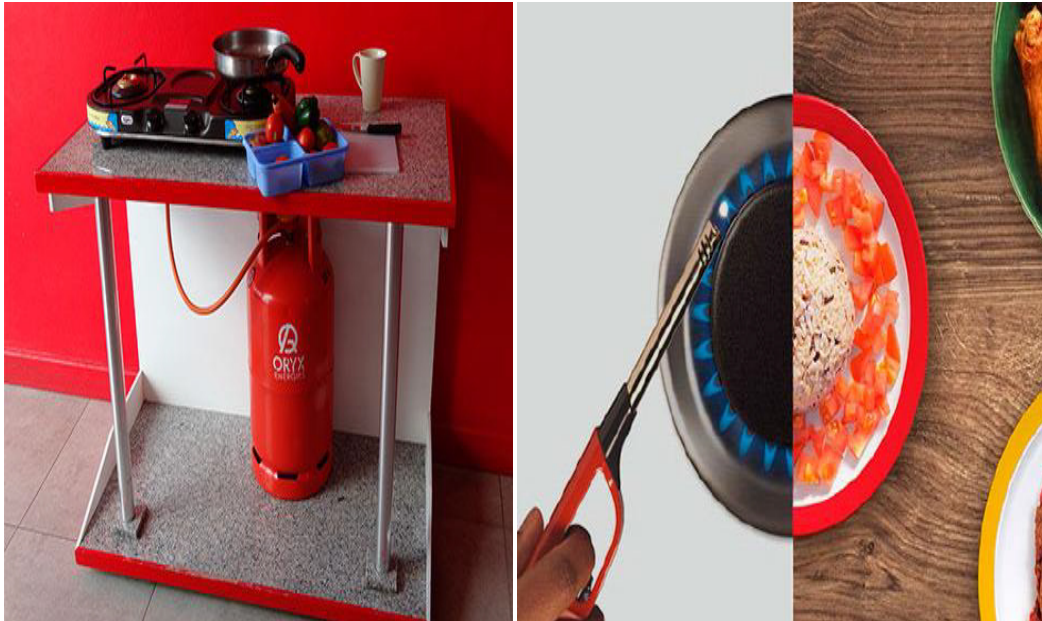


*Figure I.3 : C3 H8*

## I-6. Utilisation du GPL [6]

Il est utilisé dans plusieurs domaines tels que :

- **Source d'énergie domestique** : Actuellement de nombreux appareils de cuisson et de chauffage, sont conçus de manière à s'adapter à l'utilisation des GPL.



*Figure I.4 : Utilisation du GPL dans la cuisiner*

- **Climatisation** : La détente des GPL absorbe la chaleur et crée du froid (Réfrigérateurs, climatiseurs).
- **GPLC (carburant)** : Les GPL, en plus de leur utilisation domestique, ils sont utilisés comme carburants dans les véhicules. La consommation mondiale du GPL comme carburant s'élevait à près de **10 millions tonne en 1993**, un pourcentage de **7 à 8 %** des GPL consommé mondialement l'est sous forme de carburant.
- **Utilisations industrielles et artisanales** : Le propane intervient dans de nombreux travaux de fabrication, manuels ou mécaniques. Il convient aussi bien aux grands ensembles de production d'un automatisme poussé qu'aux installations les plus modestes. [7]

Exemples :

- Climatisation et refroidissement à l'échelle industrielle.
- Production des carburants.
- Centrale électrique : combustible pour la génération électrique.

### ❖ Industrie chimique:

- Chauffage de bacs d'acide.
- Fabrication de produits insecticides.
- Fabrication de caoutchouc synthétique.
- Aérosols.
- Production de gaz inerte.

### ❖ Matières plastiques :

- Ramollissement avant formage.
- Chauffage d'objets métalliques avant enrobage ; cuisson avant enrobage
- Travail au chalumeau



*Figure I.5 : Les utilisations industrielles du GPL.*

- **Dans le secteur agricole :** L'utilisation du GPL dans ce secteur sera orientée vers l'aviculture, et certaines cultures sous serre, le niveau de consommation prévu est relativement faible (40.000 tonnes/an) pour le court terme, il est attendu une évolution plus significative à moyen et long terme particulièrement par l'introduction dans le domaine de chauffage des lieux d'élevage avicoles et porcins, séchage des céréales avant leur stockage en silos, le séchage des récoltes, il est aussi une alternative aux produits chimiques pour le désherbage thermique. Les GPL peuvent jouer un rôle essentiel dans le développement de l'agriculture. [8]
- **Pour la production d'électricité :** Le GPL est privilégié dans la production de l'électricité du point de vue technique car il nous permet d'atteindre des rendements très élevés. Écologique parce qu'il est un combustible propre et stratégique du point de vue diversification et garantie d'approvisionnement. [9]

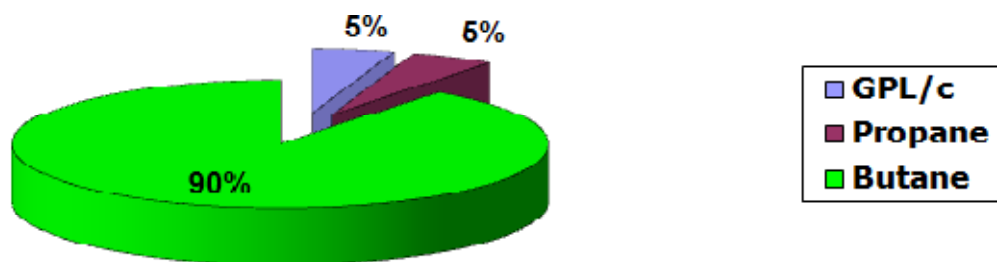
### **I-7. Avantages et inconvénients techniques des GPL [9]**

- ❖ L'homogénéité du mélange air-GPL donne une meilleure régularité du couple moteur
- ❖ Aux bas régimes mais perd environ **58 %** de puissance à haut régime, les reprises se font plus souples. Le fonctionnement du moteur est plus silencieuse et les vibrations diminuent contrairement aux carburants classiques, la combustion du GPL ne laisse aucun dépôt et procure au moteur et au lubrifiant une longévité accrue. Les révisions peuvent être espacées tous les **30000 Km**.
- ❖ La surconsommation des GPLC est de l'ordre de **15 à 20 %** par rapport aux carburants traditionnels.
- ❖ Il existe un inconvénient majeur d'encombrement, le réservoir peut amputer le volume du coffre. Toutefois les constructeurs proposent dès la conception de leurs modèle une version GPL /c avec réservoir intégré.

- ❖ Les gaz d'échappements sont exempts de poussières, de plomb et de soufre.
- ❖ Les émissions en oxyde de carbone sont réduites principalement en circulation urbaine.
- ❖ Les GPL carburant répondent bien aux problèmes de pollution des villes.

### **I-8. Demande nationale des GPL**

Le niveau de la demande nationale des GPL est de l'ordre 1.4 millions de tonnes dont 90% du butane, 5 %du propane et 5 %des GPL carburant. [9]



*Figure I.6 : La demande nationale des GPL.*

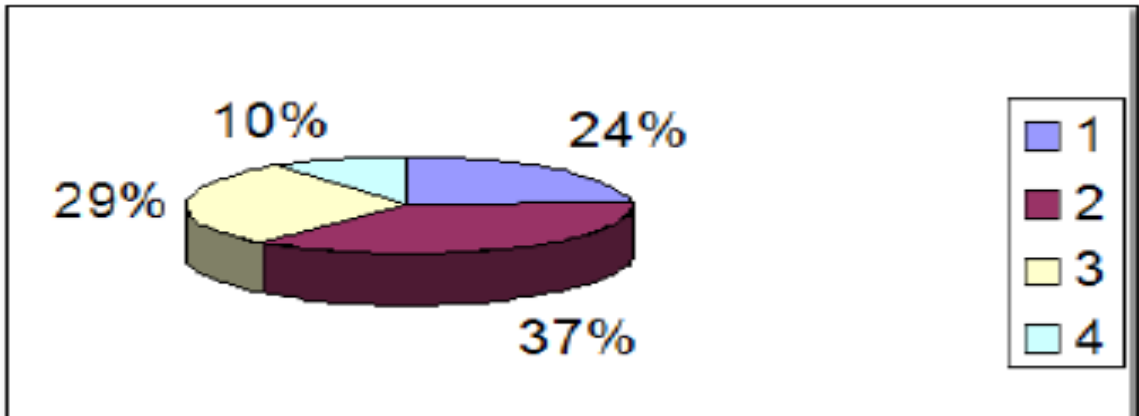


Figure I.7 : Répartition de la demande du GPL.

### I-9. Consommation mondiale de GPL

La consommation mondiale de GPL a augmenté de 50 % entre 1980 et 1981 alors que celle du pétrole restait quasiment stable pendant cette période.[9]

En 2002, la consommation totale de pétrole de gaz pétrole liquéfié est de 134.6 Mt, alors qu'elle a été en 1970 de 69 Mt.

Pays	Consommation (Mt)	Pays	Consommation (Mt)
U.S.A	41.000	Espagne	2.327
Japon	18.900	Russie	8.600
Italie	3.430	Algérie	3.600
Grande Bretagne	2.750	Australie	1.400
Allemagne	2.677	Chine	2.300
France	2.655	Inde	2.000
Hollande	2.5	-	-

*Tableau I.2 : Consommation mondiale des GPL.*

## **Conclusion**

Dans ce chapitre il est important de connaître les différents caractéristiques physico chimiques du Gaz Propane Liquéfié ainsi que sa valeur et les différents types d'utilisation dans le monde entier.



## II-1. Stockage du GPL

Une fois le GPL est extrait par la raffinerie comme produit fini, il passe par une autre étape qui est le stockage. Le GPL est transporté par pipeline à l'état liquide vers les réservoirs de stockage, ou par voie routière (citerne) ou en le fait transporté vers les centres emplisseurs. Les GPL sont stockés dans les réservoirs de forme sphérique, cigares, et sous talus. Il ya aussi le stockage sous terrain et le stockage réfrigéré.

## II-2. Types réservoirs de stockage du GPL

### II-2-1. Stockage sous pression :

- **Cigares:** capacité limitée à 500 m<sup>3</sup>, utiliser dans les dépôts commerciaux ou les terminaux (propane en général) à 7.5 bars, 17 °C et un pourcentage de remplissage entre 80% à 85%.



*Figure II.1 : réservoir de forme cigare*

- **Réservoirs sous talus:** dont les parois sont recouvertes avec une protectrice (terre, sable) à l'égard des effets thermique et mécaniques.



*Figure II.2 : réservoir sous talus.*

### **II-2-2. Stockage sous terrain :**

Les GPL sont stockés en grande quantité dans des cavités creusées dans la roche (calcaire, craie,...).

