

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**



**Université M'Hamed Bougara-Boumerdes**  
**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
**Département Transport et Equipements des hydrocarbures**



**Mémoire de Fin d'Etude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER**  
**Option : Mécanique des unités pétrochimique**

Présenté par : CHAIB Oussama

RAHENE Oussama

**THEME**

---

**Convection naturelle dans la phase gazeuse du GPL stockée dans  
une sphère**

---

Devant le jury :

	<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	
Examineur	BETTAYEB MOURAD	MCB	UMBB
Examineur	MEFTAH SIHAM	MCA	UMBB
Encadrant	KHELIFI TOUHAMI M.SALAH	MCB	UMBB

---

# Remerciement

Avoir rendu grâce à dieu le tout puissant et le miséricordieux, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre cher enseignant et encadreur M.S KHELIFI-TOUHAMI pour le temps qu'il a consacré et pour son suivi et pour les précieuses informations qu'il nous a prodigués avec intérêt tout au long de la période du mémoire.

Nous remercions beaucoup nos enseignants du département transport et équipements pour les efforts déployés tout au long de notre spécialité en mécanique des unités pétrochimiques.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel de la raffinerie d'Arzew précisément la zone de production de carburant et la zone de stockage et expédition pour leurs patiences, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement notre famille d'avoir parmi nous de faire de longues études loin de chez nous et d'avoir nous soutenu pendant ces 5 années.

---

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour*

*A celle qui m'arrosé de tendresse et d'espoir, a celle qui n'a jamais cessée de formuler des prières à mon égard, de me soutenir moralement et financièrement et de m'épauler pour je puisse atteindre mes objectifs, qui n'aépargne aucun effort pour me rendre heureux, sa bienveillance me guide et saprésence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Mon adorable mère HAMIDI HOVARIA.*

*A ma chère grande sœur SANAA et son époux HANSAL HABIB, pour leurs aides et supports dans les moments et les instants plus difficiles.*

*A mes adorables sœurs FATIMA et NASSIMA qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mon parcours, et qui savent toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille, que dieu les protégé et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mon ami ADJISSI ISSAM cet ami est comme un frère pour moi je le considère comme partie intégrante de notre famille.*

*A mes chers amis BELGOUR CHIKH, BOULEMDAOUD AMMAR, ZIANE CHERIF YUCEF, BELABBAS MOUNIR, MALEK SIDAHMED, GHACHI SAMY.*

*Pour leurs aides et qui n'ont pas cessé de me chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma voisine SETTI et ses enfants pour leurs amours et leurs encouragements*

*Sans oublier mon binôme RAHENE OUSSAMA pour son soutien moral, sapatience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*CHAIB OUSSAMA*

---

# Dédicace

*Je dédie ce travail à  
MA TRÈS CHÈRE MÈRE GHANIA.*

*J'ai de la chance d'avoir une mère aussi dévouée et attentionnée que toi, c'est un privilège plus rare qu'on ne le croit. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études. Par les inestimables sacrifices que tu as consentis pour moi, tu as tant souhaité que je parvienne à ce but. Je te serai reconnaissant toute ma vie, qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé.*

*MON TRÈS CHER PÈRE OMAR,*

*Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé.*

*A mes Chers frères ; JIDO ET MOHAMMED.*

*Pour toute l'ambiance dont vous m'avez entouré, pour toute la spontanéité et l'amour que vous me le porter, Je vous dédie ce travail.*

*A ma sœur ; INSAF.*

*Petite sœur de cœur Apportant du bonheur Je veux te remercier Pour nos complications.*

*Mes amis et collègues ; BOUCHRA, YUCEF, KADER, AYMENE,  
DJALIL, RADWAN, IHAB, MEHDI, MHAMED.*

*Vous avez donné un sens à ces années je me suis rendue compte à quel point, pour moi ce n'était pas seulement un diplôme que je récolterais à la fin, mais aussi des amis comme vous.*

*Sans oublier mon binôme CHAIB OUSSAMA pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*RAHENE OUSSAMA*

# Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralité

I.1	Introduction .....	2
I.2	Composition des pétroles bruts et ses dérivés .....	2
I.3	Généralités sur le raffinage .....	3
I.3.1	Les fractions de pétrole brut .....	3
I.4	Les trois étapes du raffinage.....	4
I.4.1	Les procédés de séparation .....	4
I.4.2	Les procédés de conversion.....	5
I.4.3	Les procédés d'épuration.....	6

## Chapitre II : La raffinerie d'Arzew

II.1	Historique de la raffinerie .....	9
II.2	Présentation des principales installations de RA1Z.....	11
II.2.1	Département de production P1 .....	11
II.2.2	Département de production P3 .....	12
II.2.3	Département de production P2 .....	15
II.2.4	Département de production P3 .....	15
II.2.5	Département de production P4.....	16
II.2.6	Laboratoire de contrôle .....	16
II.2.7	Département de sécurité industrielle.....	16

## Chapitre III : Généralités sur le GPL

III.1	Définition du « Gaz Pétrole Liquéfié » .....	18
III.2	Sources de GPL .....	18
III.3	Les caractéristiques générales du GPL.....	19
III.4	Unité 13 de récupération et traitement des LPG.....	19
III.4.1	Description du process.....	19
III.4.2	Spécifications technique de la charge et produits.....	20
III.5	Les caractéristiques du propane et du butane .....	22
III.6	Utilisation de GPL.....	23
III.6.1	Le GPL dans la production combinée de chaleur et d'énergieélectrique .....	23
III.6.2	Utilisation de GPL pour les applications industrielles .....	23
III.6.3	Utilisation de GPL pour les applications agricoles .....	23
III.6.4	GPL dans la climatisation .....	23
III.7	GPL carburant .....	24
III.7.1	Comparaison du GPL-c et de l'essence .....	25
III.7.2	Avantages techniques de GPL/c .....	26
III.7.3	Inconvénients.....	26

## Chapitre IV : Stockage et terminaux

IV.1 Introduction .....	27
IV.2 Définition d'un bac de stockage et d'un terminal pétrolier .....	27
IV.3 Les raisons de sa présence .....	27
IV.4 Rôle Du Stockage .....	27
IV.5 Classification des bacs de stockage .....	27
IV.5.1 Classification selon la pression de stockage .....	27
IV.5.2 Classification selon le type de construction .....	28
IV.5.3 Classification selon la forme du bac de stockage .....	28
IV.5.4 Selon la pression de vapeur et température de stockage du produit stocké .....	28
IV.6 Mode de stockage .....	30
IV.6.1 Stockage Non-pressurisé .....	30
IV.6.2 Stockage sous pression .....	30
IV.6.3 Stockage à température contrôlée .....	30
IV.7 Le stockage du GPL .....	30
IV.8 Les constituants qui provoquent des problèmes pendant le stockage, la production et le transport .....	31
IV.8.1 Réservoirs cylindriques horizontaux (cigares) .....	31
IV.8.2 Réservoirs cylindrique horizontal sous talus .....	32
IV.8.3 Réservoirs sphériques .....	33
IV.8.4 Sphère sous talus .....	34
IV.9 Le transport et les matériels de distribution de GPL .....	35
IV.9.1 Les matériels de distribution de GPL .....	35
IV.10 Capacités de stockage .....	35
IV.11 Les principaux risques liés au stockage de GPL .....	36
IV.11.1 Les différents types d'accidents .....	36
IV.11.2 Parmi les accidents majeurs marquants du secteur de GPL .....	37
IV.11.3 Conclusions et les séquences accidentelles génériques .....	38
IV.11.4 Prévention des fuites de GPL .....	40
IV.11.5 Prévention et protection vis-à-vis de l'incendie et réservoirs sous talus .....	41
IV.11.6 Fonction de sécurité .....	41
IV.11.7 En cas de fuite de GPL .....	41
IV.12 CONCLUSION .....	41

## Chapitre V : Etude mécanique de la sphère de stockage.

V.1 Introduction .....	42
V.2 La méthode des éléments finis .....	42
V.3 Les quatre modules des éléments finis .....	42
V.4 Le maillage .....	44
V.5 Les propriétés du matériau .....	44
V.6 Pour la pression 6 Bars .....	45
V.7 Pour la pression 7 Bars .....	47
V.8 Pour la pression 8 Bars .....	49
V.9 Pour la pression 9 Bars .....	51
V.10 Pour la pression 10 Bars .....	53
V.11 L'interprétation générale de déplacement .....	55
V.12 L'interprétation générale de cercle de Mohr .....	55

## Chapitre VI : Simulation numérique diphasique du GPL au niveau de la sphère

VI.1 Introduction .....	57
VI.2 La conception assistée par ordinateur .....	57
VI.3 Spaceclaim .....	57
VI.4 ANSYS fluent .....	57
VI.5 Partie simulation .....	58
VI.5.1 Propriétés du fluide .....	58
VI.5.2 Conditions extérieures .....	58
VI.5.3 Conditions aux limites.....	58
VI.6 Configuration de l'étude.....	58
VI.6.1 Configuration du maillage .....	58
VI.6.2 Configuration du solveur .....	59
VI.6.3 Configuration du modèle multiphasique .....	59
VI.6.4 Configuration de l'équation d'énergie.....	60
VI.6.5 Configuration des caractéristiques de l'écoulement.....	61
VI.6.6 Configuration des matériaux .....	62
VI.6.7 Configuration des deux phases.....	62
VI.6.8 Configuration de la méthode de solution .....	63
VI.6.9 Configuration des conditions initiales .....	63
VI.7 Les résultats de la simulation .....	64
VI.7.1 Pour une heure .....	64
VI.7.2 Pour trois heures.....	68
VI.7.3 Pour cinq heures.....	72
Conclusion générale.....	76
Bibliographie .....	78
Annexes .....	80

# Table des figures

I.1	Principe d'une raffinerie simple <sup>[2]</sup> .....	7
I.2	Schéma des procédés de raffinage <sup>[4]</sup> .....	8
II.1	Raffinerie d'Arzew .....	9
II.2	Organigramme de la raffinerie d'Arzew .....	10
II.3	Plant de la raffinerie RA1Z.....	11
II.4	Section de fractionnement principal Unité 11 <sup>[13]</sup> .....	13
II.5	Section PENEX (unité d'isomérisation) <sup>[13]</sup> .....	13
II.6	Section Platforming <sup>[13]</sup> .....	14
III.1	Schémas de principe de récupération et traitement des LPG <sup>[13]</sup> .....	21
III.2	Analyse des courbes <sup>[16]</sup> .....	24
IV.1	Les types du bac de stockage <sup>[27]</sup> .....	29
IV.2	cigare avec fonds torisphériques ou elliotiques .....	32
IV.3	cigare avec fonds hémisphériques <sup>[8]</sup> .....	32
IV.4	une coupe longitudinale d'un cigare sous talus <sup>[5]</sup> .....	32
IV.5	l'axe longitudinal d'un cigare a une légère pente dirigée vers le pot de purge <sup>[5]</sup> .	32
IV.6	réservoir sphérique (sphère) <sup>[5]</sup> .....	33
IV.7	schéma détaillé de la sphère sous talus <sup>[19]</sup> .....	34
IV.8	Codes de design des bacs en acier (welded steel) <sup>[5]</sup> .....	34
IV.9	Répartition des accidents selon leur lieu de survenance <sup>[18]</sup> .....	36
IV.10	Répartition par famille de causes-circonstances <sup>[18]</sup> .....	39
IV.11	Exemples de séquences accidentelles aboutissant à un BLEVE <sup>[18]</sup> .....	40
IV.12	Répartition des événements par phénomène observé.....	40
V.1	Le maillage.....	44
V.2	Les propriétés du matériau utilisé .....	44
V.3	Le Déplacement sur x.....	45
V.4	Le Déplacement sur Y .....	45
V.5	Contrainte équivalente de Von Mises.....	46
V.6	Les Cercles de mohr des contraintes .....	46
V.7	Le Déplacement sur x.....	47
V.8	Le Déplacement sur Y .....	47
V.9	Contrainte équivalente de Von Mises.....	48
V.10	Les Cercles de mohr des contraintes .....	48
V.11	Le Déplacement sur x.....	49
V.12	Le Déplacement sur Y .....	49
V.13	Contrainte équivalente de Von Mises.....	50
V.14	Les Cercles de mohr des contraintes .....	50
V.15	Le Déplacement sur x.....	51

V.16 Le Déplacement sur Y .....	51
V.17 Contrainte équivalente de Von Mises.....	52
V.18 Les Cercles de mohr des contraintes .....	52
V.19 Le Déplacement sur x .....	53
V.20 Le Déplacement sur Y.....	53
V.21 Contrainte équivalente de Von Mises.....	54
V.22 Les Cercles de mohr des contraintes .....	54
VI.1 Le maillage de la sphère.....	59
VI.2 Configuration du solveur.....	59
VI.3 Le modèle multiphasique .....	60
VI.4 Configuration de l'équation d'énergie .....	61
VI.5 modèle de viscosité .....	61
VI.6 Configuration des matériaux.....	62
VI.7 Configuration des deux phases .....	62
VI.8 La phase d'interaction .....	62
VI.9 la méthode de solution .....	63
VI.10 Les conditions initiales.....	63
VI.11 La pression statique .....	64
VI.12 La pression statique.....	64
VI.13 La Température statique.....	65
VI.14 La fonction de courant .....	65
VI.15 la température du mur par rapport la position .....	66
VI.16 Le vecteur vitesse.....	66
VI.17 La viscosité turbulente .....	67
VI.18 La fraction volumique.....	67
VI.20 La pression statique.....	68
VI.21 La Température statique.....	69
VI.22 La fonction de courant .....	69
VI.23 La température du mur par rapport la position.....	70
VI.24 Le vecteur vitesse.....	70
VI.25 La viscosité turbulente .....	71
VI.26 La fraction volumique.....	71
VI.28 La pression statique.....	72
VI.29 La Température statique.....	73
VI.30 La fonction de courant .....	73
VI.31 La température du mur par rapport la position.....	74
VI.32 Le vecteur vitesse.....	74
VI.33 La viscosité turbulente .....	75
VI.34 La fraction volumique.....	75
35 La géométrie de la sphère .....	
36 Les dimensions et les spécifications de la sphère .....	