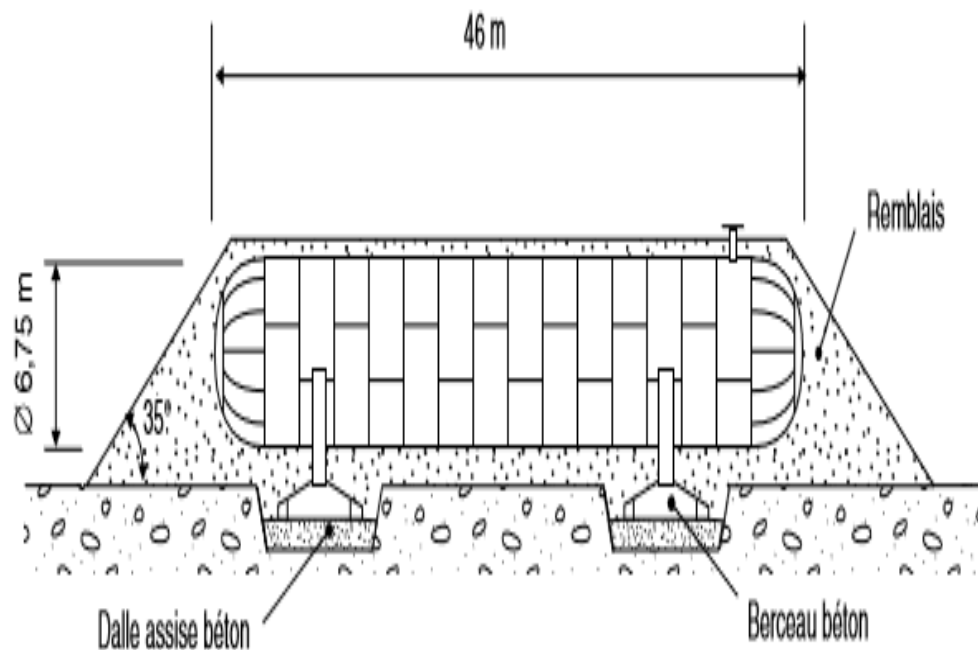


Figure II.3 : réservoir sous terrain (forme cylindrique).

### II-2-3. Stockage réfrigéré :

Le stockage réfrigéré sous pression ou les GPL sont liquéfiés voisines ou inférieurs à 0 °C. Cela permet une réduction importante de la pression de stockage. Cela exige l'installation et le fonctionnement d'appareil de réfrigération.

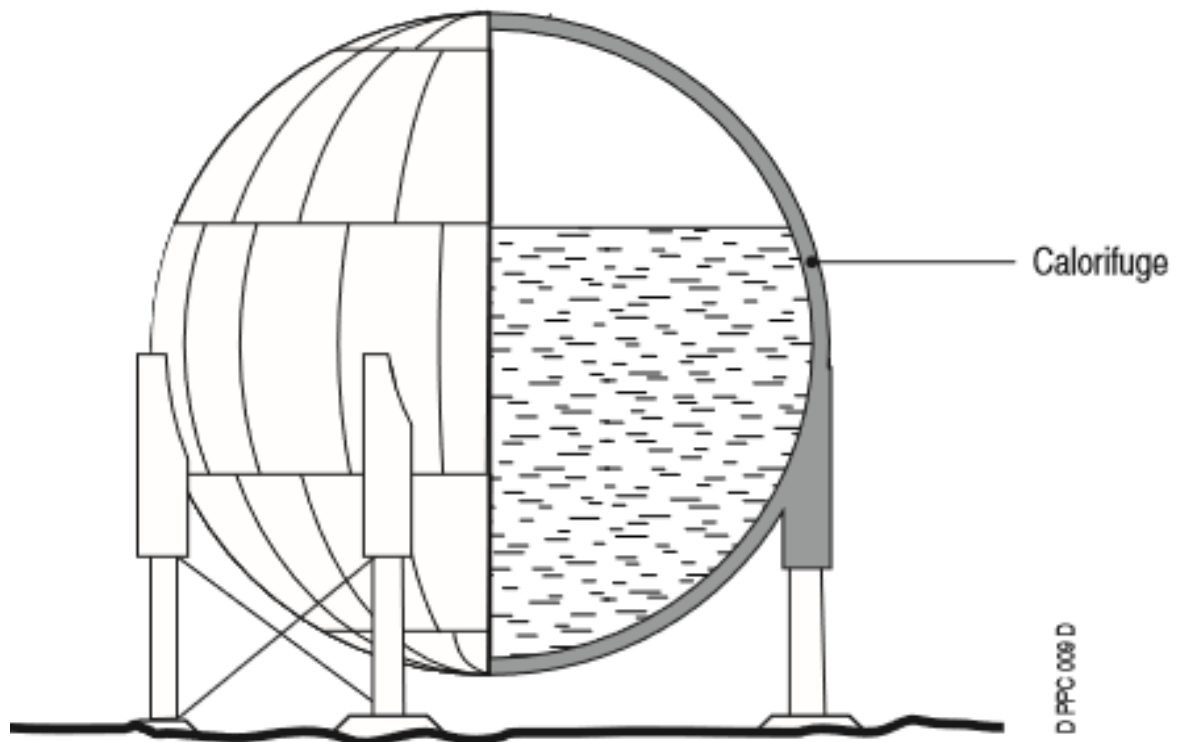


Figure II.4 : réservoir réfrigéré (forme sphérique).

#### II-2-4. Stockage dans une sphère :

➤ **Sphères:** très résistants, utilisés dans les usines de production et les raffineries (butane en général) stockés à 1 bar, 16 °C. [10]

Elle est constituée essentiellement d'une enveloppe de forme sphérique, des poteaux et des fondations.



**Figure II.5 : réservoir sphérique**

➤ **Spécification de la sphère:**

- Diamètre interne 7400mm.
- Contenu GPL.
- pression prévu au stockage 12.3 bars au sommet.
- Matériau de la robe(A49).
- Epaisseur de la robe (36.5, 38, 39.3mm).
- Pression d'essai hydraulique 15 bars (au sommet).
- Pression d'essai de fuite 12.9 bars (pneumatique).

### ➤ Accessoires de la sphère:

La surface de la sphère est équipée de quatre types d'accessoires repartis selon leurs fonctionnements.

#### a) Accessoires d'accès:

- Escalier
- Trou d'homme
- Une échelle intérieure

#### b) Accessoires de Contrôle :

- **Manomètre:** (indicateur de pression)
- **Thermomètre:** (indicateur de température)
- **Indicateur de niveau:** Chaque sphère est équipée de trois indicateurs de niveau :
  - Indicateur de niveau très bas.
  - Indicateur de niveau bas.
  - Indicateur de niveau haut.

Ces indicateurs de niveau nous sonnent les niveaux de remplissage et de vidange de la sphère pour éviter les surpressions et les dépressions de cette dernière (remplissage et vidange).

#### c) Accessoires d'exploitation:

Ce sont les différentes tubulures placées sur la partie inférieure et supérieure de la sphère qui communique avec l'intérieur de la sphère.

**d) Accessoires de sécurité:**

Les soupapes de sécurité: le rôle des soupapes de sécurité et de créer un point faible prédéterminer dans une installation à fin d'éviter les surcharges survenant pendant le fonctionnement.[10]

**II-3.Types de stockage :**

Le GPL est stocké en utilisant plusieurs techniques [11] :

- **Stockage sous pression** : le GPL est stocké à l'état liquide sous pression de 14 à 14,5 bars à la température ambiante et cette pression est maintenue avec fuel gaz ,dans le but d'éviter la perte des vapeurs de GPL qui se dégagent par ébullition et ce qui permet d'avoir un volume plus réduit (plus de 250 fois). Les réservoirs utilisés pour le stockage sont sous formes sphérique ou bien cylindrique à axe horizontal (cigare) à des capacités différentes, revêtus d'une peinture qui réfléchit la chaleur et munis d'une soupape de sécurité.
- **Stockage réfrigéré** : sous pression où les gaz liquéfiés sont stockés à des températures voisines ou inférieures à 0°C, cela permet une réduction importante de la pression de stockage c'est le cas des produits volatils (ex : propylène, butadiène stocké à 0°C et 4,5 bars).
- **Stockage cryogénique** : pour les gaz incondensables à la température ambiante. La pression de stockage est légèrement supérieure à la pression atmosphérique, la température est alors voisine de la température normale d'ébullition du produit.

**II-4. Distribution****II-4-1. Réseau de transport par canalisation :**

Les réseaux de transport par canalisation sont composés de tronçons de conduite et d'ouvrage connexes remplissant des fonctions précises [12] :

- Les stations d’injection ou de départ constituent les points d’entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique, peuvent être des stations d’atterrage, des terminaux, des stations d’entrée.
- Les stations de compression (pour le gaz) ou stations de pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir, par la pression, la vitesse du fluide dans les canalisations.
- Les postes de livraison permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux.
- Les postes de sectionnement permettent d’isoler un tronçon de canalisation afin d’assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces postes sont parfois équipés de coupure pour introduire et recevoir des pistons racleurs, destinés à contrôler les différents paramètres d’intégrité de la canalisation : géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, etc....
- La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure (ou de demi-coupure) consécutifs varie d’une dizaine de kilomètres pour de courtes antennes ou pointes spéciales, à quelques centaines de kilomètres pour de grandes canalisations de transit.
- Les postes de détente ou poste de régulation permettent de diminuer la pression de fluide à l’aval. Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.
- Les stations d’arrivée marquent l’extrémité d’un réseau de transport. Ce peut être un réservoir de stockage ou le début d’un réseau aval de transport ou de distribution.

## **II-5. Pompage du GPL**

Les stations de pompage de GPL comportent en général : Un compresseur dédié au poste de déchargement des camions gros porteurs. Le compresseur dispose d’un piège à liquide (ballon) à son aspiration et d’un pressostat à son refoulement qui déclenche l’arrêt du compresseur à un certain seuil de pression. Un petit compresseur a été

ajouté sur la ligne de chargement des camions afin de récupérer les purges des bras en fin du chargement. [12]



**Figure II.6 : Compresseur ballon**

– Deux pompes d’expédition associées au stockage pour l’alimentation des postes de chargement. Chacune des pompes est munie de clapet anti-retour constitué d’une soupape et d’un système de recirculation. Ce dispositif protège les pompes contre les surpressions et leur assure un débit minimum lorsque les clapets sont ouverts. La ligne de recirculation est reliée à la partie supérieure du réservoir. Les pompes sont munies de pressostats dont la fonction est d’assurer leur protection contre les risques de cavitation en cas de baisse de la pression d’aspiration. Les pompes et le compresseur sont isolables du réseau de canalisation par des vannes manuelles. Ils s’arrêtent sur perte d’énergie électrique.



*Figure II.7 : les pompes*

## **II-6. Transport des GPL**

Les GPL sont transportés selon différentes modes [13]:

– **Le transport par pipelines (canalisations) :**

Ce mode de transport est utilisé dans le cas d'un transfert de quantités importantes de GPL de leur point de récupération vers des unités de séparations ou vers les stockages importants.

Ce mode de transport est retenu également dans le cas d'acheminement des GPL sur de longues distances et il est plus économique.

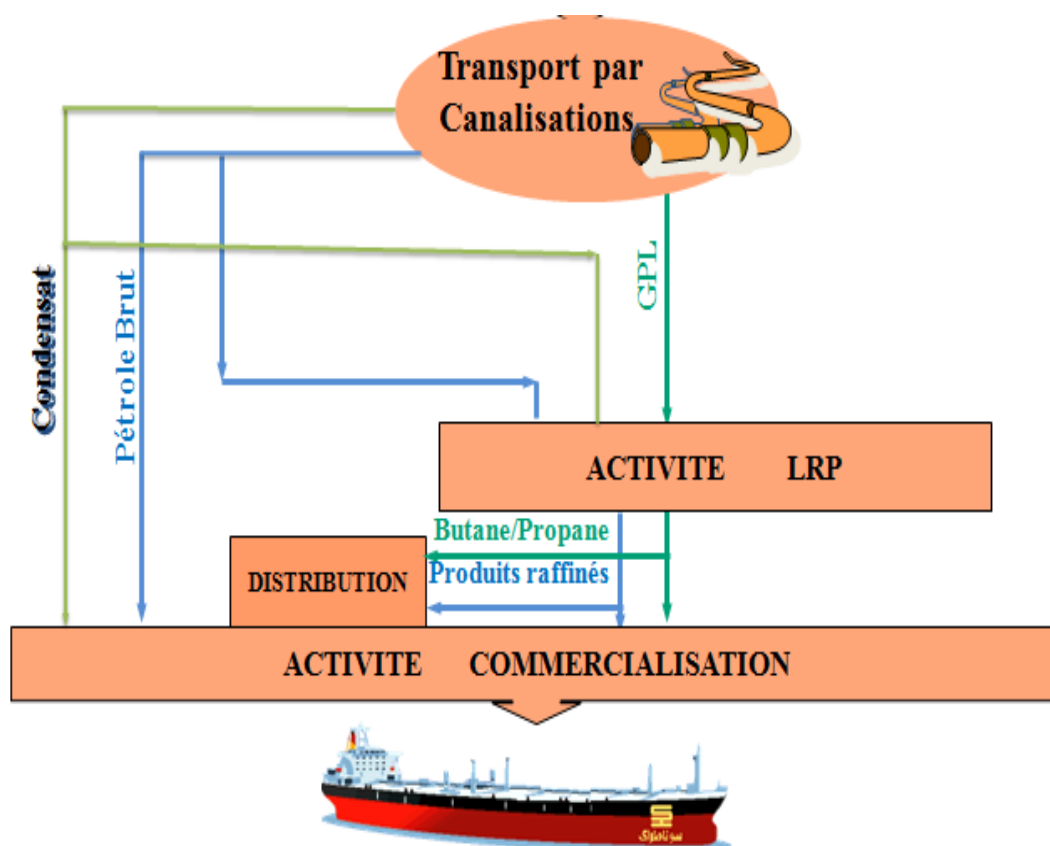


Figure II.8 : Transport de GPL par canalisations.

– **Transport par wagon- citernes :**

Pour des quantités plus petites, il est préférable d'utiliser la voie ferroviaire. Dans ce cas le train comporte plusieurs wagons-citernes dont la capacité unitaire est de 50 tonnes.

Les wagons - citernes sont sous pression et sont fabriqués conformément à des normes contrôlées.

Ce mode de transport est surtout utilisé pour la livraison des GPL à partir des raffineries vers des stockages primaires ou à partir des stockages primaires vers des stockages secondaires.



*Figure II.9 : Transport du GPL par wagon- citernes.*

- **Le transport par bateaux (transport maritime) :**  
Ce mode de transport est utilisé fréquemment pour les échanges internationaux. Dans ce cas, les GPL sont stockés dans des réservoirs réfrigérés (jusqu'à  $-50^{\circ}$ ) ou sous pression.



*Figure II.10 : Transport du GPL par bateaux.*

– **Le transport par camions - citernes :**

C'est le mode est utilisé pour le transport de petites quantités de GPL sur des courtes distances à partir des centres de stockages vers les utilisateurs.



*Figure II.11 : Transport du GPL par camions-citernes.*

### Conclusion

Dans cette partie on a présenté les différents types de stockage et la distribution de Gaz Propane Liquéfié dans les modes de transports soit que par canalisation au par wagon-citerne.

### **III-1. Introduction**

Le contenu des études de dangers GPL a fortement évolué au cours de ces dernières années, les études de dangers ont également influé sur les techniques de stockage vis-à-vis des risques identifiés. L'apparition, il y a une vingtaine d'années, des réservoirs sous talus (sphères ou cylindres) permis de se prémunir du risque de BLEVE, explosion UVCE.....etc. Avec un coût non négligeable pour les industriels. Connaître les risques majeurs dans ce type d'industrie est primordial pour planifier la prévention, l'évaluation et les secours en cas d'accidents qui sont inévitables.

### **III-2. BLEVE**

#### **III-2-1. Définition :**

Un BLEVE (**acronyme de Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion**) est causé par la ruine complète d'un réservoir pressurisé contenant un liquide dont la température est très supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique. Ce phénomène d'éclatement de réservoirs peut se décomposer en plusieurs phases successives ou simultanées :

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

Dans le cas d'un BLEVE de liquide inflammable, la formation d'une boule de feu peut engendrer un rayonnement thermique dont les conséquences peuvent être prépondérantes.



*Figure III.1 : accidents de la raffinerie ELF de Feyzin en 1984(MEXICO).*

### **III-2-2. Description du phénomène :**

Les BLEVE sont causés par la rupture totale du réservoir. Une rupture totale peut se produire de trois façons :

- via une fissuration spontanée due à une fragilisation du réservoir ;
- suite à une vaporisation explosive déclenchée par la chute de pression d'un liquide à une température proche ou supérieure à sa température limite de surchauffe ;
- consécutivement à la montée du réservoir en pression et au maintien de cette pression à des valeurs significativement supérieures à la pression d'apparition de la fissure initiale.

Il devient alors évident que les BLEVE les plus redoutables se produisent lorsqu'un réservoir très résistant subit une rupture locale qui déclenche une vaporisation explosive.

#### **III-2-2-1. Combustion interne et température limite de surchauffe :**

L'allumage du mélange interne air-hydrocarbure dans un réservoir ne nécessite qu'une énergie faible. Le mélange dans le réservoir étant stratifié, surtout dans le cas des gaz lourds, il ne participe pas en totalité à la réaction. Aussi l'allumage est rarement central et l'augmentation de température non homogène.

Lorsqu'on fournit, à pression donnée, de la chaleur à un liquide, celui-ci subit une augmentation de température jusqu'à atteindre sa température d'ébullition. Il s'ensuit la formation de bulles de vapeur qui se développent dans le liquide.

Dans certains cas, la température d'ébullition peut être dépassée sans qu'il y ait ébullition, le liquide est alors dit **surchauffé**. Toutefois, il existe une limite de température, à la pression donnée, au de là de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide. Cette limite est dite **limite de surchauffe** d'un liquide.

Lorsque le liquide a atteint, dans le réservoir, une température supérieure à sa température limite de surchauffe, et qu'il est ramené à la pression atmosphérique, des bulles se forment et se développent et, en quelques millisecondes, une importante fraction de liquide se transforme en vapeur. Le volume massique de la vapeur étant très largement supérieur à celui du liquide, on peut assister à une explosion susceptible d'engendrer une onde de choc.

### **III-2-2-2. Tenue à la pression et éclatement :**

Lors de la montée de la pression interne du réservoir jusqu'à sa rupture (ruine), les sollicitations sont appliquées très rapidement : la déflagration se produit dans la seconde, quant à la réaction de détonation, elle se produit en 0,1 s. Ainsi, quand une brèche apparaît sur le réservoir, en général sur la partie la moins résistante, le plus couramment en contact avec le ciel gazeux, le liquide se vaporise de manière explosive dans le réservoir. On assiste alors à une dépressurisation violente du réservoir, ce qui conduit à sa ruine totale.

Pour une pression dynamique appliquée en quelques millisecondes, la pression de rupture est de l'ordre du triple de la pression statique. Par contre, lorsque le temps d'application de la surpression est supérieur à 0,5 s, les pressions dynamique et statique s'équilibrent.

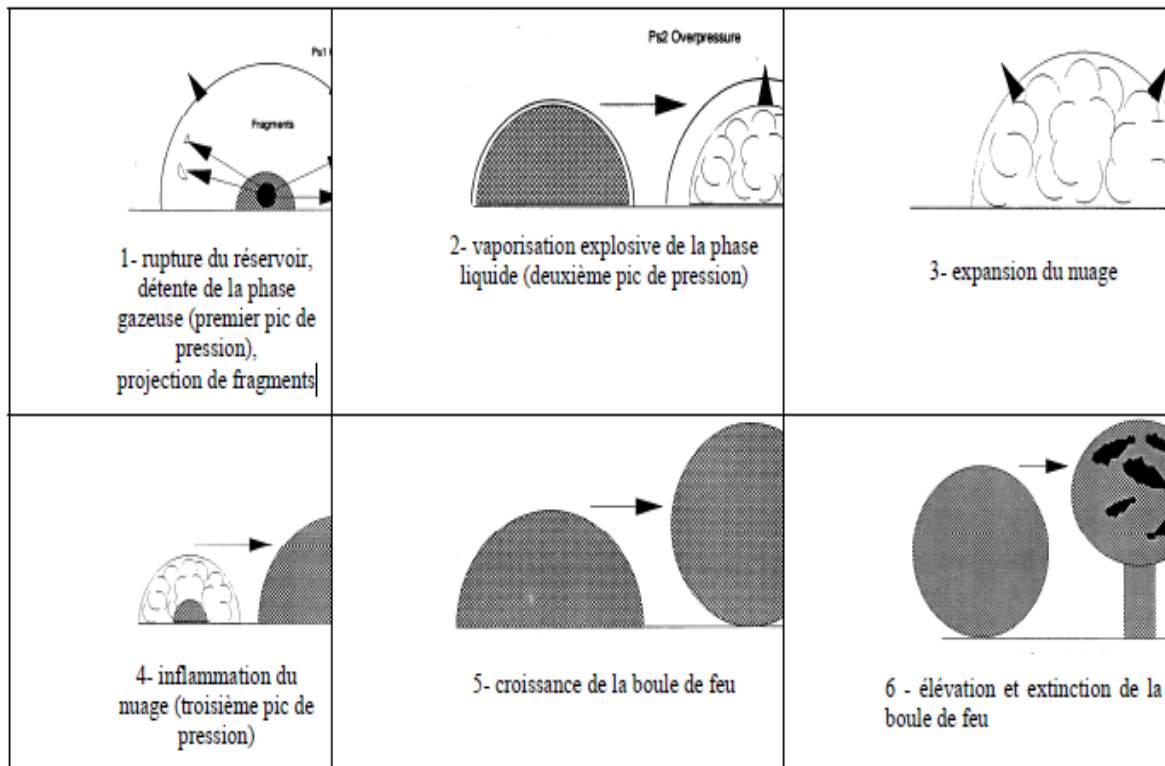
Ainsi, si le réservoir est petit, la détonation est difficile. À l'inverse, elle sera facilitée pour les grands volumes. Mais, dans les deux cas, il y aura rupture du réservoir lorsque la pression dynamique sera égale à la pression statique. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les réservoirs sont tous munis de dispositifs de type évènements, soupapes, disques de rupture, etc. Ces dispositifs sont réglés à une pression bien inférieure à la pression de rupture du réservoir, permettant la décharge de gaz et limitant, de facto, la montée interne en pression.

**III-2-2-3. Émission de projectiles :**

Une fois la paroi du réservoir détruite, les différents fragments sont expulsés dans l’environnement, à des distances parfois très importantes. Cette distance de projection dépend de la part d’énergie absorbée par les fragments qui est transformée en énergie cinétique.

L’impact d’un projectile est susceptible de produire deux types d’effets sur l’homme ou sur des structures :

- un choc, qui peut être la cause de fractures osseuses pour l’homme, et entraîner pour les structures des déformations menant, éventuellement, à leur effondrement et leur destruction ;
- une pénétration, tant dans le corps humain que dans un équipement cible.



*Figure III.2 : Etapes de développement d’un BLEVE*

**III-2-3. Effets thermiques de la boule de feu :**

Lorsqu’un BLEVE met en jeu un produit inflammable, la boule de feu peut être le phénomène ayant les conséquences les plus importantes, notamment du fait de ses effets thermiques radiatifs. Il existe plusieurs théories pour déterminer les effets des boules de feu.