# Liste des tableaux

I.1	Composition des pétroles bruts et ses dérivés par éléments <sup>[5]</sup> .....	2
I.2	Composition des pétroles bruts et ses dérivés par Familles <sup>[5]</sup> .....	3
I.3	Les caractéristiques générales des éléments <sup>[5]</sup> .....	4
II.1	Capacités annuelles de production de différentes unités. ....	9
III.1	C <sub>3</sub> et C <sub>4</sub> pour qu'ils soient conformes .....	20
III.2	caractéristiques de butane et de propane <sup>[20] [21]</sup> .....	22
IV.1	Modes de stockage et types des réservoirs en fonction du produit stocké <sup>[8]</sup> .....	29
IV.2	les constituants qui provoquent des problèmes <sup>[5]</sup> .....	31
IV.3	Capacités maximales déterminées à partir des règles du CODRES, avec une épaisseur de robe en acier de 45 mm <sup>[5] [8]</sup> .....	35

## Résumé

Le gaz de pétrole liquéfié ou « GPL » est un mélange de butane et de propane à des proportions normalisées. Le marché du GPL présente des opportunités certaines en Algérie, compte tenu de la disponibilité de la ressource et des avantages économiques et écologiques.

Le phénomène d'évaporation dans le stockage de GPL est un phénomène inévitable lié à l'augmentation de la température il faut toujours prendre ce phénomène en considération pour la conservation du produit et interdire les risques liés à ce phénomène.

A travers les données obtenues par notre stage dans la raffinerie d'Arzew R1AZ on a réalisé la simulation thermique, de l'écoulement et de changement de phase de butane dans une section 2D de la sphère, où on a traité la turbulence, les vitesses d'écoulement, la pression, la variation de la température et la viscosité avec le logiciel ANSYS fluent.

Ainsi la conception de la demi-sphère en 2D où on a utilisé la symétrie pour réaliser la simulation de son comportement mécanique et interpréter les différentes contraintes et déplacements obtenus, cette étude est faite par le logiciel RDM6 - éléments finis.

**Mot-clé:** Gaz, ANSYS, RDM6 , réservoir sphérique.

## Abstract

The liquefied petroleum gas or « LPG » is a mixture of butane and propane in standardized proportions. The LPG market presents certain opportunities in Algeria, taking into account the availability of the resource and the economic and ecological advantages.

The phenomenon of evaporation in the storage of LPG is an unavoidable phenomenon linked to the increase of the temperature, it is always necessary to take this phenomenon into consideration for the conservation of the product and to prohibit the risks linked to this phenomenon.

Through the data obtained by our training course in the refinery of Arzew R1AZ we realized the thermal simulation, the flow and the change of phase of butane in a 2D section of the sphere, where we treated the turbulence, the speeds of flow, the pressure, the variation of the temperature and the viscosity with the software ANSYS fluent.

Thus the design of the half sphere in 2D or we used the symmetry to realize the simulation of its mechanical behavior and to interpret the various constraints and displacements obtained, this study is made by the software RDM6 - finite elements.

**Keyword:** Gaz, ANSYS, RDM6, spherical tank.

# **Introduction**

## **générale**

## **Introduction générale**

La consommation mondiale du gaz et du pétrole n'a cessé d'augmenter pour satisfaire les besoins énergétiques nécessaires au développement d'un monde meilleur.

La demande croissante des pays producteurs d'énergie, de pétrole et de gaz sont amenés à augmenter leur productivité, et pour cela, les techniques et les technologies les plus modernes et les plus sophistiquées sont utilisées dans le but pour optimiser leurs productions et leurs stockages, et pour améliorer la qualité des produits pétroliers raffinés tout en minimisant les pertes.

Le réservoir de stockage ne sera jamais complètement plein. C'est essentiel de laisser de la place à la vapeur générée par le produit pendant le stockage. La valeur minimale de cet espace représente 10 % du volume total du réservoir de carburant. L'évaporation est très importante dans l'industrie du stockage de GPL hors de contrôle, peut causer des accidents graves. Le contrôle du phénomène d'évaporation du GPL dans le réservoir de stockage est étroitement lié à la compréhension de tous les échanges thermiques entre réservoirs et réservoirs adjacents.

Dans cette étude nous avons utilisé le simulateur ANSYS fluent pour le but de simuler numériquement la sphère de butane afin de déterminer la turbulence, les vitesses d'écoulement, la pression, la variation de la température et la viscosité.

### **Le présent travail s'articule sur les parties suivantes :**

Dans le premier chapitre, on expose des généralités sur le pétrole et ses dérivés ainsi que des définitions du raffinage, ses fractions et ses étapes.

Le deuxième chapitre, nous présentons l'organisation de l'entreprise Sonatrach, son historique, ses activités.

Le troisième chapitre, on définit le gaz de pétrole liquéfié (GPL) sa composition et ses propriétés chimiques et son importance dans notre vie quotidienne.

Le quatrième chapitre, nous présentons les différents types de réservoirs de stockage des produits GPL. Notre étude est basée sur le stockage aérien sous pression dans une sphère.

Par contre le cinquième et le sixième chapitre est réservé aux étapes d'utilisation des logiciels utilisés RDM6- éléments finis et de logiciel ANSYS fluent pour la simulation mécanique et thermique de la sphère GPL.

À l'usage de ce travail nous avons pu avoir des résultats intéressants pour la résistance mécanique de la coque et des résultats dynamiques et thermiques à l'intérieur du fluide simulé par un modèle turbulent diphasique.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralité**

## I.1 Introduction

Le pétrole brut est un fluide constitué principalement d'hydrocarbures ; il contient également des composés organiques soufrés, oxygénés et azotés. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs. Les gisements de pétrole correspondent à une accumulation dans une zone où le réservoir présente des caractéristiques favorables et constitue un piège : la fuite du pétrole – moins dense que l'eau – est rendue impossible vers le haut par la présence d'une couverture imperméable (argiles, sel) et latéralement par une géométrie favorable (dôme anticlinal, biseau de sables dans des argiles).

Le pétrole a pour origine la substance des êtres, animaux ou végétaux, vivant à la surface du globe et particulièrement en milieu aquatique. La matière organique ainsi produite se dépose au fond des mers et des lacs et est incorporée aux sédiments. À mesure que ceux-ci sont enfouis, les constituants organiques se transforment, principalement sous l'action de la température, en hydrocarbures dont une partie vient progressivement se concentrer dans les pièges des réservoirs poreux.

Si la composition élémentaire globale des pétroles est relativement fixe, la structure chimique de leurs constituants varie plus largement, ce qui entraîne une grande diversité des propriétés physiques (densité, viscosité) ainsi que des teneurs très variables dans les différents types de produits obtenus par raffinage. En particulier, la présence de soufre dans certains pétroles pose des problèmes de corrosion et de pollution atmosphérique, tant au stade du raffinage qu'à celui de l'utilisation industrielle ou domestique de leurs dérivés.

Le pétrole est un mélange complexe d'hydrocarbures de différentes familles (paraffiniques, naphthéniques, aromatiques) associés à des composés oxygénés, azotés et sulfurés ainsi qu'à des traces de métaux particuliers (vanadium, molybdène, nickel . . . etc.), Selon la température et la pression, certains de ses composants peuvent être gazeux, liquides et parfois solides. Ceci explique la consistance variable de l'huile, plus ou moins visqueuse ou liquide. <sup>[1][10]</sup>

## I.2 Composition des pétroles bruts et ses dérivés

Éléments principaux	Carbone
	Hydrogène
Impuretés	Soufre
	Oxygène
	Azote
	Métaux
Éléments non organiques	Eaux
	Sels

TABLE I.1 – Composition des pétroles bruts et ses dérivés par éléments <sup>[5]</sup>

Hydrocarbures purs	Paraffines
	Naphtènes
	Aromatiques
Composés d'hydrocarbures	Composés sulfurés
	Composés organiques
	Composés organométalliques
Impuretés	Eaux, sels et sédiments
	Gaz acides et inertes

TABLE I.2 – Composition des pétroles bruts et ses dérivés par Familles <sup>[5]</sup>

### I.3 Généralités sur le raffinage

Le raffinage du pétrole débute par la distillation, ou fractionnement, du pétrole brut en vue de le séparer en différents groupes d'hydrocarbures. Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité. On transforme ensuite la plupart de ces produits de distillation en produits plus facilement utilisables, en modifiant leurs structures physique et moléculaire par craquage, reformage et par d'autres procédés de conversion, puis on soumet les produits obtenus à divers procédés de traitement et de séparation tels que l'extraction, l'hydrocraquage et l'adoucisement pour aboutir aux produits finis. Dans les raffineries les plus simples, on s'en tient habituellement à la distillation atmosphérique et à la distillation sousvide, alors que, dans les raffineries intégrées, on procède au fractionnement, à la conversion, au traitement et au mélange, ainsi qu'à la production de lubrifiants, de fiouls lourds et de bitumes ; ces raffineries peuvent aussi comporter des installations de traitement pétrochimique. <sup>[11]</sup>

Le pétrole brut est composé de cinq fractions séparables. La séparation débute en portant le brut dans un four à environ 400°, après quoi le mélange est fractionné dans une colonne. Les molécules légères et celles présentant les plus faibles capacités d'interactions (vander Waals, Coulomb) arrivent le plus haut dans la colonne. Dans cette distillation fractionnée, on utilise des plateaux perforés au travers desquels les vapeurs montantes barbotent constamment à travers le liquide descendant.

Ce processus de barbotage garantit une très bonne séparation. Les différentes fractions peuvent alors être soutirées à différentes hauteurs. Après le raffinage, toutes les fractions sont désulfurées et éventuellement traitées dans des installations de raffinage supplémentaires, de craquage et de reformage. <sup>[6]</sup>

#### I.3.1 Les fractions de pétrole brut

##### La fraction 1 :

Un domaine d'ébullition inférieur à 150°. Cette fraction n'est certainement pas pure ; elle est encore constituée d'un mélange de composés différents qu'on peut répartir en deux sous-fractions : une partie formée de dérivés contenant de 1 à 4 atomes de carbone (utilisée pour le LPG) (LPG : Liquefied Petroleum Gaz = gaz de pétrole liquéfié, qui est un mélange de butane et de propane) et une seconde qui comporte de 4 à 12 atomes de carbone. Ce dernier mélange est la base de l'essence et constitue aussi la fraction naphte. Ce naphte sera à son tour utilisé comme matière première pour le craquage et le reformage.

**La fraction 2 :**

Qui bout entre 150° et 240°. Elle est constituée de molécules de 9 à 16 atomes de carbone et est utilisée, après raffinage, pour des solvants et comme carburant pour avions à réaction.

**La fraction 3 :**

Qui bout entre 240° et 315°, contient des molécules les en C<sub>15</sub> à C<sub>25</sub>. Elle sert à préparer l'huile diesel (gazole), le mazout (combustible domestique) et des huiles de lubrification.

**La fraction 4 :**

Un domaine d'ébullition compris entre 315° et 375°. Les molécules sont déjà assez grandes (20 à plus de 30 atomes de carbone). Cette fraction est utilisée comme huile lourde (combustible pour des usines ou pour de grands bateaux).

**La fraction 5 :**

Un domaine d'ébullition supérieur à 375°. Ses molécules sont également grandes (jusqu'à plus de 30 atomes C). Cette fraction, qui représente environ la moitié de pétrole, est valorisée le mieux possible. [4][6]

Eléments	Nbr de carbones	Température d'ébullition $T_{eb}$	Densité $d^{15}$	Etat
Méthane	$C_1 (CH_4)$	$T_{eb} = -161.5^\circ$	/	GAZ
Ethane	$C_2 (C_2H_6)$	$T_{eb} = -89^\circ$	/	
Propane	$C_3 (C_3H_8)$	$T_{eb} = -0.5^\circ$	$d^{15} = 0.505$	
Butane	$C_4 (C_4H_{10})$	$T_{eb} = +36^\circ$	$d^{15} = 0.585$	
Pentane	$C_5 (C_5H_{12})$	$T_{eb} = +69^\circ$	$d^{15} = 0.631$	LIQUIDE
Hexane	$C_6 (C_6H_{14})$	$T_{eb} = +98^\circ$	$d^{15} = 0.664$	
Heptane	$C_7 (C_7H_{16})$	$T_{eb} = +126^\circ$	$d^{15} = 0.664$	
Hexadécane	$C_{16} (C_{16}H_{34})$	$T_{eb} = 287^\circ$ $T_{fusion} = +18^\circ$	/	SOLIDE
Icosane	$C_{20} (C_{20}H_{42})$	$T_{eb} = 344^\circ$ $T_{fusion} = +36^\circ$	/	
Triacotane	$C_{30} (C_{30}H_{62})$	$T_{eb} = 450^\circ$ $T_{fusion} = +66^\circ$	/	

TABLE I.3 – Les caractéristiques générales des éléments [5]

**I.4 Les trois étapes du raffinage**

La complexité d'une raffinerie se traduit par le nombre d'unités de fabrication. Ces unités utilisent des procédés physiques ou chimiques que l'on peut classer en trois catégories :

- ✓ Les procédés de séparation
- ✓ Les procédés de conversion
- ✓ Les procédés d'épuration.

**I.4.1 Les procédés de séparation**

**Distillation atmosphérique :**

La distillation atmosphérique du pétrole brut s'effectue par le procédé de séparation le plus classique. On crée par vaporisation partielle du pétrole brut liquide une phase vapeur et une phase liquide. La phase vapeur, plus légère, est ensuite recueillie par condensation.

Les constituants sont séparés en fonction de la différence de leurs températures d'ébullition.

### **Distillation sous vide :**

La distillation sous vide du résidu atmosphérique s'effectue après la distillation sous vide, c'est aussi par une séparation liquide-vapeur en fonction de la température d'ébullition, mais pour provoquer la vaporisation partielle sans décomposer le produit par la chaleur, il est nécessaire d'opérer sous vide et d'injecter de la vapeur surchauffée. [2]

### **Le désalphaltage :**

Le désasphaltage du résidu sous vide est une étape ultime de séparation qui permet d'obtenir l'huile désasphaltée, produit jaune-orangé, et un asphalte utilisable comme combustible malgré sa concentration en composés soufrés et métalliques.

### **L'extraction :**

L'extraction des aromatiques est un procédé qui, par l'action d'un solvant sélectif, provoque la création de deux phases liquides grâce à la miscibilité partielle dans ce solvant de certains constituants du produit à raffiner. Les deux phases sont aussitôt séparées par décantation et le solvant recyclé après récupération par distillation. Des deux produits obtenus, l'un, riche en aromatiques, s'appelle l'extrait, l'autre le raffinat.

### **La cristallisation :**

Un autre procédé de séparation pour la fabrication des lubrifiants consiste à provoquer, par refroidissement, la cristallisation spontanée des paraffines ou cires et à créer ainsi une phase solide et une phase liquide. La séparation de ces deux phases s'effectue en continu, avec l'aide d'un solvant sélectif, par filtration sous vide. [2]

## **I.4.2 Les procédés de conversion**

Les proportions des produits obtenus par séparation à partir des pétroles bruts ne coïncident avec le profil des besoins du marché ni en quantité ni en qualité. Les procédés de conversion effectuent des transformations moléculaires qui accomplissent cette adéquation. Ils utilisent essentiellement des réactions chimiques que l'on peut classer en trois catégories suivant que les liaisons carbone-carbone des molécules sont :

- regroupées (synthèse)
- conservées (réarrangement)

D'une façon générale, ces transformations sont soit purement thermiques, soit aidées par un catalyseur, soit réalisées en présence d'hydrogène.

### **I.4.2.1 Reformage et Isomérisation**

#### **Reformage :**

Le reformage des distillats légers dont le point d'ébullition est supérieur à 80° est le procédé le plus classique pour fabriquer des fractions d'essences riches en hydrocarbures aromatiques qui ont un très haut indice d'octane. Il s'effectue vers 530 °C, donc à plus haute température que le craquage. D'abord exclusivement thermique jusque vers 1939, le reformage a ensuite utilisé comme catalyseur de l'oxyde de molybdène, puis, vers 1948, du platine, d'où le nom de platforming donné à ce type de procédé.

On obtient de 75 à 80 p. 100 d'essence reformée à haut indice d'octane, des gaz liquéfiés et environ 1 p. 100 en poids d'hydrogène, considéré aujourd'hui comme un précieux réactif pour l'épuration des produits par désulfuration.

L'opération de reformage catalytique est conduite sous une pression de 20 à 40 atmosphères en présence d'hydrogène fabriqué par la réaction, ce qui évite la formation de coke. Il s'en dépose néanmoins un peu sur le catalyseur qui doit être régénéré par combustion tous les six à neuf mois.

Plusieurs unités utilisent maintenant un catalyseur bimétallique et une technologie permettant sa régénération continue.<sup>[2]</sup>

### **Isomérisation :**

Les distillats légers dont le point d'ébullition est inférieur à 80° ne sont pas transformables par le reformage catalytique car leurs molécules contiennent moins de six atomes de carbone, seuil des hydrocarbures aromatiques. S'il s'avère nécessaire d'améliorer leur indice d'octane, on fait appel au procédé d'isomérisation qui transforme les hydrocarbures paraffiniques à chaîne droite en hydrocarbures paraffiniques ramifiés dont l'indice d'octane est meilleur.

L'opération s'effectue avec des produits sous forme liquide ou gazeuse, entre 20 et 70 atmosphères, à une température de 120 à 200°, en présence d'hydrogène pour éviter les réactions parasites de craquage, et avec comme catalyseur un métal noble activé par de l'acide chlorhydrique.<sup>[2][3]</sup>

### **I.4.3 Les procédés d'épuration**

Les procédés d'épuration ont pour but de débarrasser les produits traités, ainsi que les effluents liquides et gazeux, des composés indésirables qui y sont contenus en faibles proportions. Ces procédés séparent ou transforment les composés qui pourraient s'avérer nocifs pour les opérations de raffinage, pour les utilisateurs des produits fabriqués ou pour l'environnement.

#### **Le dessalage :**

Le dessalage du pétrole brut avant sa distillation évite des dépôts de sels dans les tubes des fours et des corrosions acides en tête des colonnes de fractionnement.

Même s'il a été préalablement dessalé sur le champ de production, le pétrole brut a recueilli au cours de son transport des chlorures de sodium, de magnésium et de calcium – d'une dizaine de grammes à plusieurs kilogrammes par tonne, suivant son origine – qu'on dissout en y injectant de 7 à 8 p. 100 d'eau douce et en formant une émulsion chaude.

Cette émulsion s'écoule dans un récipient cylindrique horizontal où elle est soumise à l'action d'un champ électrostatique de 20 000 à 35 000 volts, qui favorise l'agglomération des gouttes d'eau chargées de sels et leur séparation par décantation.<sup>[2][3]</sup>

**La désulfuration :**

La désulfuration est un traitement très répandu qui utilise les procédés les plus variés.

Les gaz incondensables ou liquéfiés sont épurés de leur hydrogène sulfuré par les éthanols amines ou propylamines qui le dissolvent à froid, le rejettent à chaud et sont recyclés un grand nombre de fois. Les gaz liquéfiés sont ensuite séchés par passage sur les tamis moléculaires. Les distillats légers sont, le plus souvent, totalement désulfurés avant même d’être séparés, par une hydrogénation à 350° sous 30 atmosphères en présence d’un alliage de cobalt et de molybdène.

Les carburéacteurs et les gazoles sont hydrogénés séparément à 400° et sous une pression de 30 à 70 atmosphères. Les huiles déparaffinées et les paraffines brutes, qui autrefois étaient épurées à l’acide sulfurique et à la terre décolorante, sont maintenant hydrogénées en présence de catalyseur pour éliminer les composés sulfurés, oxygénés et azotés et améliorer ainsi leur couleur et leur stabilité.

Comme les composés sulfurés auxquels s’attaquent tous ces traitements d’hydrogénation sont en faibles proportions, l’hydrogène requis n’a besoin d’être ni très abondant ni très pur, si bien que le gaz hydrogéné produit en excédent par le reformage catalytique convient tout à fait. [2][3]

**Remarque**

Le kérosène, les gaz butane et propane sont, eux, lavés à la soude. Ce traitement, appelé adoucissement, débarrasse ces produits des **mercaptans** (thiols) qu’ils contiennent.

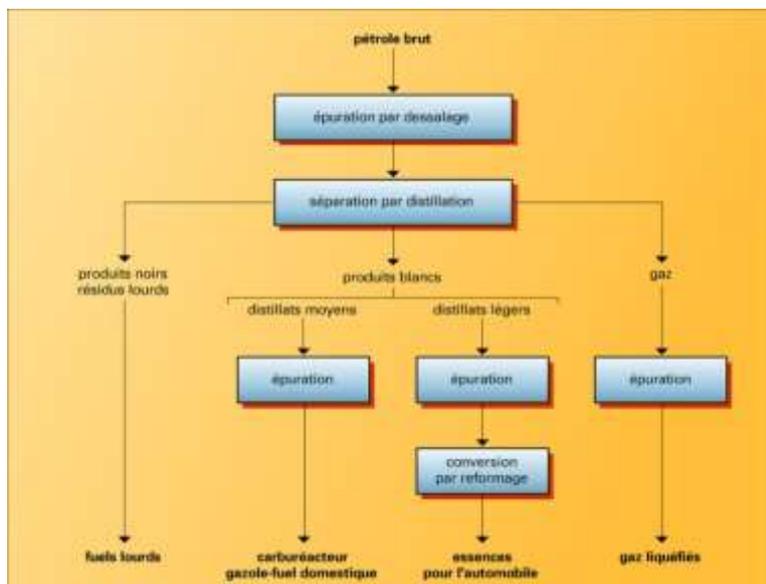


FIGURE I.1 – Principe d’une raffinerie simple [2]