Toutefois, elles sont toutes basées sur une démarche similaire qui s’articule autour des étapes suivantes :

- Détermination du diamètre de la boule ;
- Détermination de la durée de combustion de la boule ;
- Estimation de l'élévation de la boule de feu ;
- Calcul de la densité de flux thermique radiatif reçu par une personne exposée au rayonnement ;
- Détermination des effets sur l'homme.[14]

### **III-2-4. Les causes identifiées de BLEVE :**

- Fuite sur une tuyauterie.
- Rupture de tuyauterie.
- Sur-remplissage.
- Accident routier.
- Accident ferroviaire.
- Accident maritime.
- Erreur humaine.
- Erreur de conception, matériau non adapté.
- Incendie extérieur.

### **III-2-5. Conséquence d'un BLEVE :**

Il comporte trois dangers principaux :

- L'onde de choc (l'onde de suppression et l'onde de dépression) ,
- Le flux thermique,
- Les Missiles.

### **III-3.UVCE**

**III-3-1.Définition de L'UVCE :** Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre.

- soit un éclatement;
- soit l'explosion d'un nuage de gaz ou de vapeurs,



*Figure III.3: UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) .*

#### **III-3-2. Les facteurs sont:**

- réactivité du gaz ;
- nature et point d'amorçage de l'explosion ;
- énergie de la source d'allumage ;
- position par rapport au sol ;
- relief du terrain ;
- végétation environnante ;
- orientation et forme des structures ;
- direction et force du vent, etc.

Plus la présence d'obstacle est importante plus l'explosion est destructrice.

### **III-3-3. Etapes de développement d'un UVCE :**

Il se déroule de la manière suivante:

- Fuite ou rejet d'un produit sous forme liquide ou gazeuse dans l'atmosphère,
- Transport du nuage de gaz (mélangé à l'oxygène) avec une partie du nuage qui reste comprise dans les limites d'explosivité,
- Le nuage rencontre une source de chaleur et prend feu,
- Propagation du front de flamme dans le nuage. Les gaz brûlés agissent tel un piston sur les gaz frais du reste du nuage et ainsi une onde de pression aérienne peut se produire
- Enfin, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage

Le temps de l'allumage est très court. Les vitesses de réaction dans le nuage explosible peuvent augmenter lorsque l'énergie d'inflammation croît. Si l'énergie d'inflammation est plus importante, la vitesse de propagation des flammes est aussi plus importante. On peut observer des vitesses de propagation plus élevées (par rapport à une énergie d'inflammation plus faible) lors du déclenchement précipité de l'instabilité du nuage. L'augmentation de l'énergie d'inflammation entraîne instantanément une accélération de la flamme (déflagration) qui est plus importante.

On peut observer un front de flamme sphérique se propageant du point d'inflammation vers la limite de la charge gazeuse, lorsque la source d'inflammation est située au centre du volume inflammable.

Lorsque l'allumage se fait en périphérie du nuage, le front de flamme n'enferme pas les gaz brûlés. Ils peuvent alors se détendre.

Mécanismes d'accélération d'une flamme par les instabilités de flamme et la turbulence

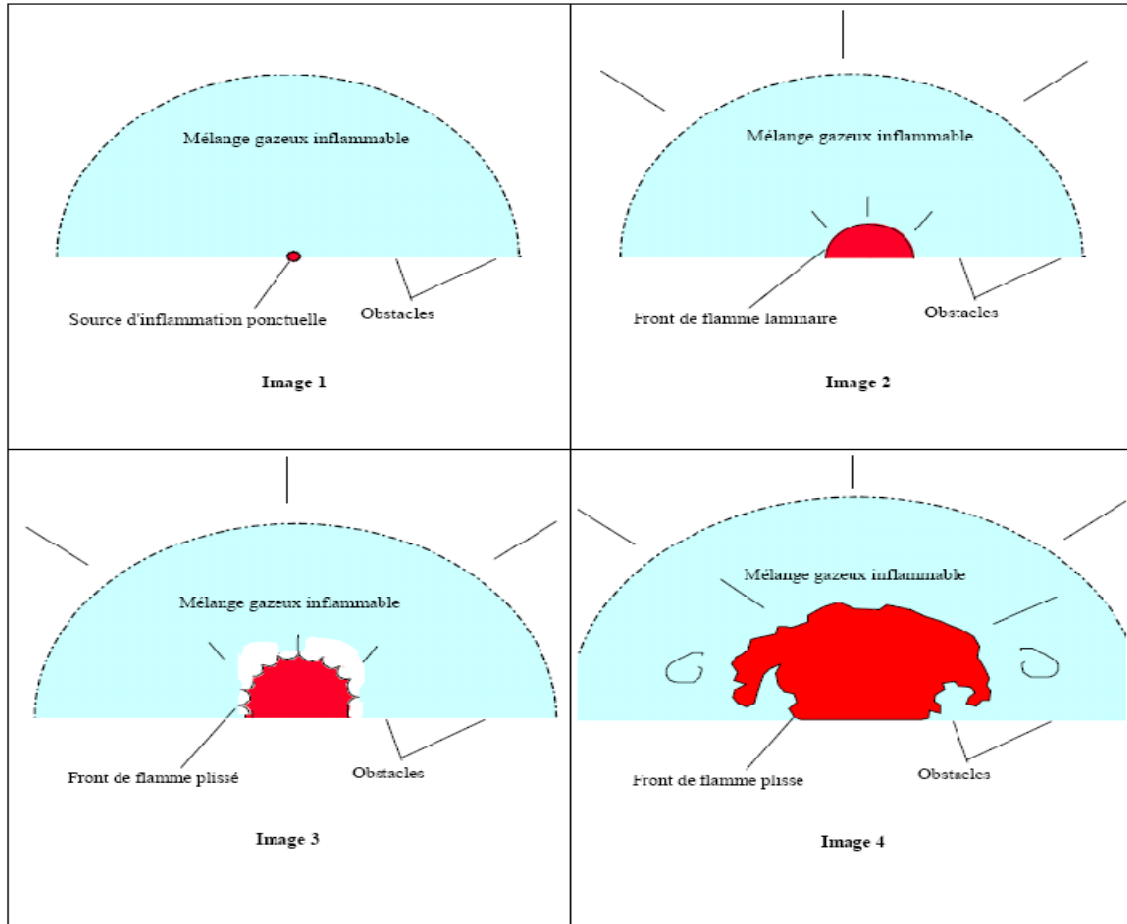


Figure III.4 : Etapes de développement d'un UVCE

### III-3-4. Les effets générés par UVCE :

Dans le cas d'un gaz inflammable, tels que les GPL:

- ✓ des effets thermiques
- ✓ des effets de pression.

Effets	Causes	Résultats
<b>effets thermiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ne sont pas dus au rayonnement thermique du nuage enflammé</li> <li>- passage du front de flamme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dégâts superficiels</li> <li>- initiateur d'un incendie</li> </ul>
<b>effets de pression</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais.</li> <li>-plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- en l'absence d'obstacles les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars</li> <li>- la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacles.</li> </ul>

*Tableau III.1 : Effets (causes et Résultats) d'un UVCE*

**III-3-5. Les conditions doivent être réalisées simultanément pour avoir un UVCE :**

- ❖ Un nuage de gaz inflammable,
- ❖ Une source d'inflammation.

**III-3-6. Des méthodes de calculs sont utilisées pour avoir une modélisation des effets :**

(Méthodes de Lannoy, méthode multi énergie), ces modèles sont réalisés en trois temps:

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

**III-4. Le feu de nappe****III-4.1 Rappel sur le feu de nappe :**

Le feu de nappe est un phénomène de combustion auto-entretenue. De fait, la combustion ne s'applique pas au liquide lui-même, mais implique les vapeurs émises par le produit. Aussi faut-il, pour qu'un combustible brûle, qu'il émette des vapeurs inflammables. Pour les combustibles liquides, les vapeurs inflammables sont émises par évaporation de la phase liquide. Pour les solides, un processus plus complexe mettant notamment en jeu des réactions de décomposition, fusion ou pyrolyse est indispensable à l'émission de gaz ou distillats inflammables.

Ainsi, la combustion se fait en phase gazeuse, là où se développent les flammes. L'exothermicité de la réaction de combustion libère de l'énergie dont une partie est cédée au combustible, entretenant, de ce fait, l'émission de gaz inflammables. En conséquence, pour prévenir l'apparition d'un feu de nappe, limiter la taille d'un feu de nappe et son impact dans l'environnement, plusieurs types de mesures compensatoires peuvent être prises : mesures de prévention, de détection. De nouveau, on rappelle que les mesures présentées ci-après ne sont pas exhaustives. [16]

**III-5. Le Jet Enflammé****III-5-1. Rappel sur le jet enflammé :**

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

seulement aux endroits où les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie dans ses limites d'inflammabilité. [17]

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons basé notre présentation sur le risque BLEVE et l'UVCE parce que ce ils sont liés directement aux produits inflammables notamment le Gaz Propane Liquéfié.

## IV-1.Introduction

Pour calculer les conséquences des risques de stockage GPL il y a plusieurs modèles qui sont utilisées dans la perspective de la prévention, évaluation et réduction de leurs effets. Ces modèles prédictives complexes comportant des millions de calculs réalisées sur des grands ordinateurs. On s'intéresse dans ce chapitre au calcul des paramètres liés à l'UVCE, le BLEVE, étant donné sa grande probabilité d'apparition et ses effets désastreux.

## IV-2.UVCE (Méthode équivalent TNT)

Selon cette méthode, la puissance de l'explosion, un nuage de vapeur qui équivaut à une masse équivalente de TNT qui produirait la même puissance explosive. Tout d'abord, la masse du gaz inflammable dans le nuage avec des concentrations entre le plus bas et les limites d'inflammabilité supérieure (LII et LSI) sont estimées. Cette masse est donc multipliée par la chaleur de combustion pour obtenir l'énergie totale disponible de la combustion. Cette énergie est multipliée par un paramètre (0 à 1) qui tient compte de la non-idéalité de l'explosion, puis divisé par la chaleur de la combustion de la TNT, afin de calculer la masse équivalent TNT. La masse équivalente TNT est utilisée pour le calcul de l'onde de choc dans une distance spécifique de la source. [18]

### a) Equivalent masse TNT et surpression :

Cette méthode est basée sur le schéma empirique Brasier & Simpson [Brasier & Simpson, 1968] (figure.1), et produit la surpression  $P_s$  (en kPa) en fonction de la distance à l'échelle,  $Z$  ( $m / Kg^{1/3}$ ), défini par l'équation:

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

$x$ : La distance à partir du centre de l'explosion [m].

$M_{TNT}$  : La masse équivalent TNT [Kg].

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

$f_e$ : La fraction de l'énergie libérée comme onde de choc (généralement de valeur comprise entre 0,01 et 0,1).

$\Delta H_c$ : La chaleur de combustion du gaz inflammable [KJ/kg].

$\Delta H_{TNT}$ : La chaleur de combustion de TNT (= 4760 kJ / kg).

$M_G$ : La masse du gaz inflammable qui participe à l'explosion [kg].