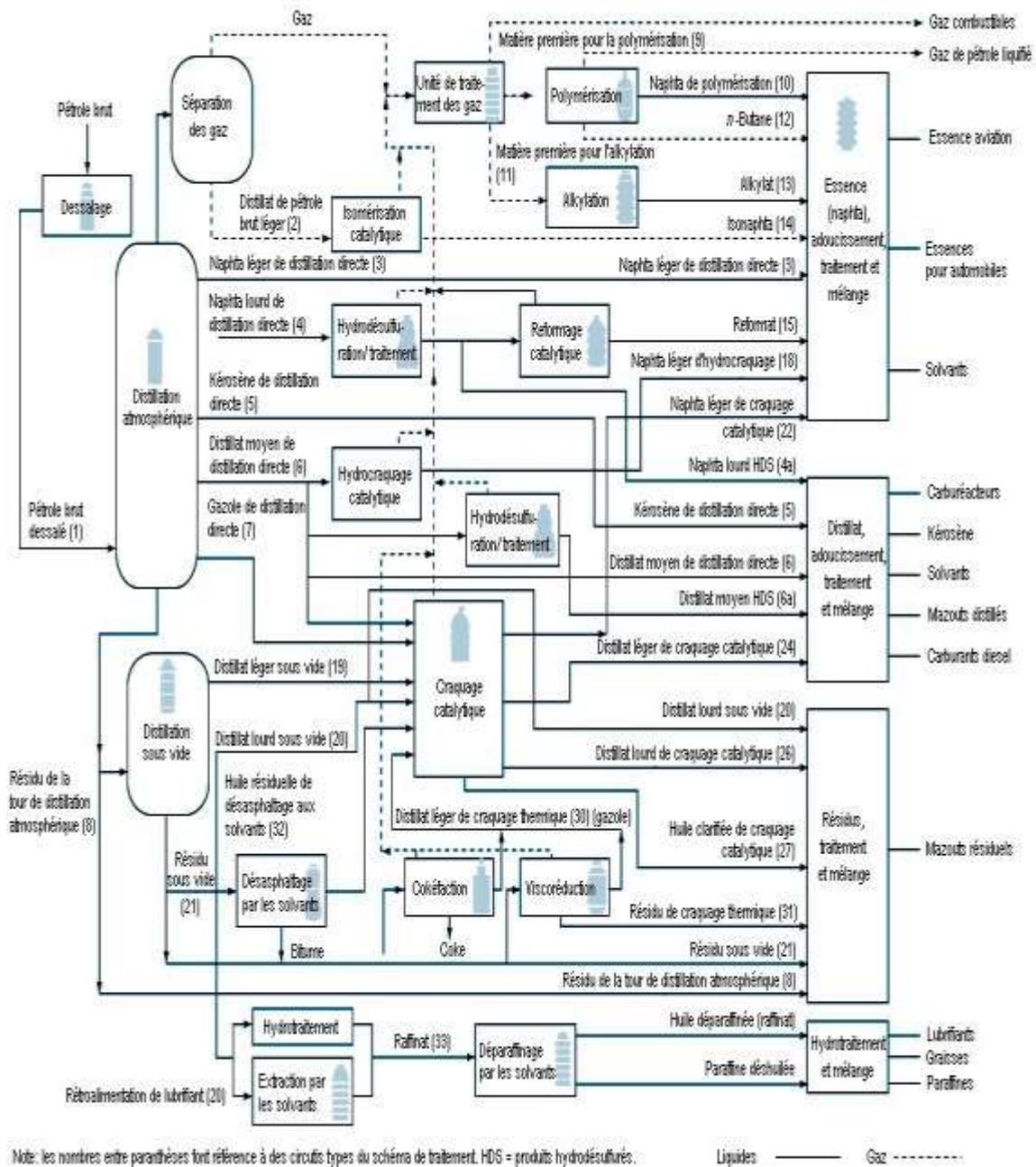


FIGURE I.2 – Schéma des procédés de raffinage [4]

# **Chapitre II**

## **La raffinerie d'Arzew**

## II.1 Historique de la raffinerie

La raffinerie d'Arzew (Naftec RA1Z) occupe une superficie de 180 hectares de la zone industrielle sur le plateau d'El Mouhgoun à est d'Oran et à environ 5 km de la mer méditerranée.

La construction de la raffinerie a été réalisée par la société japonaise « JAPAN GAZOLINE COMPANY (JGC) » en collaboration avec l'entreprise Sonatrach, a démarré en 1972, suivie par une extension majeure au début des années 80.



FIGURE II.1 – Raffinerie d'Arzew

La capacité de traitement est de 3,75 millions de tonnes par an pour le pétrole de Hassi Messaoud arrivant par pipeline et de 279 000 tonnes par an pour le brut réduit importé (BRI) destiné à produire des bitumes. Il est conçu pour répondre aux exigences suivantes :

- Répondre à la consommation croissante de carburant sur le marché national.
- Fabrication de produits stratégiques tels que les lubrifiants et l'asphalte.
- Exportation de produits excédentaires (naphta, kérosène, fioul).

Les capacités annuelles de production de différentes unités sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Nature du produit	Quantité	Unité
Propane	30 000 T	Zone 4/Unité13
Butane	92 000 T	Zone 4/Unité13
Kérosène	400 000 T	Zone 4/Unité11
Gas-oil	530 000 T	Zone 4/Unité11
Fuel	590 000 T	Diverses unités
Essence Normale	390 000 T	Zone28
Essence Super	103 000 T	Zone28
Huiles de base	170 000 T	Zone 7/ Zone5
Huiles finies	150 000 T	Zone6 et Unité 3000
Graisses	1950 T	Zone6 et Unité 3000
Bitumes	140 000 T	Zone 10

TABLE II.1 – Capacités annuelles de production de différentes unités.

La raffinerie d'Arzew est organisée tel qu'il est présenté dans le schéma suivant :

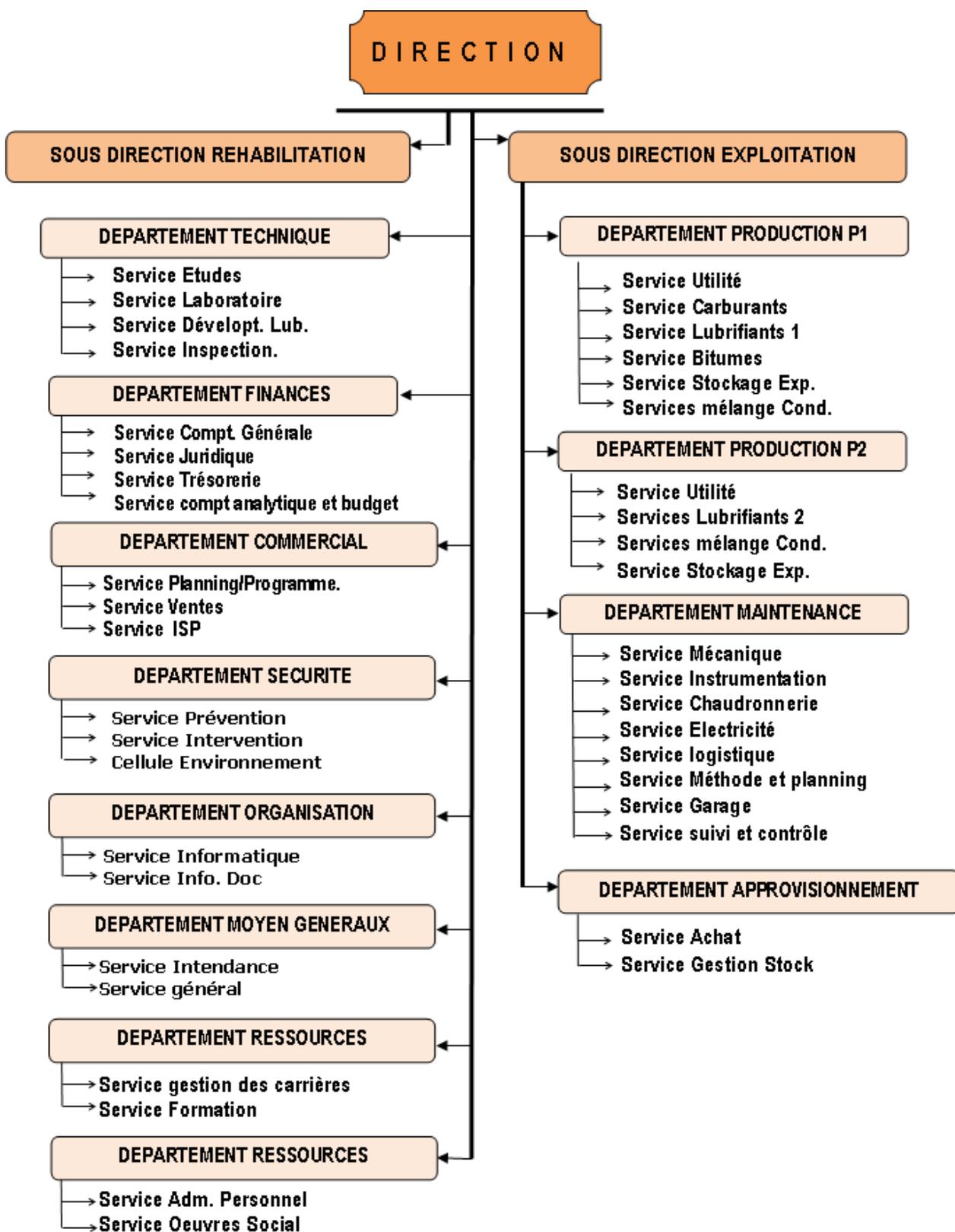


FIGURE II.2 – Organigramme de la raffinerie d'Arzew



- **Unité 33** : Distributions d'eau de refroidissement, utilisée pour les opérations de refroidissement des produits.
- **Unité 34** : Production d'électricité qui sert à alimenter les unités de traitement.
- **Unité 35** : Gaz de combustion au niveau des chaudières et des fours.
- **Unité 36** : Productions d'air service et d'air instrument.
- **Unité 67** : Réseaux d'incendie. <sup>[12][14]</sup>

## II.2.2 Département de production P3

Une nouvelle réorganisation des départements de production a ajouté un troisième département qui comprend les zones suivantes :

### II.2.2.1 Zone 06 (Production des huiles finies)

Elle est conçue pour le mélange et le conditionnement des huiles finies à partir des huiles de base fabriquées dans cette 1ère chaîne de production. Les mélanges des huiles de base sont réalisés avec des additifs pour améliorer les caractéristiques. Le lubrifiant est conditionné dans des fûts de 200 litres. La gamme des lubrifiants se compose de : huile pour moteur, huile industrielle, huile de graissage. Huile hydraulique, huile de coupe, graisses industrielles. Elle comprend les unités suivantes :

### II.2.2.2 Zone 04 (Les carburants)

C'est la zone de fractionnement du pétrole brut en différentes coupes (GPL, LSRN NAPHTA, LGO, HGO) ; Donc c'est l'unité principale du complexe. Qui traite le pétrole brut algérien. Elle comprend 5 unités :

- **Unité 11** : c'est l'unité de distillation atmosphérique (Topping). Elle a comme rôle la séparation par distillation atmosphérique des différents composants contenus dans le pétrole selon leurs densités, du plus léger au plus lourd. Il s'agit :
  1. Du gaz de pétrole liquéfié (LPG)
  2. Du naphta léger LSRN
  3. Du naphta lourd HSRN
  4. Du kérosène
  5. Du gasoil léger et lourd
  6. Le résidu atmosphérique (BRA).
- **Unité 12** (Reforming catalytique) : elle traite le naphta lourd (HSRN) provenant de la distillation atmosphérique dans le but de produire une base d'essence à indice d'octane élevé (reformat).
- **Unité 13** (traitement du gaz) : elle traite le gaz obtenue de l'unité 11, 12 et 17 en le séparant en produits purs, tel que le propane et le butane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>).
- **Unité 17** (l'isomérisation) : elle traite le naphta léger (LSRN) provenant de la distillation atmosphérique, afin d'améliorer leur l'indice d'octane.
- **Unité 18** (l'unité du système de l'huile chaude) : le rôle de cette unité est de fournir la chaleur (par l'utilisation d'un fluide caloporteur) pour les unités 11 et 17. <sup>[12][13]</sup>

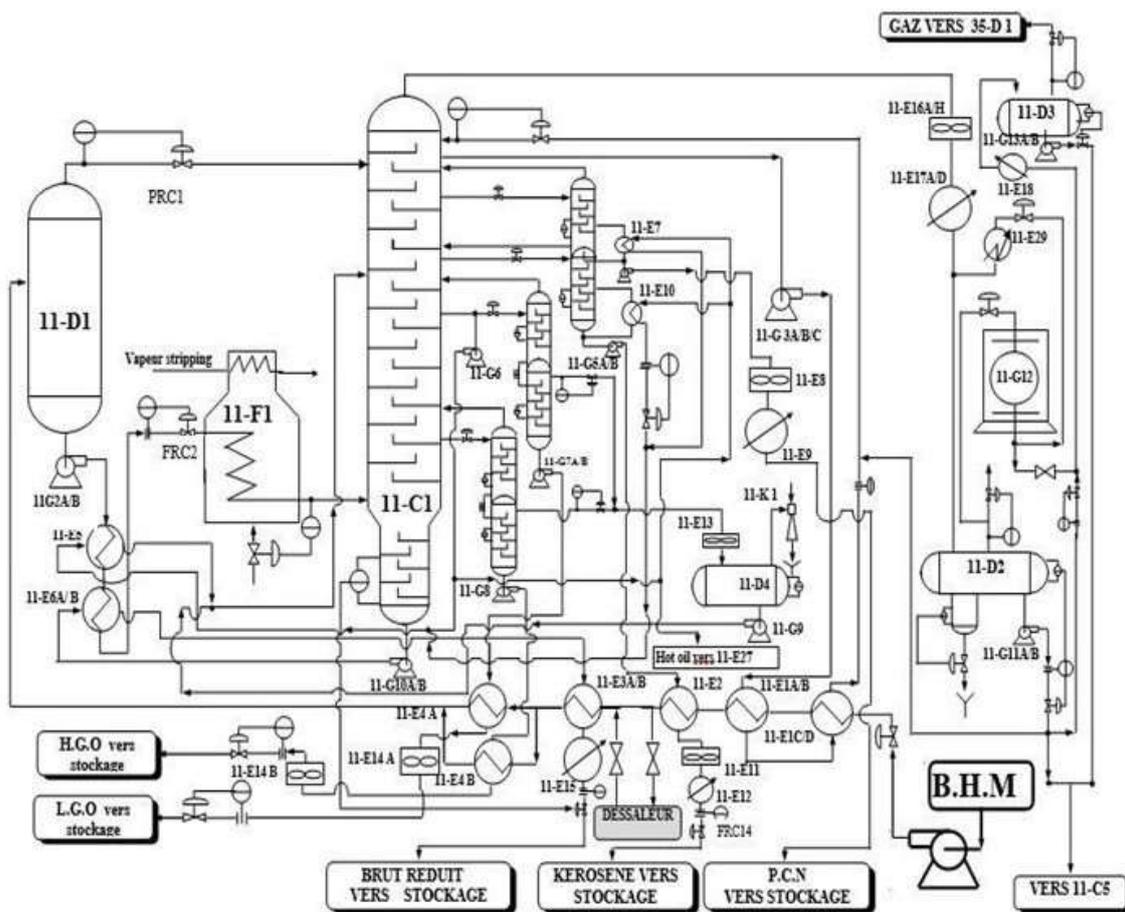


FIGURE II.4 – Section de fractionnement principal Unité 11 [13]

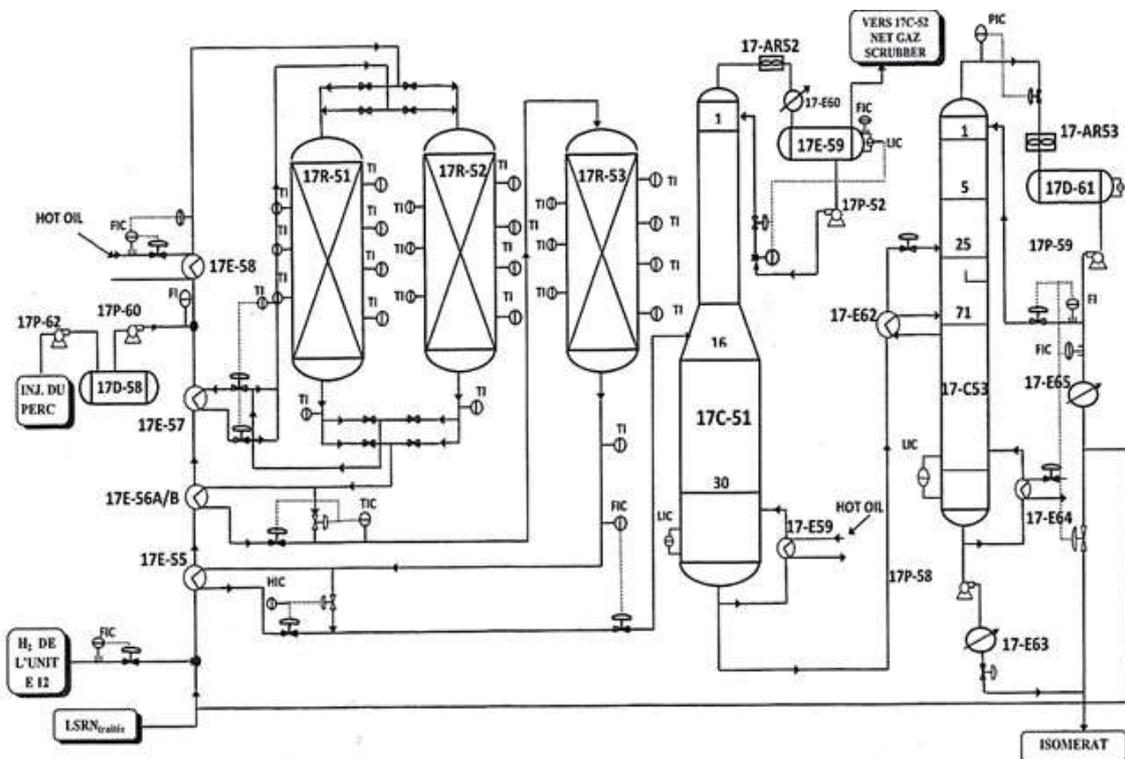


FIGURE II.5 – Section PENEX (unité d'isomérisation) [13]

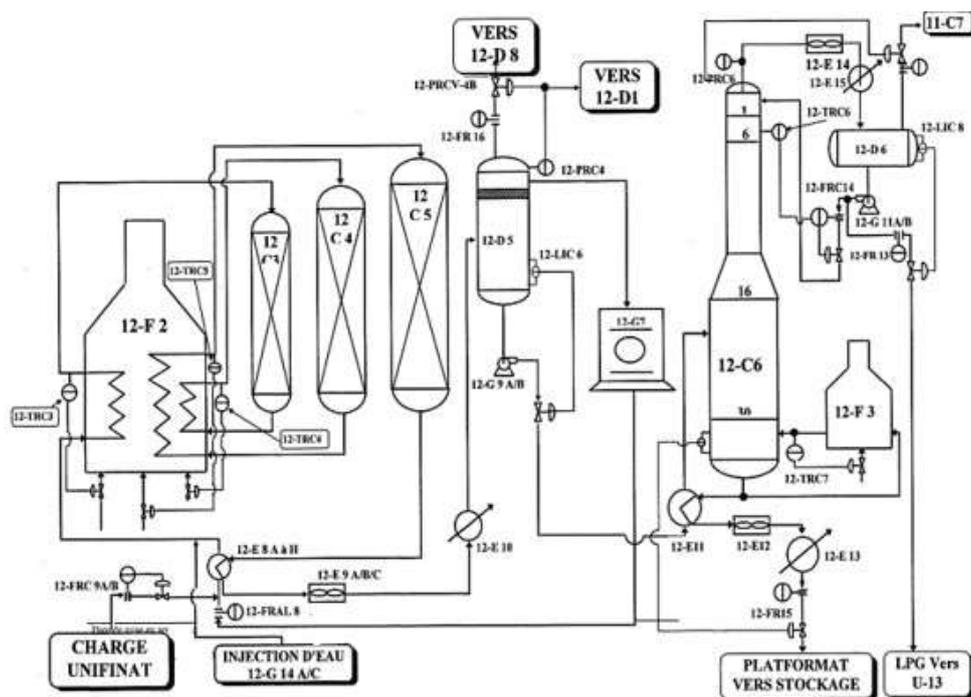


FIGURE II.6 – Section Platforming [13]

### II.2.2.3 Zone 07 (Les lubrifiants 1)

Cette zone a pour but la fabrication des huiles de base à partir de brut réduit atmosphérique (BRA) venant du topping (unité 11), sa capacité de production est de 50 000 T/an. Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 20** : stockage des huiles semi fini.
- **Unité 21** : unité de distillation sous vide.
- **Unité 22** : unité de désasphaltage au propane.
- **Unité 23** : unité de l'extraction au furfurool.
- **Unité 24** : unité de déparaffinage des huiles au MEC/toluène.
- **Unité 25** : unité de l'Hydrofinishing.

### II.2.2.4 Zone 10 (production de bitumes)

Cette zone concerne la production des bitumes routiers et oxydé, elle comprend 2 unités :

1. **Unité 14** : c'est l'unité de Flash sous vide. Elle traite un mélange de Brut réduit importé (BRI) l'asphalte qui est récupéré de l'unité 22. Ce mélange est fractionné sous vide en gasoils et en produit visqueux obtenu en fond de colonne, lequel est traité dans la section soufflage à l'air pur pour obtenir des bitumes routiers.
2. **Unité 15** : c'est l'unité de Semi Blowing (soufflage). Dans cette unité on procède à l'oxydation de la charge (Bitume routier + Gasoil) afin d'obtenir du bitume oxydé, conditionné dans des sacs de 25 Kg.

### II.2.2.5 Les Zones de stockage

- **Zone 08 et 09** : stockage du résidu atmosphérique dans 2 bacs.
- **Zone 11, 12 et 13** : stockage du brut de Hassi-Messaoud ; 3 bacs de 60 000T et 2 bacs de 50000 T.
- **Zone 31** : Contient une torche P1.

### II.2.3 Département de production P2

La réalisation de ce département fut suite aux demandes importantes en lubrifiants, elle comprend trois principales zones :

#### II.2.3.1 Zone 05 (Les huiles de base)

Elle a les mêmes tâches que la zone 7. En plus de ça il y a une unité 150 de l'huile caloporteur.

#### II.2.3.2 Zone 19 (Les utilités)

Elle assure le bon fonctionnement de la chaîne de production des huiles de base ; elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 1100** : production de vapeur.
- **Unité 1200** : production de l'énergie électrique.
- **Unité 1300** : tour de refroidissement des eaux.
- **Unité 1400** : gaz de combustion.
- **Unité 1500** : production d'air comprimé (air instrument et air de service).
- **Unité 1600** : traitement et production d'eau distillé et déminé.
- **Unité 1700** : réseau de torche P2.
- **Unité 1800** : traitement des effluents.
- **Unité 2800** : production de gaz inerte.<sup>[12]</sup>

### II.2.4 Département de production P3

Une nouvelle réorganisation des départements de production a ajouté un troisième département qui comprend les zones suivantes :

#### II.2.4.1 Zone 06 (Production des huiles finies)

Elle est conçue pour le mélange et le conditionnement des huiles finies à partir des huiles de base fabriquées dans cette 1ère chaîne de production. Les mélanges des huiles de base sont réalisés avec des additifs pour améliorer les caractéristiques. Le lubrifiant est conditionné dans des fûts de 200 litres. La gamme des lubrifiants se compose de : huile pour moteur, huile industrielle, huile de graissage. Huile hydraulique, huile de coupe, graisses industrielles. Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 3000** (Production des huiles finies et des graisses) : Elle est destinée à fabriquer des huiles finies à partir des huiles de base fabriquées dans les unités 100 à 500 et des additifs importés. Les grades d'huiles fabriquées sont :
  - Huiles pour moteurs (Essence, Diesel, Huiles pour transmission).
  - Huiles industrielles [hydraulique (TISKA), turbines (TORBA), engrenage (FODDA), compresseur (TORADA), et huiles divers].
- **Unité 3900** (Production des huiles finies) : Elle est réalisée en 1997, elle assure les mêmetaches de l'unité U3000 <sup>[12]</sup>

## **II.2.5 Département de production P4**

### **II.2.5.1 Zone 28 (stockage et expédition)**

C'est une zone de stockage des matières premières, des mélanges, des expéditions et des produits semi-finis et finis, ainsi que le pétrole brut.

### **II.2.5.2 Zone 30 (chargements de produits finis)**

Cette zone est spécialisée dans le chargement des carburants (essences, gaz oil ...) dans les camions et wagon des trains.

### **II.2.5.3 Zone 27 (Station de traitement des effluents)**

Le rôle de cette zone est récupérer les eaux usées et les traiter. Elle est composée de deux bassins de séparation et de décantation physique (API et PPI). <sup>[12]</sup>

## **II.2.6 Laboratoire de contrôle**

Durant toutes les étapes de raffinage au niveau des différentes unités, les produits semi-finis et finis sont soumis selon un programme bien défini à un contrôle de qualité rigoureux au niveau du laboratoire. Avant tout transfert ou expédition de produit fini, un certificat de qualité attestant la conformité de ce produit aux spécifications arrêtées est établi. Le laboratoire contrôle aussi la qualité des eaux, les rejets et procède aux analyses des différents échantillons spéciaux. <sup>[12]</sup>

## **II.2.7 Département de sécurité industrielle**

Etant donné les dangers, et les risques continuels qui peuvent se présenter dans une raffinerie de pétrole tel qu'explosions, incendies, intoxications, et électrocution. Le rôle du département de sécurité dans ce contexte est primordial pour la préservation du patrimoine humain et matériel. Il comporte 3 services :

### **II.2.7.1 Service surveillance**

Il est chargé d'assurer une bonne surveillance au sein de la raffinerie en effectue une vérification du matériel entrant et sortant de l'entreprise ainsi que le mouvement de l'ensemble du personnel.

### **II.2.7.2 Service prévention**

Assure les travaux de maintenance, les animations (photos et conseils sensibilisant sur les lieux de travail), l'hygiène de l'unité, et les statistiques des accidents de travail (en utilisant l'arbre des causes).