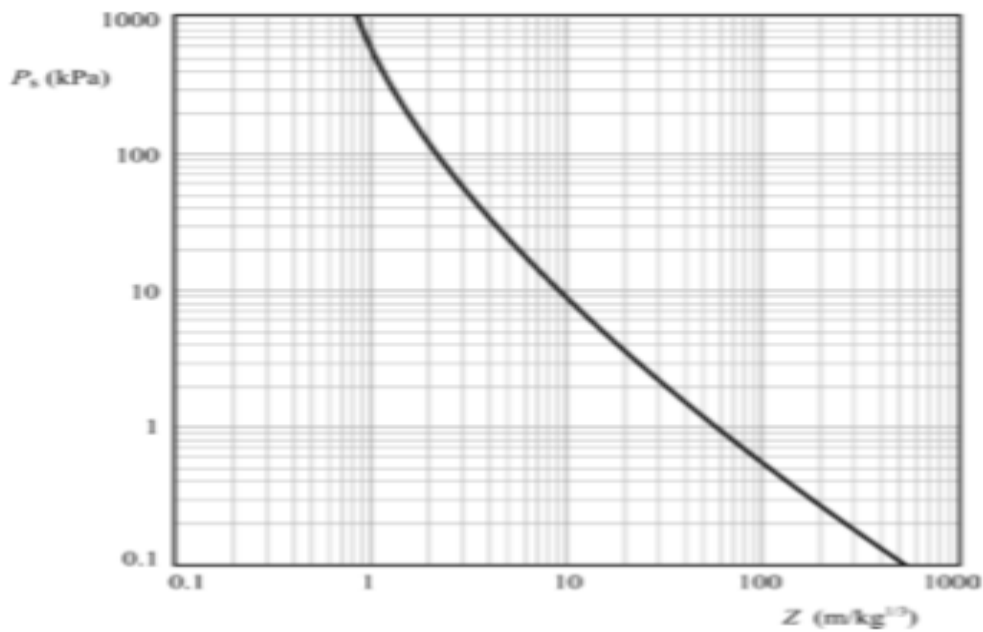


Figure IV.1 : la Surpressions en fonction de la distance de mise à l'échelle. [18]

b) L'expression analytique de surpression :

$$P_s = \frac{80,800 \times \left(1 + \left(\frac{z}{4,5}\right)^2\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{0,048}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{z}{0,32}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{z}{1,35}\right)^2}} \quad (3).$$

$P_s$  : La surpression de l'onde de choc [kPa].

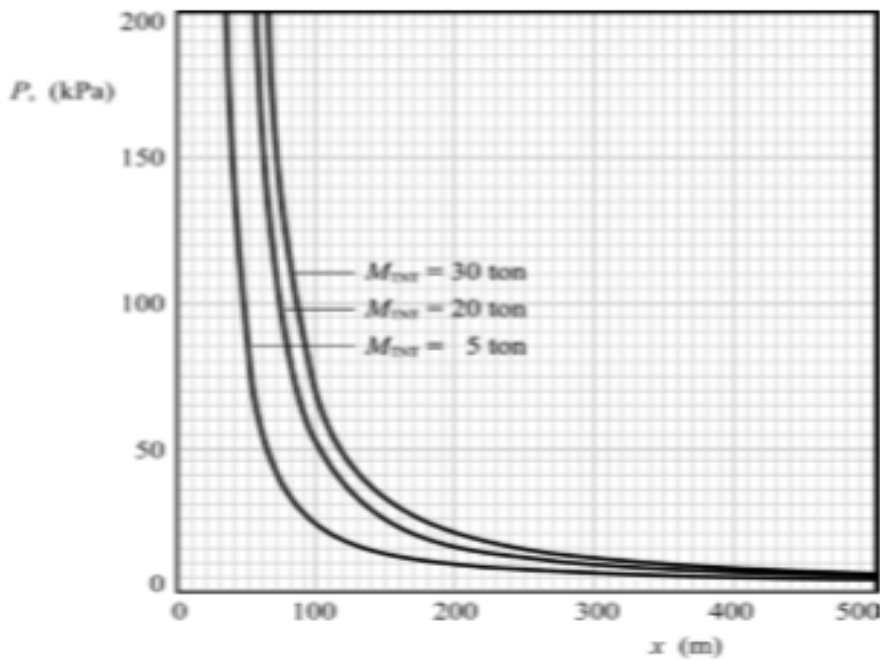


Figure IV.2 : la Surpression en fonction de la distance. [18]

### IV-3.BLEVE (Boule de feu, Fragments)

#### IV-3-1.Définition :

Une boule de feu peut être le résultat d'un écoulement et d'une inflammation très rapides de gaz inflammables sous pression. [19]

#### IV-3-2. Dimensions et durée d'une boule de feu :

Dans cette section, expressions (principalement empiriques) pour le calcul des dimensions d'une boule de feu et sa durée sont présentées. Ces expressions sont basées sur la connaissance de la masse  $M$  (kg), de la substance inflammable. Cette la masse est généralement obtenue à partir du volume initial,  $V$  (m<sup>3</sup>), du récipient, la fraction  $F$  (-), de ce volume qui est rempli de gaz sous pression en phase liquide et la densité,  $\rho_{mat}$  (kg / m<sup>3</sup>), de la substance inflammable, comme : [19]

$$M = F \times V \times \rho_{mat} \quad (4)$$

Les observations réelles des boules de feu conduisent aux directives. Typiques suivantes Pendant le premier tiers de la durée totale,  $t_{max}$  (s), de la boule de feu, son diamètre,  $D$  (m), augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale,  $D_{max}$  (m). Suite à cela, dans le temps restant, la boule de feu s'élève alors que son diamètre reste constant. La hauteur maximale que le centre de cette sphère monte du sol est à peu près égale à son diamètre.

D'après ces observations, l'augmentation du diamètre,  $D$  (m), de la boule de feu sphère pour le premier tiers du temps total est donné par l'empirique expression [Hardee, Lee & Benedict 1978]

en fonction du temps,  $t$  (s),

$$D = C_1 M^{1/4} t^{1/3} \quad (5)$$

Dans l'expression ci-dessus  $C_1 = 8,664 \text{ m kg}^{-1,4} \text{ s}^{-1/3}$

Afin de calculer le diamètre maximum  $D_{max}$  (m), et le temps total durée,  $t_{max}$  (s), de la boule de feu, deux algorithmes empiriques ont été proposés

a) Méthode Roberts [Roberts 1982]

b) TNO Méthode [TNO 2005]

**a) Méthode Roberts Selon Roberts [Roberts 1982] :**

Le diamètre maximal,  $D_{max}$  (m) et la durée totale,  $t_{max}$  (m), de la sphère de boule de feu sont calculés des expressions empiriques suivantes:

$$D_{max} = C_2 M^{1/3} \quad (6)$$

$$t_{max} = C_3 M^{1/3} \quad (7)$$

Où,  $C_2 = 5,8 \text{ mkg}^{-1/3}$  et  $C_3 = 0,45 \text{ skg}^{-1/3}$

**b) TNO Méthode :**

TNO [TNO 2005] à proposé que le diamètre maximal  $D_{max}$ (m) et le total durée,  $t_{max}$  (s) de la boule de feu doit être calculé à partir des éléments suivants expressions empiriques : [19]

$$D_{max} = C_4 M^{0,325} \quad (8)$$

$$t_{max} = C_5 M^{0,26} \quad (9)$$

Où,  $C_4 = 6,48 \text{ mkg}^{-0,325}$  et  $C_5 = 6,48 \text{ skg}^{-0,26}$

La figure IV-3 montre la comparaison des deux méthodes pour deux cas :(a) masse de 10 000 kg et (b) une masse de 20 000 kg. On peut remarquer que les valeurs des deux durée totale et le diamètre maximum est très proche. Dans la même figure l'augmentation du diamètre,  $E_q$ . (5) pour le premier tiers de la durée totale est également montré. Pendant ce temps, le diamètre a atteint sa valeur maximale. Graphique IV-3

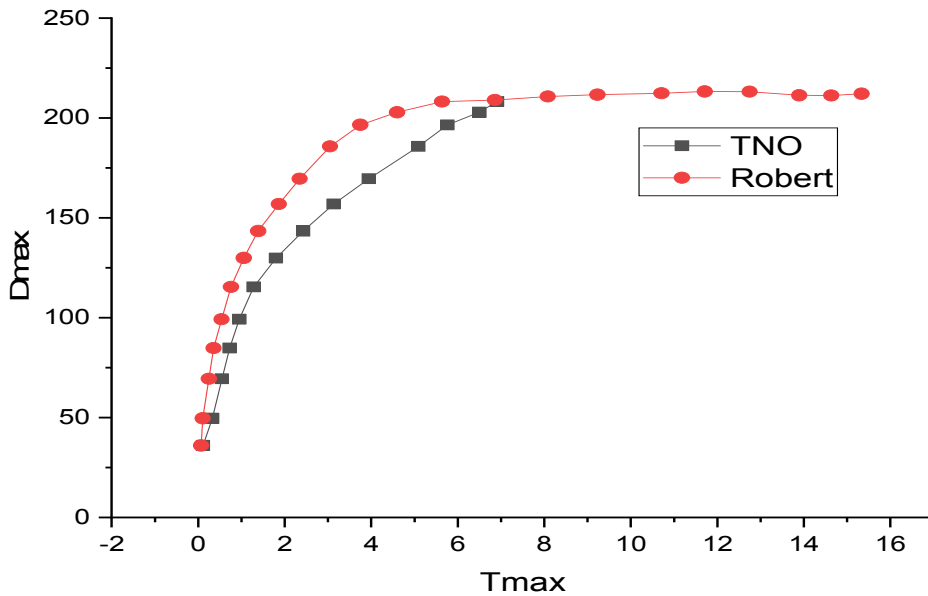


Figure IV.3 : Graphe de Comparaison des méthodes de Roberts et TNO.

Enfin, la hauteur du centre de la boule de feu par rapport au sol,  $H$  (m), est généralement considéré égale au diamètre maximum,  $D_{max}$  (m)

$$H = D_{max} \tag{10}$$

### IV-3-3. Taux de combustion :

La vitesse de combustion,  $m'$  (kg / m<sup>2</sup>s), peut être calculée en fonction de la masse (Kg) de la substance inflammable et de la durée totale de la boule de feu,  $t_{max}$  (s) comme : [19]

$$m' = \frac{M}{(0,888\pi D_{max}^2)t_{max}} \tag{11}$$

Où  $(0.888 \ 2\pi \ D_{max}^2)$  est la surface moyenne temporelle de la sphère de boule de feu.

**IV-3-4. Puissance d'émission de surface maximale :**

La puissance d'émission de surface maximale,  $SEP_{max}$  (kW / m<sup>2</sup>), comme dans le cas des feux de piscine.

Eq. (12) peut être calculé en fonction de la vitesse de combustion taux,  $m'$  (kg / m<sup>2</sup>s), La chaleur de combustion,  $\Delta H_C$  (kJ / kg), et la fraction de rayonnement,  $F_s$  (-), que représente la fraction de l'énergie de combustion rayonnée de la surface de la flamme, comme : [19]

$$SEP_{max} = F_s m' \Delta H_C . \quad (12)$$

Dans cette expression, on a supposé que l'énergie rayonnée est d'environ égal à la chaleur de combustion c'est-à-dire la chaleur de vaporisation ainsi que l'enthalpie requise pour élever la température de la température ambiante au point d'ébullition tous deux ont été ignorés. Cette hypothèse est valable, car la valeur de la chaleur de combustion est beaucoup plus grande. Finalement, dans Eq. (8) pas de correction de surface proportionnelle à cela dans Eq. (12) est nécessaire, comme le taux de combustion dans ce cas se réfère déjà à la surface de la sphère. Pour le calcul de la fraction de rayonnement,  $F_s$  (-), l'expression suivante a été proposée [TNO 2005, Roberts 1982]

$$F_s = C_6 P_{sv}^{0,32} \quad (13)$$

Où  $C_6 = 0,00325 P_a^{-0,32}$  et  $P_{sv}$  ( $P_a$ ), désigne la pression de vapeur à l'intérieur du navire. Habituellement, la fraction de rayonnement prend des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4 [Roberts 1982].