### **II.2.7.3 Service intervention**

Assure l'entretien des équipements de lutte contre l'incendie (fixe et mobile), la formation du groupe d'intervention de réserve (GIR), la gestion des produits extincteurs, les travaux de maintenance (ne jours de repos et fériés, quand l'inspecteur n'est pas présent), l'exécution du planning de sauvetage journalier et du programme d'exercices des plans d'attaques contre les incendies.<sup>[12]</sup>

### **II.2.7.4 Conclusion**

Le site d'implantation du complexe regroupe les anciennes installations occupant la partie nord/ouest et les nouvelles installations occupant la partie sud/ouest. Nord/Est et Sud/Est sont presque exclusivement utilisés pour stocker différents produits, mélanges et expéditions.

La raffinerie d'Arzew est l'une des unités la plus productive participant au développement du pays, étant donné que le traitement et la transformation locale des richesses de notre sous-sol apparaissent plus rentables que leur exploitation à l'état brut. <sup>[12][13][14]</sup>

# **Chapitre III**

## **Généralités sur le GPL**

### III.1 Définition du « Gaz Pétrole Liquéfié »

Le terme « gaz de pétrole liquéfié » ou « GPL » peut définir un mélange dans des proportions variables de Propane ( $C_3H_8$ ) et Butane ( $C_4H_{10}$ ), le propane étant généralement l'élément prépondérant. Ce sont tous des hydrocarbures "saturés" composés de liaisons simples entre les atomes de carbone et d'hydrogène. Leur avantage est qu'ils se liquéfient à une pression plus faible que les autres gaz (notamment le méthane) : entre 1,5 et 7 bars, ce qui équivaut à la pression de l'eau du robinet ou de l'air dans le pneu.

Le propane et le butane sont gazeux dans les conditions normales de température ambiante ( $15^\circ$ ) et à pression atmosphérique (1 bar), liquéfiés et maintenus à l'état liquide en élevant la pression ou en abaissant la température.

Cet état liquide leur permet d'être manipulés, transportés et stockés dans un petit volume. En effet, 1 litre de butane liquide dégagera 239 litres de gaz (à  $15^\circ$  et 1 bar de pression), et 1 litre de propane liquide libère 311 litres de gaz (à  $15^\circ$  et 1 bar de pression).

La composition chimique de GPL est variable selon les normes et les utilisations dans différents pays. Il peut contenir le propylène, butène, une faible quantité de méthane, l'éthylène, pentane et exceptionnellement des hydrocarbures tels que le butadiène, l'acétylène et le méthyl-acétylène.

Les particularités physico-chimiques du GPL (courbe de distillation, tension de vapeur, poids spécifique, pouvoir calorifique, rendement dans le moteur, etc...) dépendent de leurs teneurs en divers hydrocarbures.

Le gaz liquéfié provient de certains gaz naturels ou est issu du raffinage du pétrole. 60% de la production mondiale provient du gaz naturel, 40% du raffinage du pétrole brut (1 t de pétrole donne de 20 à 30 kg de GPL lors du raffinage). <sup>[25][26]</sup>

### III.2 Sources de GPL

Le gaz du pétrole liquéfié (GPL) est produit principalement :

1. Dans les unités de traitement et de séparation du gaz naturel (GN) parce que le GPL ne peut être obtenu directement à partir du gaz naturel (qui comporte d'autres hydrocarbures :  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  par exemple). Pour obtenir du GPL, on doit passer par une étape intermédiaire, la fabrication de GNL (NGL en anglais) qui est un mélange d'hydrocarbures gazeux liquéfié par refroidissement. C'est en fractionnant le GNL, qu'on isole le mélange  $C_3$  et  $C_4$  pour obtenir le GPL. Les champs de gaz naturel sont composés à 90 % de méthane. Les 10 % restants se répartissent entre 5 % de Propane et 5 % d'autres gaz dont le butane.
2. Dans les raffineries du pétrole brut, soit au cours de la distillation du pétrole ; soit pendant le craquage thermique ou reforming catalytique des produits en vue de la production des essences. Les GPL représentent entre 2 et 3 % de l'ensemble des produits obtenus lors des opérations de raffinage. Selon sa provenance, une tonne de pétrole brut donne 20 à 30 kg de GPL.
3. Par récupération directe des gaz séparés du brut. <sup>[11][14]</sup>

### III.3 Les caractéristiques générales du GPL

**Odeur :** Le GPL est inodore à l'état naturel, pour des raisons de sécurité on ajoute dans des limites précises à des fins de commercialisation des odorants, ces additifs sont des composés sulfurés tels que le diéthy-mercaptan ou le diméthyl-sulfi.

**Couleur :** Le GPL est incolore dans les deux états Tension de vapeur : la TVR du GPL est de 8 et 2 bars pour le propane et le butane respectivement à 20°.

**Densité :** Aux conditions normales de T et P, les GPL sont plus lourds que l'air, la densité diminue avec l'augmentation de la température à titre d'exemple à 38°C la densité est égale à 0,534, elle est très importante pour les GPL commerciaux.

**Dilatation :** Le GPL se dilate de 0,25% par degré sous l'effet de la chaleur. C'est pourquoi les réservoirs ne doivent être remplis qu'à 85% de leur capacité.

**Température d'ébullition :** A la pression atmosphérique la température d'ébullition de propane est de -42° et celle du butane -6°.

**Pouvoir calorifique :** Pour le cas du gaz propane, combustion d'une tonne de GPL va libérer 12 780 kilowattheures (12,78 KWH/kg PCI).

**Impuretés :** Le plus important est le soufre, la teneur en soufre est inférieure ou égale à 0,005% en masse, ainsi que l'eau qui est extraite durant le traitement.

**Corrosion :** le GPL est non corrosif à l'acier mais corrosif généralement à l'aluminium, au cuivre et ses alliages.

**Propriétés lubrifiantes :** Le GPL n'a pas de propriétés de refroidissement et de lubrification, contrairement au diesel et à l'essence. <sup>[23][24]</sup>

### III.4 Unité 13 de récupération et traitement des LPG

#### III.4.1 Description du process

Cette unité a pour but de récupérer le propane et le butane à partir des produits de tête du stabilisateur de l'unité de distillation atmosphérique et de tête du débutaniseur de l'unité de reforming catalytique.

La charge passe dans le réservoir tampon de GPL (13D1) où le gaz est séparé et le liquide aspiré par la pompe d'alimentation du dééthaniseur (13G1) puis est réchauffé jusqu'à 75 ° par échange de chaleur avec les effluents du dépropaniseur et ensuite chargé dans le 12° plateau du dééthaniseur.

Le dééthaniseur (13C2) garni de 30 plateaux fonctionne à une pression de 34,8 Kg/cm<sup>2</sup> et sépare la charge en C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> et composants légers.

Les vapeurs de tête sortantes du dééthaniseur sont refroidies dans le condenseur de tête (13E2) puis passent dans le receveur de tête (13D2) d'où le liquide est envoyé comme reflux et le reste est envoyé à l'absorbeur de l'unité 11 (11Cé7). Le fond est rebouilli puis envoyé au dépropaniseur, la source de chaleur du rebouilleur du dééthaniseur est la vapeur 3 bars dont la température est contrôlée par la 13TRC2.

Le dépropaniseur fonctionne à 17 Kg/cm<sup>2</sup> est garni de 40 plateaux séparant la charge en propane et butane. La charge entre au niveau du plateau n°22. La vapeur sortante du sommet du dépropaniseur est refroidie dans les condenseurs de tête (13E5) entre dans le ballon (13D3) d'où une partie est envoyée comme reflux par la pompe (13G3). La température de tête étant contrôlée par la TRC 3 et le reste est envoyé au réservoir de stockage du propane.

Le liquide au fond du dépropaniseur est rebouilli par la vapeur 3 bars puis après passe par l'échangeur de chaleur de charge du dééthaniseur (13E1), il est refroidi dans le réfrigérant à eau (13E4) puis est envoyé au réservoir de butane. La vapeur de rebouillage est contrôlée par la 13FRC 8. <sup>[13]</sup>

### III.4.2 Spécifications technique de la charge et produits

Charge :

$$\begin{aligned} \text{Densité} &= 0.522 \\ C_5^+ &< 2\% \text{ Vol} \end{aligned}$$

Produits :

Caractéristiques	Propane			Butane		
	minimum	type	maximum	minimum	type	maximum
C <sub>2</sub>		1.5	2			
C <sub>3</sub>	95	98			1	2
C <sub>4</sub>		0.5	2	96	98	
C <sub>5</sub>					1	2

TABLE III.1 – C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> pour qu'ils soient conformes

#### Rapport propane/butane

La réglementation française impose un volume de propane compris entre 19 et 50%. Depuis 1993, la norme EN589 demande un dosage de 50/50 et une pression de 2,5 bars à -10°.

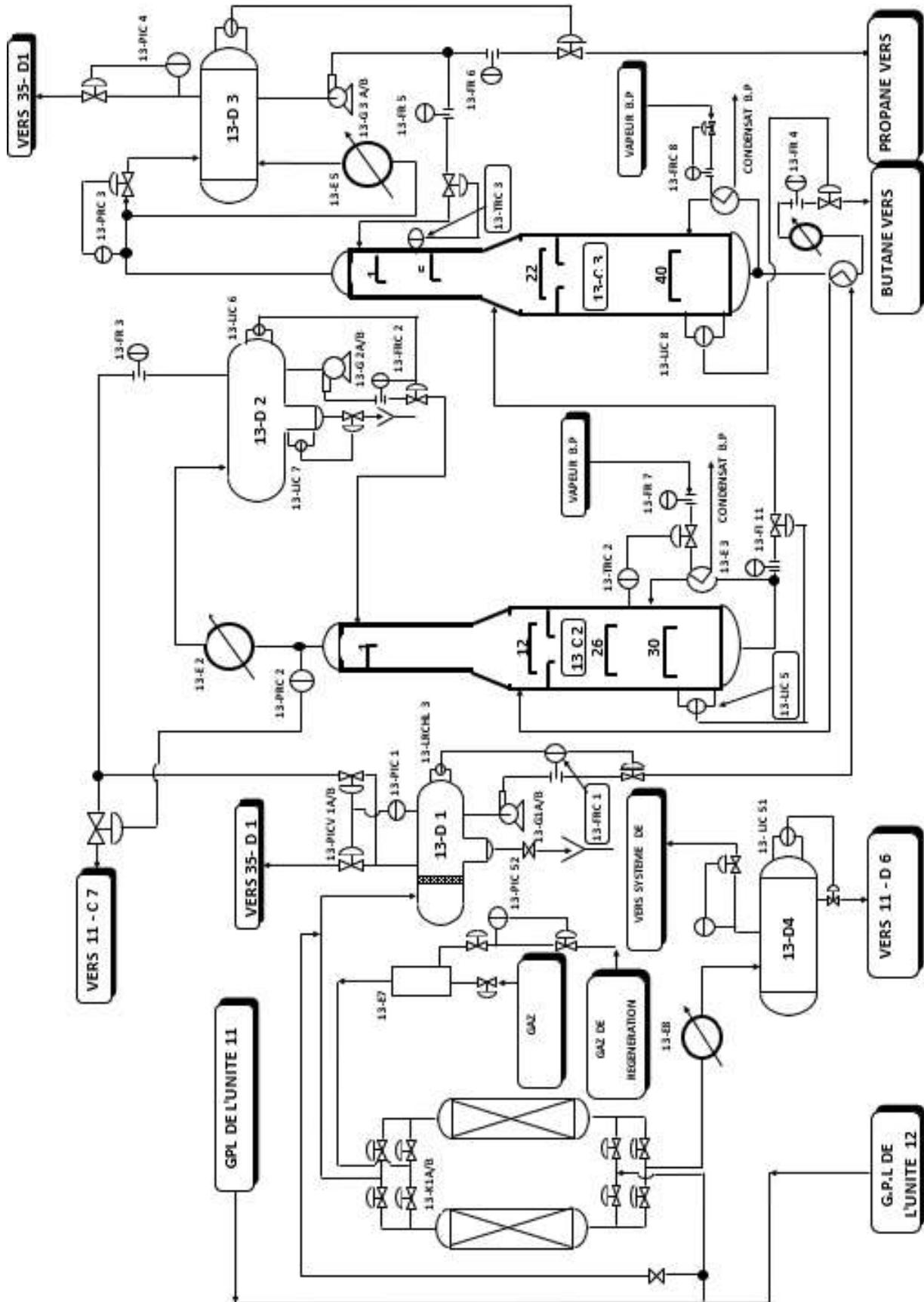


FIGURE III.1 – Schémas de principe de récupération et traitement des LPG [13]

### III.5 Les caractéristiques du propane et du butane

Spécifications	Butane(Commercial) (NF M40-001)	Propane(Commercial) (NF M40-001)
Définition	Mélange d'hydrocarbures composés principalement de butanes et de butènes et contenant moins de 19 pour 100 en volume de propane et de propène.	Mélange d'hydrocarbures composés dans la proportion de 90 pour 100 environ de propane, propène et pour le surplus d'éthane, d'éthylène, de butanes et de butènes.
Odeur	Caractéristique	Caractéristique
Masse volumique (NFM41-008)	Egale ou supérieure à 0,559kg/l à 15°, ce qui correspond à 0,513 kg/l à 50° d'après les tables de correspondance ASTM.IP.	Egale ou supérieure à 0,502 kg/l à 15°, ce qui correspond à 0,443 kg/l à 50° d'après les tables de correspondance ASTM.IP.
Pression de vapeur relative (NF M 41-010)	Inférieure ou égale à 6,9 bars à 50°	Au moins égale à 8,3 bars à 37,8°C garantissant un minimum de 11,5 bars à 50°C et au plus égale à 14,4 bars à 37,8° garantissant un maximum de 19,3 bars à 50°
Teneur en Soufre (NFM41-009)		Inférieure ou égale à 0,005% en masse.
Composés sulfurés (NF M 41-006)	Absence de réaction à l'essai au plombite de sodium dit "Doctor test spécial".	
Corrosion lame de cuivre 1 heure à 37,8° (NF M 41-0076)	1 b au maximum.	
Teneur en eau	Absence d'eau séparable par décantation.	Non décelable à l'essai au bromure de cobalt (NF M41-004)
Evaporation (NFM 41-012)	Point final d'ébullition inférieure ou égale à 1° par la méthode dite du "point à 95 pour 100".	Point final d'ébullition inférieure ou égale à moins 15° par la méthode dite du "point à 95 pour 100".

TABLE III.2 – caractéristiques de butane et de propane [20][21]

## **III.6 Utilisation de GPL**

Le marché du GPL comprend le marché du combustible (pour l'usage domestique, agricole et industriel) et celui du carburant.

### **III.6.1 Le GPL dans la production combinée de chaleur et d'énergie électrique**

C'est ce que l'on appelle la cogénération. Elle est fondée sur le fait que la production électrique dégage une grande quantité de chaleur à température moyenne, habituellement dissipée dans l'environnement. Cette technique a permis au GPL d'être utilisé dans les zones rurales non seulement pour chauffer et cuisiner, mais également pour décentraliser la production d'électricité des maisons individuelles.

La cogénération peut produire 1 KW d'électricité et peut utiliser partout dans la maison, en fournissant jusqu'à 24KW de production thermique pour le chauffage et l'eau chaude. <sup>[11][25]</sup>

### **III.6.2 Utilisation de GPL pour les applications industrielles**

Métallurgie, pétrochimie, industrie textile et du papier, etc. par exemple, ils sont utilisés dans les fours de traitement thermique, de cuisson et d'émaillage (notamment pour le verre, les poteries ou les porcelaines). Les propriétés oxydantes ou réductrices des GPL y sont exploitées, notamment pour jouer sur les couleurs. <sup>[25]</sup>

### **III.6.3 Utilisation de GPL pour les applications agricoles**

Agriculture, élevage etc. par exemple, les GPL sont des alternatives aux produits chimiques pour le désherbage. Ils sont en effet largement utilisés dans les secteurs de l'aviculture, de l'horticulture ainsi que pour le séchage des céréales avant leur stockage en silos. <sup>[25][11]</sup>

### **III.6.4 GPL dans la climatisation**

Deux principaux facteurs sont utilisés :

1. Pour s'évaporer, le GPL absorbe la chaleur de l'environnement et crée un froid.
2. Un moteur fonctionnant au GPL peut entraîner un compresseur qui comprime le gaz GPL et la détente absorbe la chaleur.

A la base de ces deux principes ont été construits :

1. Les réfrigérateurs.
2. Les climatiseurs.

### III.7 GPL carburant

Le GPL carburant est un mélange de butane et de propane à des proportions normalisées. Ce carburant est distribué en Algérie par naftal depuis 1983 sous le nom commercial déposé « SIRGHAZ ».

Grâce à une taxation avantageuse, le « SIRGHAZ » est aujourd'hui le carburant le moins cher du marché avec son prix de 9 DA/litre et présente aussi une autre source d'économie qui réside dans la combustion du GPL qui ne laisse aucun dépôt de calamine, ce qui rend l'entretien du véhicule roulant au « SIRGHAZ » moins coûteux qu'un véhicule traditionnel. Le

« SIRGHAZ » réduit significativement les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CO) et les émissions polluantes par rapport aux carburants classiques. Le « SIRGHAZ » ne contient ni plomb, ni benzène, et ne produit pas de particules.

Le marché du GPL carburant présente des opportunités certaines en Algérie, compte tenu de la disponibilité de la ressource et de ses avantages économiques et écologiques.

La stratégie de naftal pour le développement de GPL/c à long et à moyen termes s'articule autour de quatre (4) grands axes :

- Développement de la chaîne logistique GPL/c (stockage, réseau de canalisation, flotte de transport de livraison).
- Développement de l'activité de conversion des véhicules (rénovation et réalisation de centres de conversion, acquisition de kits de conversion, formation d'installateurs).
- Extension du réseau de points de ventes de GPL/c (réalisation de points de ventes au niveau des stations-service, réalisation de points de vente dédiés uniquement au GPL/c).
- Propositions de mesures incitatives pour la promotion et le développement de ce produit. [15]

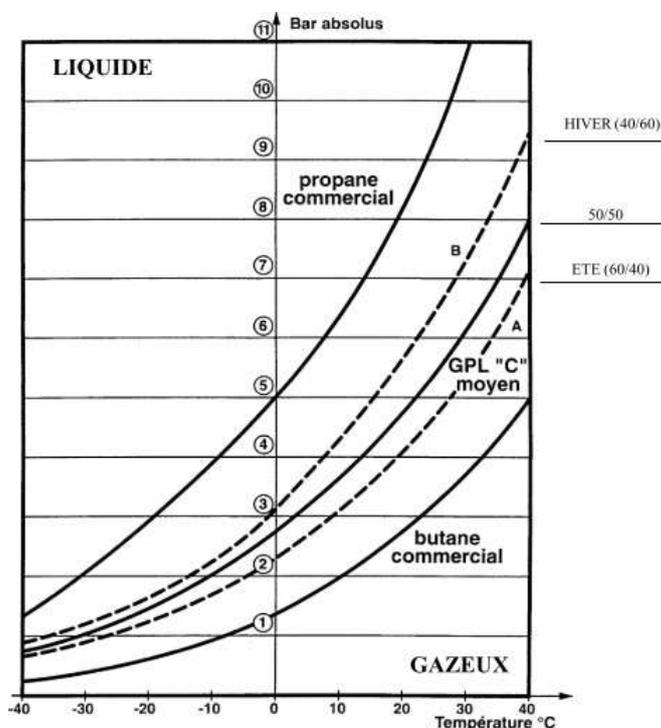


FIGURE III.2 – Analyse des courbes [16]

### III.7.1 Comparaison du GPL-c et de l'essence

#### Masse volumique de l'essence (approximation)

750 kg/m<sup>3</sup> (CNTP)

- \* PCI : 43 MJ/kg
- \* soit 32,25 MJ/l
- \* Sur une base de 1 €40 le litre, le MJ coûte donc 4,34 centimes d'euro.

#### Masse volumique du propane liquéfié

515 kg/m<sup>3</sup> (à 15 °C)

- \* PCI : 46,35 MJ/kg (12,87 kWh/kg)
- \* soit 23,64 MJ/l

#### Masse volumique du butane liquéfié

585 kg/m<sup>3</sup> (à 15 °C)

- \* PCI : 45,72 MJ/kg (12,72 kWh/kg)
- \* soit 26,52 MJ/l

#### Pour un mélange 60/40 propane/butane (en masse)

Masse volumique : 535 kg/m<sup>3</sup> (à 15 °C)

- \* PCI : 46,1 MJ/kg
- \* soit 24,66 MJ/l

#### Pour un mélange 50/50 propane/butane (en masse)

Masse volumique : 543 kg/m<sup>3</sup> (à 15 °C)

- \* PCI : 46,0 MJ/kg
- \* soit 24,99 MJ/l

#### Pour un mélange 40/60 propane/butane (en masse)

Masse volumique : 550 kg/m<sup>3</sup> (à 15 °C)

- \* PCI : 45,97 MJ/kg
- \* soit 25,28 MJ/l
- \* Sur une base de 0,7 € le litre, le MJ coûte donc 2,77 cent d'€ soit 36

Un litre de GPL a une valeur énergétique de 22,5 % inférieure à celle contenue dans un litre d'essence et un litre d'essence a une valeur énergétique de 29 % supérieure à celle contenue dans un litre de GPL.

Le GPL carburant doit respecter les spécifications suivantes (norme EN 589) :

- indice d'octane supérieur à 89.
- pression de vapeur absolue inférieure à 15,5 bars à 40 °.
- au moins 50 % de propane et plus de 19 % de butane. <sup>[17]</sup>

### III.7.2 Avantages techniques de GPL/c

- Pouvoir calorifique plus élevé.
- Indice d'octane plus élevé donc plus de rendement.
- Homogénéité et dosage du mélange plus facile à réaliser (gaz / gaz).
- Pas de condensation des gaz.
- Pas de dilution dans l'huile donc meilleure protection du moteur = longévité.
- Pas de plomb ou de soufre.
- Le GPL carburant répond bien aux problèmes de pollution des villes
- Ni encrassement, ni dépôt de calamine dans le moteur
- Conduite plus souple (couple moteur disponible à plus bas régime)<sup>[16] [20]</sup>

### III.7.3 Inconvénients

- Renforcement des soupapes.
- Renforcement des sièges de soupape.
- Implantation, poids du système.
- Homologation.
- Consommation volumique de carburant plus importante + 20%
- Il existe un inconvénient majeur à l'encombrement, le réservoir peut amputer le volume du coffre. Toutefois les constructeurs proposent dès la conception de leurs modèles une version GPL avec réservoir intégré.<sup>[16] [20]</sup>

# **Chapitre IV**

## **Stockage et terminaux**

## IV.1 Introduction

Pour répondre à la grande variété des produits liquides industriels à stocker, les constructeurs ont recours à des réservoirs de formes diverses et de conceptions différentes, visant à s'adapter aux caractéristiques des produits à traiter de la manière la plus raisonnable et la plus économique possible. La configuration du réservoir de stockage dépend de deux conditions importantes, l'une est la conservation du produit en limitant l'évaporation, et l'autre est la résistance de la structure à la pression interne développée par le produit.

## IV.2 Définition d'un bac de stockage et d'un terminal pétrolier

Un bac de stockage est destiné à stocker le pétrole brut, les charges, les coupes intermédiaires et les produits finis avant expédition, quelle que soit sa forme géométrique, de liquides dans lequel il n'y a pas de réaction physique ou chimique. Il est le dernier élément de la chaîne de production de pétrole.

## IV.3 Les raisons de sa présence

- En l'absence de consommation locale de pétrole brut.
- Lorsque la consommation locale est insuffisante.
- Lorsque le site d'exploitation est éloigné du site de la raffinerie, Consommation.
- Quand les prévisions de production pétrolière sont limitées dans le temps.
- Lorsque la capacité du réseau adjacent est insuffisante (pipeline, traitement, stockage).
- Lorsque le tarif de passage proposé dans le réseau est élevé.
- Pour des raisons commerciales, des remises sur les produits. [7]

## IV.4 Rôle Du Stockage

- La Réception, Le Traitement, Le Stockage, L'expédition et Le comptage du brut au terminal.
- Ajuster la qualité du produit à expédier.
- Immobiliser temporairement un volume liquide nécessaire pour un système de pompage.
- Compenser les fluctuations d'approvisionnement.
- Assurer un minimum d'autonomie énergétique d'un pays consommateur. [5][7]

## IV.5 Classification des bacs de stockage

### IV.5.1 Classification selon la pression de stockage

- Réservoirs à pression atmosphérique : La pression interne légèrement supérieure à la pression atmosphérique, jusqu'à une pression de 3,5 kPa.
- Réservoirs basse pression : La pression supérieure à celle des réservoirs de stockage atmosphériques, jusqu'à une pression de 100 kPa.
- Réservoirs sous pression : réservoirs fonctionnant à une pression supérieure à 100 kPa. [8]

## IV.5.2 Classification selon le type de construction

### IV.5.2.1 Réservoirs à toit fixe

- Toit plat : est destiné aux réservoirs de stockage de petit diamètre sans aucun Support.
- Toit conique autoportant : il est autoportant du fait de la rigidité offerte par le toit.
- Toit conique soutenu au centre : est utilisé pour les réservoirs de taille moyenne.
- Toit conique supporté : pour prendre en charge la charge du toit et les charges extérieures.
- Toit conique supporté extérieurement.
- Toit en dôme ou en parasol : La forme rend le toit un peu plus rigide, mais il est coûteux.