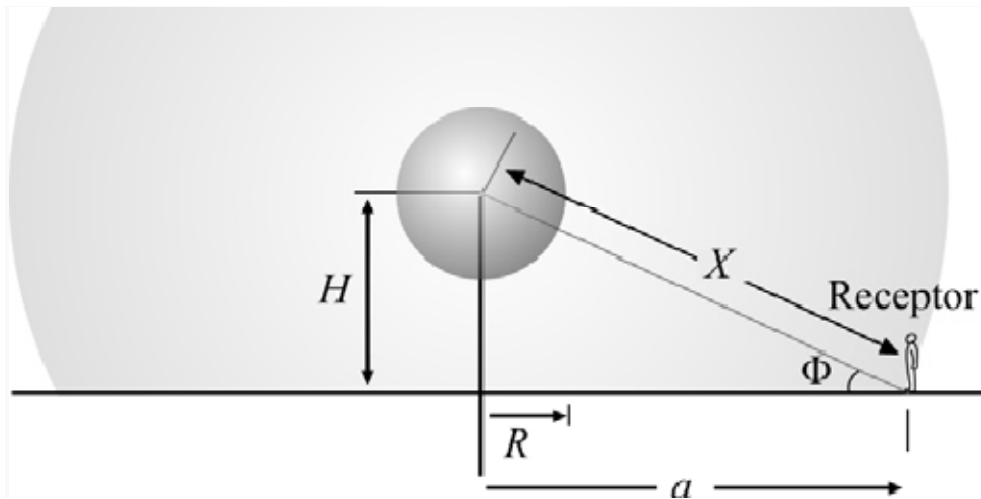
**IV-3-5. Puissance d'émission réelle en surface :**

Dans le cas d'une boule de feu qui est une expansion très rapide de gaz avec une très faible durée d'incendie, on suppose généralement qu'il ne se forme pas assez de suie pouvoir influencer le flux de chaleur radiatif. Par conséquent, on suppose que : [19]

$$SEP_{act} = SEP_{max} \quad (14)$$

**IV-3-6. Le facteur de vue :**

Le facteur de vue,  $F_{view}(-)$ , exprime la fraction du rayonnement émis qui atteint le récepteur par unité de surface (Le récepteur peut être humain ou n'importe quel objet). Dans ce cas, la forme du feu est considérée comme une sphère parfaite (Figure IV-4). [19]



*Figure IV.4 :Boule de feu.*

La chaleur totale émise par une sphère de rayon  $R$  est égale à  $SEP_{act}(4\pi R^2)(kW)$ . Au loin,  $X$  (m), du récepteur, la même chaleur émise par unité de surface est égale à  $SEP_{act}(4\pi R^2)/(4\pi X^2)$  ( $kW/m^2$ ). Par conséquent, le facteur de vue,  $F_{view}$ , auquel le récepteur «fait face» est

$$F_{view} = (R/X) \quad (15)$$

Où

$$X = \sqrt{H^2 + a^2} \quad (16)$$

**IV-3-7. Flux de chaleur :**

Le flux de chaleur,  $q'$  ( $kW/m^2$ ), à une distance précise du centre du feu (la distance entre les calculs par le facteur de vue et l'atmosphère transmissivité), est calculé comme indiqué dans l'introduction. [19]

- voir Eq. (17) -à partir du produit de la puissance réelle d'émission en surface,  $SEP_{act}(kW/m^2)$ , le facteur de vue,  $F_{view}$  (-), et la transmissivité atmosphérique,  $\tau_a$  (-), comme

$$q' = SEP_{act} F_{view} \tau_a \quad (17)$$

Dans l'expression ci-dessus,  $P_w(P_a)$ , désigne la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air tandis que X (m) est la distance du récepteur du centre du feu de rayon  $R$  (m). La constante  $C_7$  est égale à  $2,02 P_a^{0.09} m^{0.09}$ .

La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air peut facilement être calculée à partir de la pression de vapeur saturante,  $P_w^0(P_a)$ , Dans l'air et l'humidité relative,  $HR$  (fraction 0-1), comme :

$$P_w = RH P_w^0 \quad (18)$$

Valeurs typiques de la puissance réelle d'émission en surface,  $SEP_{act}$  d'une boule de feu sont généralement entre 150 et 300  $kW / m^2$ , tandis que les mesures sur les boules de feu au butane ont montré des valeurs jusqu'à 350  $kW / m^2$ .

**IV-3-2. Paramètre des fragments :**

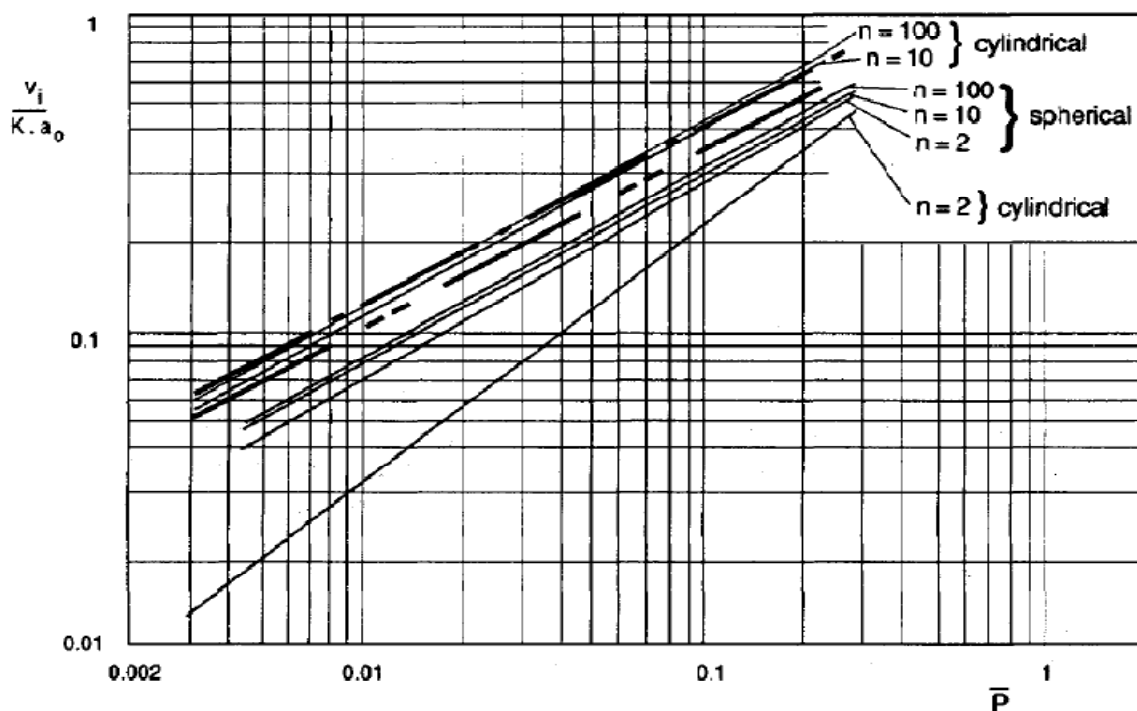
Les paramètres les plus importants dans le calcul des fragments sont la vitesse, la portée et le nombre. C'est des paramètres qui permettent de délimiter la zone de sécurité correspondante à chaque cas de stockage pour protéger le personnel et les biens.

### IV-3-2-1. Calcul de la vitesse des fragments:

Après rupture du réservoir, ses fragments sortent avec une vitesse initiale maximale, ensuite ils décélèrent rapidement vers une vitesse minimale. Cette valeur initiale du fragment est utilisée pour calculer la trajectoire du fragment ou la vitesse d'impact s'il y a collision avec un obstacle en plein déplacement. [20]

La vitesse maximale initiale peut être calculée de plusieurs façons, une première méthode concerne la conversion de l'énergie totale interne du réservoir donnée par l'équation de Brode (1) en une énergie cinétique. Ce qui va se traduire par une surestimation de la vitesse initiale.

L'autre méthode est une étude théorique et numérique (Baker et al. 1983) qui a permis de dresser des diagrammes donnant la vitesse initiale du fragment (figure IV-5). Cette figure donne la vitesse adimensionnelle en fonction de la pression adimensionnelle pour différents nombres de fragments 'n' et pour des géométries différentes de fragments.



*Figure IV.5 : Vitesse adimensionnelle du fragment en fonction de la pression adimensionnelle.*

Dans cette figure, les termes adimensionnels sont : la pression adimensionnelle, donnée par :

$$\bar{P} = \frac{(P-P_0)V}{M_c a_0^2} \quad (19)$$

Avec :

P : Pression d'éclatement de la sphère (Pa).

P<sub>0</sub>: Pression atmosphérique du gaz (Pa).

V: Volume de la sphère (m<sup>3</sup>).

M<sub>c</sub> : Masse du réservoir sans gaz [Kg]

a<sub>0</sub> : Vitesse du son dans le gaz se trouvant dans le réservoir (m /s)

La vitesse du son dans le gaz contenu est :

$$a_0 = \sqrt{\gamma r T} \quad (20)$$

T: Température de rupture (K).

r : Constant du gaz dans le réservoir (J/kg.K)

γ : Rapport des chaleurs spécifiques (-)

La vitesse adimensionnelle est donnée par l'équation de Baum (1984) : [21]

$$\bar{v}_i = \frac{v_i}{K a_0} \quad (21)$$

$\bar{v}_i$  : Vitesse initiale adimensionnelle des fragments

v<sub>i</sub> : Vitesse du fragment (m /s)

K : est un facteur d'ajustement représentant la fraction massique d'un fragment. Il est égal à 1 pour des fragments de même taille (figure IV-6)

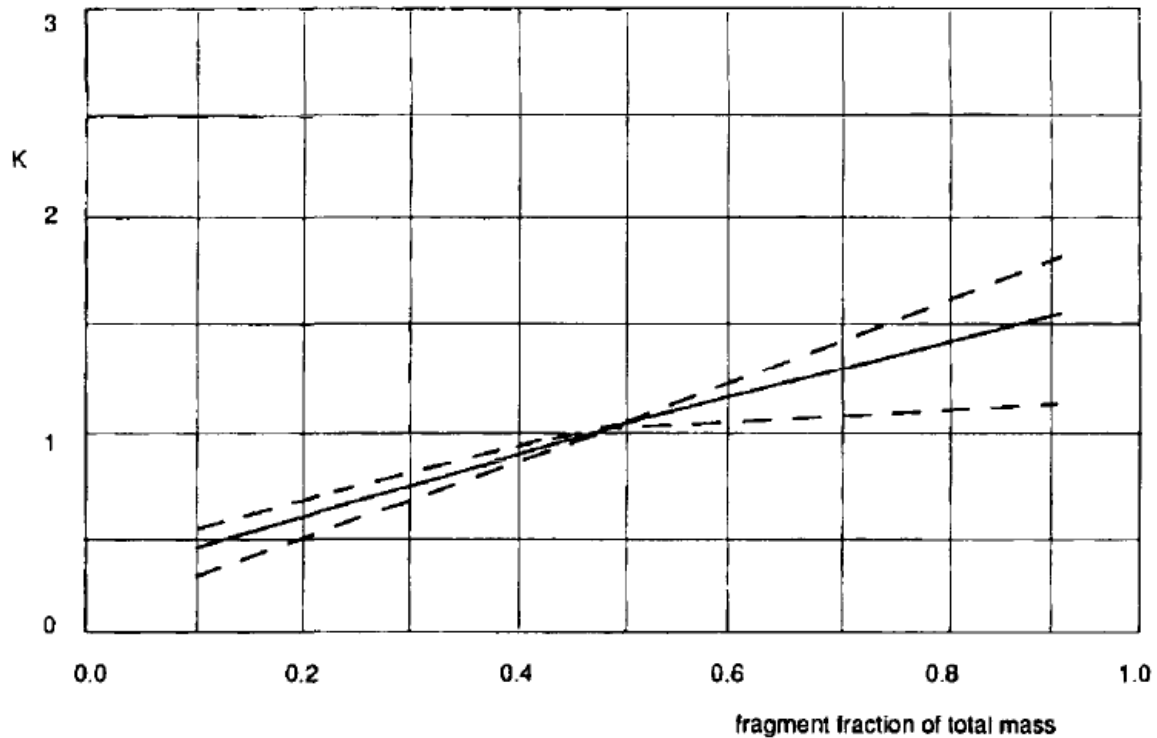


Figure IV.6 : Facteur d'ajustement K pour la masse des fragments d'après Baker et Al (1983).

**IV-3-2-2. Calcul de la portée maximale des fragments :**

La portée maximale des fragments s'éjectant dans l'air après l'explosion d'un réservoir est donnée par l'équation d'un projectile, elle est atteinte pour un angle  $\alpha=45^\circ$  et est donnée par l'expression. [19]

$$r_{max} = \frac{v_i^2}{g} \tag{22}$$

Où:

$r_{max}$  : Portée maximale des fragments (m).

$v_i$  : Vitesse des fragments (m/s).

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).

D'autres modèles expérimentaux sont disponibles dans la littérature, tels que le modèle de Birk et al (1996), qui donne : [22]

- Pour des volumes de réservoirs de moins de  $5 m^3$ , la distance est  $R = 90 m^{0.33}$
- Pour des volumes de réservoirs de plus de  $5 m^3$ , la distance est  $R = 465 m^{0.10}$

A partir de la fig IV-7 : la portée maximale adimensionnelle des fragments est donnée par cette équation. [19]

$$\bar{R} = \frac{\rho_0 C_D A_D R}{M_f} \quad (23)$$

Et la vitesse adimensionnelle est donnée :

$$\bar{v}_i = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} \quad (24)$$

$\bar{R}$ : La portée maximale adimensionnelle des fragments (-)

$\bar{v}_i$ : La vitesse adimensionnelle (-)

$R$  : portée maximale (m)

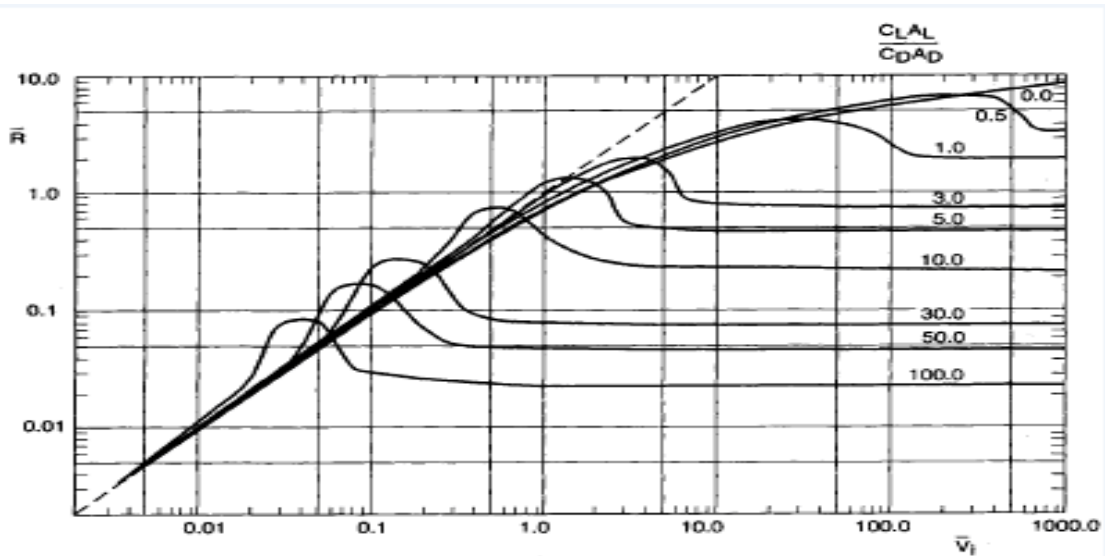
$\rho_0$ : Densité de l'atmosphère ambiante ( $kg/m^3$ )

$C_D$ : Coefficient de traînée (-)

$A_D$ : Zone exposée dans le plan perpendiculaire à la trajectoire ( $m^2$ )

$g$  : accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ )

$M_f$  : Masse de fragment (kg).



**Figure IV.7 :** Courbes échelonnées pour les prédictions de gamme de fragments (Baker et al. 1983).

### Exemple 01

Un accident de la route impliquant un camion-citerne a entraîné une augmentation de la pression à l'intérieur du camion-citerne et un BLEVE conséquent. Le pétrolier a une capacité de 50 m<sup>3</sup> et était de 85% plein de GPL (gaz propane liquéfié). Tout le propane a été libéré, et s'enflamme immédiatement, formant une boule de feu.

Calculez le flux thermique à 150 m du camion-citerne. Les données suivantes sont disponibles:

Chaleur de combustion, $\Delta H_c$	46,000	kJ/kg
Pression dans le camion-citerne, $P_{sv}$	1,6	MPa
Température ambiante, $T_a$	298	K
Densité, $\rho_{LPG}$	517	kg/m <sup>3</sup>
Pression de vapeur d'eau de saturation, $P_w$	2,320	Pa
Humidité relative, RH	0.7	-

La masse de propane est :  $M = 0,85 V \rho_{LPG} = 0,85 \times 50 \times 517 = 21,973 \text{ kg}$ .

Utilisant les expressions de Roberts (Les équations TNO produisent des résultats), on obtient

$$D_{max} = 5,8M^{1/3} = 162 \text{ m}$$

$$t_{max} = 0,45M^{1/3} = 12,26 \text{ s} ,$$

tandis que la hauteur du centre de la boule de feu est  $H = D_{max} = 162 \text{ m}$ .

**a) Taux de combustion :**

Le taux de combustion,  $m$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) peut être calculé à partir de l'Eq. (11), comme :

$$m' = \frac{M}{(0,888 \pi D_{max}^2) t_{max}} = 0,024 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$$

**b) La puissance d'émission de surface maximale et réelle :**

Pour obtenir la puissance d'émission de surface maximale,  $SEP_{max}$  ( $\text{kW} / \text{m}^2$ ), il faut d'abord calculer la fraction de rayonnement,  $F_s$  (-), Eq. (13), comme :

$$F_s = 0,00325 P_{sv}^{0,32} = 0,314,$$

et donc de l'Eq. (12),

$$SEP_{max} = F_s m' \Delta H_c = 342,3 \text{ kW}/\text{m}^2$$

Parce qu'il n'y a pas de temps pour que la suie soit collectée autour de la surface de la boule de feu,

$$SEP_{act} = SEP_{max} = 342,3 \text{ kW}/\text{m}^2.$$

**C) Facteur de vue :**

Par substitution directe dans les équations. (15) et (16), on obtient

$$X = \sqrt{H^2 + a^2} = (162,5^2 + 150^2)^{1/2} = 221,1 \text{ m}$$

$$F_{view} = (R/X)^2 = 0,135$$

**d) Flux thermique :**

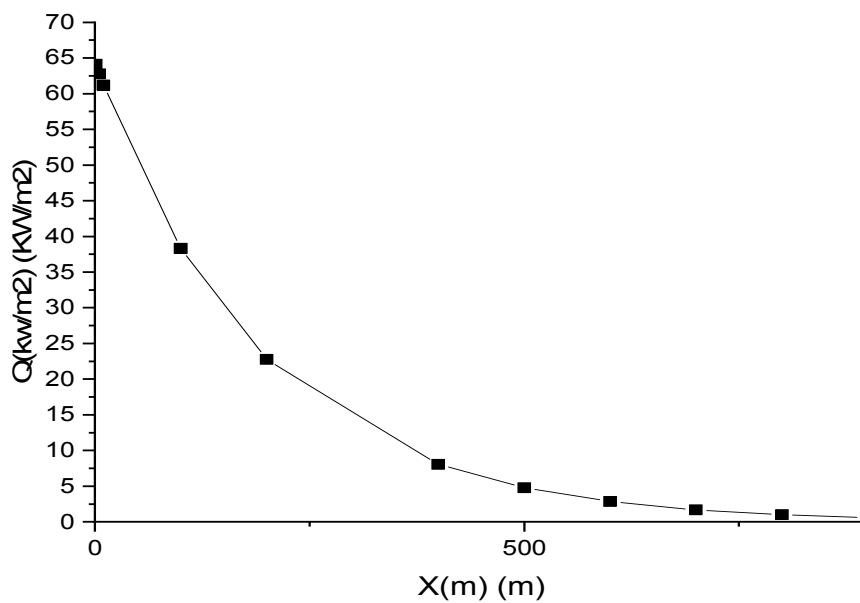
Afin de calculer le flux thermique, la transmissivité atmosphérique,  $\tau_a(-)$ , de Eq. (18) doit d'abord être calculé. Dans Eq. (18),  $P_w = 2,320 \times 0,7 = 1,624 P_a$ , tandis que  $X = 224,5 m$  et

$$\tau_a = 2,02[P_w(X - R)]^{-0,09} = 0,67$$

Donc

$$q' = SEP_{act} F_{view} \tau_a = 30,8 kW/m^2$$

La figure IV-8. Montre le flux de chaleur en fonction de diamètre de la flamme. Il peut être observé qu'à 500 m le flux de chaleur est réduit à  $4,9 kW/m^2$ , qui reste cependant une valeur assez élevée (le rayonnement solaire est de  $1 kW/m^2$ ).



**Figure IV.8.** Graphe de Flux chaleur en fonction de diamètre de la flamme.

**Exemple 02**

Calcul de la vitesse des fragments après une rupture d'un réservoir de GPL

Les données :

- Le volume totale de réservoir:  $V = 0.0628 \text{ m}^3$ .
- La masse totale de réservoir:  $m = 100 \text{ Kg}$ .
- Le nombre de fragment: 2.
- La fraction de masse des deux fragments: 0.25 et 0.75.
- La pression du gaz au sein de réservoir : 20.101 Mpa.
- Pression atmosphérique de gaz : 0.101 Mpa.
- La température du gaz au sein de réservoir: 300°K.
- Poids moléculaire du gaz au sein de réservoir : 4
- Rapport de capacité calorifique: 1.1.

➤ Pour calculer la vitesse du son dans le gaz qui se trouve dans le réservoir :

$$a_0 = \left( \frac{T\gamma R_g}{M} \right)^{1/2}$$

$$a_0 = \left[ \frac{300 \times 1,4 \times 8,314 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}}{4 \times \left( \frac{1}{1000} \right)} \right]^{1/2} = 1020 \text{ m/s}$$

➤ La pression adimensionnelle :

$$\bar{P} = \frac{(P - P_0)V}{M_c a_0^2} = \frac{[(20,1 - 0,1) \times (10^6 P_a) \times (0,0628)]}{100 \times (1020)^2} = 0,012$$

D'après la figure 1 et tant que  $n=2 \Rightarrow$  La vitesse initiale adimensionnel des fragments de la sphère est  $\bar{v}_i = 0,079$

D'après la figure 4 et tant que la masse de fraction  $M = 0,75. K = 1,29$  et pour la fraction de mass  $M = 0,25. K = 0,63$ .

➤ La vitesse réelle de chaque fragment :

a) pour le grand fragment :

$$\bar{v}_i = \frac{v_i}{K a_0} \Rightarrow v_i = \bar{v}_i k a_0 = (0,0793) \times (1,3) \times (1020)$$
$$v_i = 105,15 \text{ m/s}$$

b) pour le petit fragment :

$$v_i = (0,0793) \times (0,635) \times (1020)$$
$$v_i = 51,36 \text{ m/s}$$

**Remarque :** Le grand fragment a la plus grande vitesse que le petit fragment.

### **Exemple 03**

La portée maximale des fragments qui vent dans l'aire

**Les données :**

Masse de fragment : 100 kg,

Vitesse initiale de fragment : 25m/s,

Coefficient de trainée de fragment : 0,47,

Diamètre de fragment : 2m,

Surface exposé de fragment :  $3,14m^2$ ,

Température de l'aire ambiante : 298°K,

Pression de l'aire ambiante : 1 atm,

Coefficient de trainée :  $C_D = 0,47$ .

- Calcule de la densité de l'aire ambiante :

$$\rho_a = \frac{PM}{R_g T} = \frac{(1) \times (29)}{[(0,082057 \times 298)]} = 1,185 \text{ kg/m}^3$$

- La surface du fragment est :

$$A_D = (3,14) \times \frac{(2)^2}{4} = 3,14 \text{ m}^2$$

Nous supposons que le fragment vole avec sa pleine surface de la face perpendiculaire la direction du voyage :  $C_D = 0,47$

- Vitesse adimensionnelle de fragment :

$$\begin{aligned} \bar{v}_i &= \frac{\rho_D C_D A_D v_i^2}{M_f g} \\ &= \frac{(1,19) \times (0,47) \times (3,14) \times (25)^2}{(100) \times (9,8)} = 1,12 \end{aligned}$$

A partir de la figure IV-7. la porte maximale adimensionnelle des fragments est :

$$\bar{R} = 0,81$$

- La portée actuelle est déterminée à partir de cette équation :

$$r = \frac{\bar{R} M_f}{\rho_a C_D A_D}$$

$$\Rightarrow r = \frac{(100) \times (0,81)}{(1,19) \times (0,47) \times (3,14)} = 46,12 \text{ m}$$

- La portée maximale est déterminée à partir de cette équation :

$$r_{max} = \frac{v_i^2}{g} = \frac{(25)^2}{(9,8)} = 63,77 \text{ m}$$

## Exemple04

Le Terminal PEMEX GPL (gaz propane liquéfié), de  $16000 m^3$ , à San Juan Ixhuatepec dans la banlieue de Mexico, a été régulièrement alimenté par 3 raffineries. A 05h35 du 19 Novembre 1984, la salle de contrôle a remarqué une chute de pression dans la station de pompage, sans toutefois être en mesure de trouver sa cause. Un pipeline de diamètre 8 entre un réservoir de stockage sphérique et un groupe de récipients cylindriques avait une fuite. La fuite a duré entre 5-10 min, tandis que le vent était à 0,4 m/s dans la région. Un grand nuage de vapeur a été formé, suivie d'une UVCE.

Calculer la surpression dans des distances de 25, 75, 125 et 200 m, et de tracer la courbe de surpression en fonction de la distance par rapport au centre de l'explosion. Les données suivantes sont disponibles:

La chaleur de combustion de TNT.  $\Delta H_{TNT} = 4,760 \text{ kJ/kg}$ .

La chaleur de combustion du gaz inflammable [KJ/kg].  $\Delta H_c = 46,010 \text{ kJ/kg}$ .

La masse du gaz inflammable qui participe à l'explosion [kg].  $M_G = 4,750 \text{ kg}$  (propane).

Premièrement, il faut calculer la masse équivalente TNT,  $M_{TNT}$ (kg), à partir de l'équation (2). Depuis la fraction d'énergie libérée comme une onde de choc ne soit pas connu, il est arbitrairement supposé que  $f_e = 0,05$  (il faut des valeurs comprises entre 0,01 et 0,1).

$$M_{TNT} = \frac{f_e \times \Delta H_c \times M_G}{\Delta H_{TNT}} = \frac{0,05 \times 46,010 \times 4,750}{4,760} = 2,29 \text{ kg}$$

Par conséquent, pour une distance  $x = 25\text{m}$ ,

$$Z = \frac{x}{M_{TNT}^{1/3}} = 1.90 \text{ m/kg}^{1/3} \quad (\text{à partir du tableau [2]})$$

X (m)	z	Ps (bar)	Ps (bar) [eqt(1)]
25	1.90	2.33	1.20
75	5.69	0.23	0.21
125	9.49	0.11	0.09
200	15.16	0.06	0.05

**Tableau IV.2:** la surpression en fonction de la distance.

Et a partir de l'équation (3): [équation analytique de la surpression]

$$P_s = \frac{80,800 \times \left(1 + \left(\frac{Z}{4,5}\right)^2\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35}\right)^2}} = 233 \text{ kPa} = 2,33 \text{ bar}$$

## Conclusion

Cette partie de calcul est une illustration de quelques phénomènes qui peuvent se produire lors d'un BLEVE ou UVCE. On a conclu que lorsque le feu se déclare il faut impérativement protéger les produits entreposés contre les flammes les ondes générées par la boule de feu ainsi que les fragments qui sont responsables de beaucoup de sinistres.

Il existe d'autres méthodes de calcul empirique qu'on n'a pas présentées ici.















## *Conclusion générale*

### **Conclusion générale**

Cette étude qui est présentée dans ce mémoire est un aperçu global sur les grands risques liés au stockage du GPL. Nous avons mis en évidence via une matrice de cause à effet les phénomènes ou scénarios les plus dangereux qui peuvent se présenter lors du stockage et de distribution du GPL, tels que l'UVCE, le BLEVE.... Lorsque un feu se déclare, il peut entraîner des dégâts considérables et causer beaucoup de désastres industriels liés directement à la sécurité des biens et des personnes.

Nous avons aussi souligné les aspects relatifs au stockage de GPL à proximité d'habitations civiles, dont il faut impérativement instaurer une politique liée aux distances de sécurité qu'il faut respecter en adéquation avec les normes en vigueur car des incendies peuvent survenir et entraîner de graves accidents, sur le public allant des effets simples tels que les brûlures jusqu'à une catastrophe écologique énorme.

Enfin, pour éviter les dégâts d'une explosion soit que l'UVCE ou BLEVE dans les dépôts de stockage du GPL, il faut cultiver les normes importantes et faire des calculs préventifs avec des plusieurs modèles qui sont utilisés dans la perspective de la prévention.

## Référence

- [1]. Comité français butane propane, GPL carburant historique, site web [www.cfbp.fr](http://www.cfbp.fr), Avril(2010).
- [2] Gaz de pétrole liquéfiés, site web [www.naftal.dz](http://www.naftal.dz), (Mar 2010).
- [3]. Page 7 a propos de GPL Manuel d'installation GPL version 1.2 [www.kpsystem.com](http://www.kpsystem.com).
- [4]. Comité français du butane et du propane, le gaz butane propane, site web [www.cfbp.fr](http://www.cfbp.fr)(mai2010).
- [5]. (PRÉVENTION DE RISQUES DE CATASTROPHES DANS LES DÉPÔTS DE GPL: CAS DE ORYX-GPL-TOGO) TOGBONOU Koffi Sémégnon Géographe / Consultant].
- [6]. J.P.Wauquier, pétrole brut, produit pétrolières, schémas de fabrication, (tome I) édition Technip (1994).
- [7]. Chouat, Chahinez. Etude de l'unité GTFT en mode Turn Down. Janvier 2017; 61P.
- [8]. Hajd, Ali Djamel. Etude de la section de déshydratation de l'unité GPL-2 HASSIMESSAOUD. Aout 2005; 75P.
- [9]. J.P.Wauquier, pétrole brut, produit pétrolières, schémas de fabrication, (tome I) édition Technip (1994).
- [10]. Thèse. Analyse des risques et modélisation des conséquences d'explosion d'une sphère au niveau du complexe GPL/z .Université de STOMB.2013-2014.
- [11]. Kaabouche, Boumedién. Description de la section de stockage de l'unité GPL-1 HASSI MESSAOUD. Novembre 2017; 38P.
- [12]. Thèse de doctorat. Dahlia Oueidat. Apport de la modélisation et de la simulation à l'analyse des risques et la prévention des accidents d'un site de stockage de GPL. Gestion et management. PSL Research University, [2016].
- [13]. Etude des fours tubulaires de l'unité GPL-1 à HASSI-MESSAOUD. Septembre 2015; 91P.
- [14]. Étude de dangers des ICPE - Analyse des scénarios, Date de publication (10/04/2006) Jean-Louis SEVEQUE *Docteur en géochimie, Consultant, Expert judiciaire près la cour d'appel d'Amiens*.
- [15]. Le B.L.E.V.E.-PDF.
- [16]. Par Ismahane EL BAHLOUL *Consultante HSE* et Jean-Louis SEVEQUE *Docteur en géochimie, consultant, expert judiciaire près la cour d'appel d'Amiens* Étude de dangers des ICPE Mesures compensatoires – Exemples : prévention des feux de nappe et du BLEVE.
- [17]. Soutenue par Maryam GALLAB Le 05 Juin 2017. THÈSE DE DOCTORAT de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre MINES ParisTech et

Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI), Développement d'une approche d'aide à la maîtrise des risques dans les activités de maintenance d'une chaîne logistique : Approche par Modélisation et Simulation basée sur les Systèmes Multi-Agents.

**[18].** Marc J.Assael. Kanstantinos E.Kakosimo, Fires, Explosion and toxic gas dispersions. Effects calculation and Risk Analysis.

**[19].** Marc J. Assael, Konstantinos ,E. Kakosimos, FIRES, EXPLOSIONS, AND TOXIC GAS DISPERSIONS Effects Calculation and Risk Analysis.

**[20].** Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi, The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management, Journal of Hazardous Materials 141 (2007) 489–519, Elsevier.

**[21].** Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure vessel Burst, BLEVE,and Flash Fire Hazardous-Second Edition ,Center for chemical Process Safety New York ,A John Wiley et sons ,INC ,PuBLICATION 2010 :ISBN978-0-470-25147-8.

**[22].** W.E.Martines ,J.D.Marx, An improved model for the prediction of radiant heat flux form fireball, in:Proceedings of the International Conference and Workshop on Modeling the consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. San Francisco.1999.

## Résumé :

Le but de ce travail est l'évaluation des risques liée au stockage de GPL.

Lorsque un feu se déclare il faut protéger les produits entreposés contre les incendies, les effets et les conséquences des incendies sont étudiés dans ce mémoire tel que le BLEVE, UVCE, Le feu de nappe ....ect .

Le calcul des énergies libérées lors d'un BLEVE et UVCE ont été effectués ainsi que le calcul des vitesses des fragments issu de ce type d'incendies et leurs conséquences sur l'environnement.

### ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تقييم المخاطر المرتبطة بتخزين غاز البترول المسال. عندما يعلن حريق أنه من الضروري حماية المنتجات المخزنة من الحرائق ، تتم دراسة آثار وعواقب الحرائق في هذا التقرير مثل BLEVE و UVCE وحريق المسبج ... إلخ. تم تنفيذ حساب الطاقات المنبعثة خلال BLEVE و UVCE وكذلك حساب سرعات الشظايا الناتجة عن هذا النوع من الحرائق وعواقبها على البيئة

### Summary:

The aim of this work is to assess the risks associated with the storage of LPG.

When a fire declares it is necessary to protect the stored products against fires, the effects and consequences of fires are studied in this report such as the BLEVE, UVCE, the pool fire... .ect.

The calculation of the energies released during a BLEVE and UVCE has been carried out as well as the calculation of the velocities of the fragments resulting from this type of fires and their consequences on the environment.