### IV.5.2.2 Réservoirs à toit flottant (RTF)RTF

#### externe :

- Toit à simple pont : pour des diamètres allant de 10 à 30 m.
- Toit à deux ponts : Les toits à deux étages sont conçus pour une large gamme de diamètres, y compris ceux de plus de 30 m de diamètre.

#### RTF interne :

- Toit panoramique.
- Toit de cloison
- Toit en peau et ponton
- Toit en ruche d'abeille
- Toit sandwich en plastique <sup>[8]</sup>

## IV.5.3 Classification selon la forme du bac de stockage

- Bacs de stockage cylindrique
- Bacs de stockage sphériques
- Bacs de stockage parallélépipédique <sup>[5][8]</sup>

## IV.5.4 Selon la pression de vapeur et température de stockage du produit stocké

	Pression de vapeur absolue $P$ et température de stockage $\theta$	Exemples de produits Stockés	Types de réservoirs Recommandés
À pression atmosphérique	$P = P_{amb}, \theta = \theta_{amb}$	Eau, incendie et industrielle, eau potable	les réservoirs ouverts, Réservoirs à toit fixe
	$P < 0.1 \text{ Bar}$ (Point d'éclair $> 55^\circ$ ) $\theta = \theta_{amb}$	Gazoles, fuels, Huiles, bitumes, asphaltes, etc.	Réservoirs à toit fixe
	$0.1 \text{ Bar} < P < 0,75 \text{ Bar}$ (Point d'éclair $\leq 55^\circ \text{C}$ ) $\theta = \theta_{amb}$	Pétroles bruts, essences, carburants aviation, white spirit, kérosène, benzène, Toluène, etc.	Réservoirs à toit flottant (externe ou interne)
Sous faible pression	$P = P_p < 1,5 \text{ bar}$ $\theta = \theta_{amb}$	Essences légères, Pentane, etc.	Réservoirs à toit fixe ancré ou avec fond sphérique
sous forte pression	$1,5 < P = P_p < 3 \text{ Bar}$ $\theta = \theta_{amb}$	Essences légères, Pentane, Iso-pentane, etc.	Sphéroïdes
	$1,5 < P = P_p < 30 \text{ Bar}$ $\theta = \theta_{amb}$	Butane, butadiène, Chlorure de vinyle, propane, propylène.	Ballons et sphères

TABLE IV.1 – Modes de stockage et types des réservoirs en fonction du produit stocké [81]

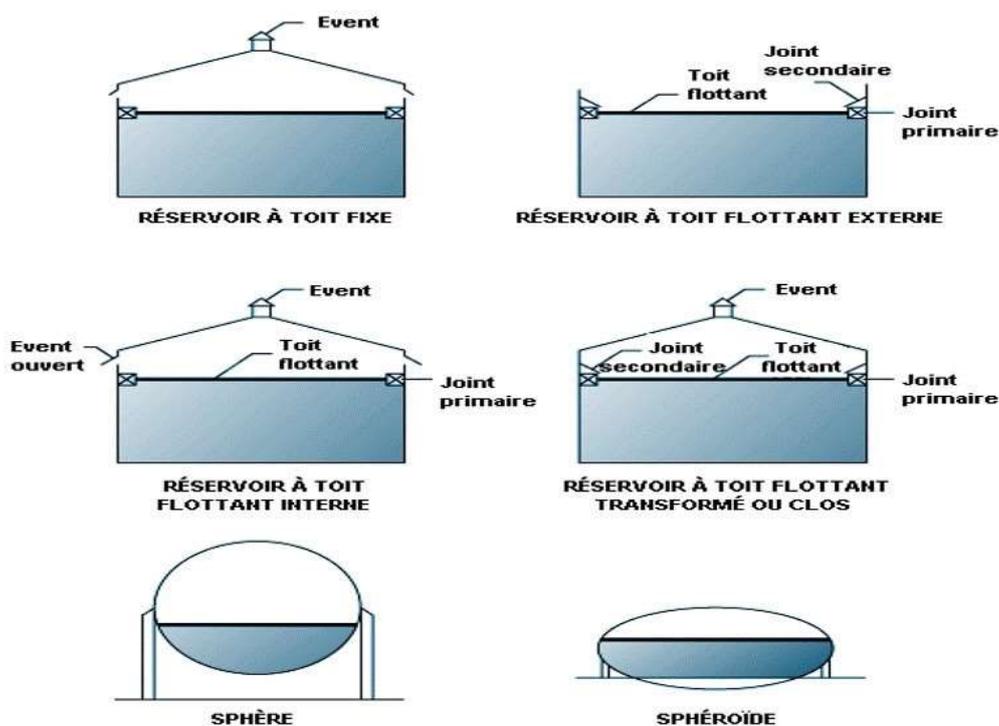


FIGURE IV.1 – Les types du bac de stockage [27]

## IV.6 Mode de stockage

Trois modes de stockage peuvent être envisagés :

### IV.6.1 Stockage Non-pressurisé :

(À pression atmosphérique) : Destiné pour stocker des liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante, des liquides qui ont le point normal d'ébullition supérieur à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à la température ambiante est inférieure à 1,013 bar

### IV.6.2 Stockage sous pression :

Destiné pour stocker des liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante, et une tension de vapeur absolue à la température ambiante supérieure ou égale à 1,013 bar

### IV.6.3 Stockage à température contrôlée :

Ce mode de stockage est réservé aux gaz liquéfiés qui, à température ambiante, développent de fortes pressions. Il consiste à stocker ces produits sous une température d'exploitation réduite obtenue par des machines frigorifiques et un système d'isolation. On distingue deux modes de stockages :

- Stockage semi-réfrigéré : sous pression  $P_{red}$  et température  $\theta_{red}$  réduites
- Stockage réfrigéré ou cryogénique : (au PNE) sous pression atmosphérique P (atm) et à température d'ébullition  $\theta_{eb}$  <sup>[5] [8]</sup>

#### Remarque

La géométrie des réservoirs est attentivement liée à la nature du produit stocké et à sa volatilité à température de stockage.

## IV.7 Le stockage du GPL

Les activités d'un stockage industriel de gaz de pétrole liquéfié (GPL) sont le conditionnement, le stockage et la distribution de GPL. Le stockage de GPL est effectué sous des pressions effectives qui restent en général inférieures à 30 bars, Et pour la plupart des gaz et pour une température maximale d'étude de l'ordre de 50°. Et généralement en utilise le stockage aérien sous pression est le mode de stockage le plus rencontré dans l'industrie des GPL car il permet un stockage économique de très grandes quantités avec un cout d'exploitation très faible. Le stockage est réalisé dans des réservoirs directement exposés à l'air ambiant. <sup>[18]</sup>

La pression de stockage est la tension de vapeur à la température ambiante et dépend uniquement

- de la nature du produit stocké.
- des conditions atmosphériques.

Cela concerne : La nature du produit stocké des conditions atmosphériques

- les réservoirs cylindriques
- les sphères
- les stockages souterrains
- les stockages sous talus

### **IV.8 Les constituants qui provoquent des problèmes pendant le stockage, la production et le transport**

Constituants	Problèmes
$H_2S$	Extrêmement toxique
Eau Libre	Pétrole : Accumulation dans les lignes (réduction des capacités, problèmes opératoires) gaz : Formation des hydrates (bouchage, arrêt de la production)
Eau libre + $H_2S$ , $CO_2$ ou sels	Corrosion des équipements
Sels	Dépôts (réduction des capacités des conduites, bouchage)
Légers ( $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ , $C_4$ )	Pétrole : Dégazage important dans les bacs, les bateaux (risque d'explosion)
Lourds ( $C_{5+}$ )	Gaz : dépôts liquides dans les lignes de transport (réduction de capacité, erreurs de comptage)
Paraffines à chaînes longues $C_{18+}$	Figeage des bruts (arrêt de la production et de la livraison)

TABLE IV.2 – les constituants qui provoquent des problèmes <sup>[5]</sup>

#### **IV.8.1 Réservoirs cylindriques horizontaux (cigares) :**

Les cigares sont installés au-dessus du sol sur des berceaux supports. Leurs extrémités sont terminées par des fonds emboutis hémisphériques, torisphériques ou elliptiques. Ils sont destinés aux stockages sous forte pression, mais leur emploi est limité en général à de faibles capacités (jusqu'à 500 m<sup>2</sup>).

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.

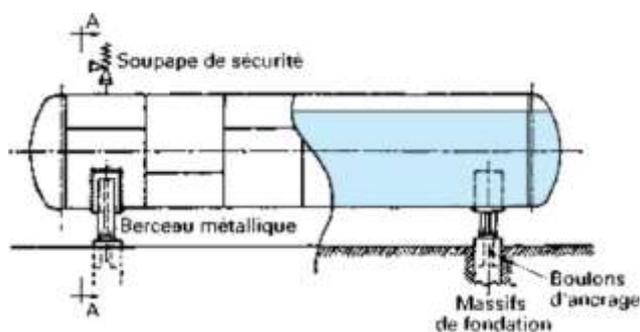


FIGURE IV.2 – cigare avec fonds torisphériques ou elliptiques

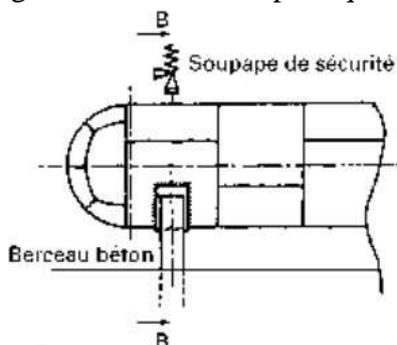


FIGURE IV.3 – cigare avec fonds hémisphériques [8]

#### IV.8.2 Réservoirs cylindrique horizontal sous talus :

Ce mode de stockage permet aussi, grâce à l'effet isolant du talus de terre, d'abaisser les pressions de fonctionnement. En contrepartie, il introduit un problème important de corrosion sur les parois externes du réservoir, en contact direct avec le talus, dont il faut se protéger très efficacement. Cette protection est en général assurée par un revêtement de peinture anticorrosion très élaboré et par une protection cathodique. [5]

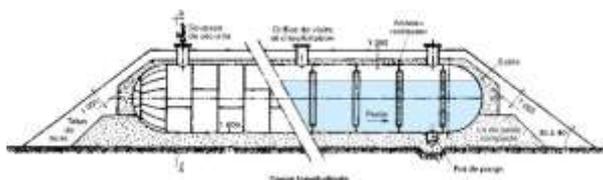


FIGURE IV.4 – une coupe longitudinale d'un cigare sous talus [5]

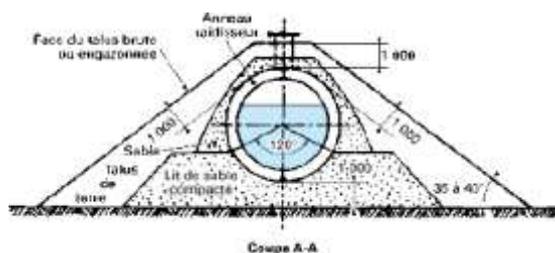


FIGURE IV.5 – l'axe longitudinale d'un cigare a une légère pente dirigée vers le pot de purge [5]

### IV.8.3 Réservoirs sphériques :

Appelés aussi sphères, Ces ouvrages sont parfaitement adaptés aux stockages sous forte pression et permettent la réalisation économique de grandes capacités. Et aussi La forme sphérique permet de mieux utiliser la résistance de la tôle et d'obtenir un moindre coût d'investissement.

La gamme de capacités réalisables va de 200 m<sup>3</sup> ( $\varnothing = 7$  m de diamètre) jusqu'à 7000 m<sup>3</sup>. Le quotient de la surface extérieure par le volume est inférieur de 88 % à celui d'un cylindre de même volume ce qui réduit les échanges de chaleur avec l'air ambiant. Compte tenu de la géométrie et la grande dimension, la construction des sphères est effectuée directement sur le site d'implantation à partir des éléments transportables préfabriquée en usine. <sup>[5]</sup>

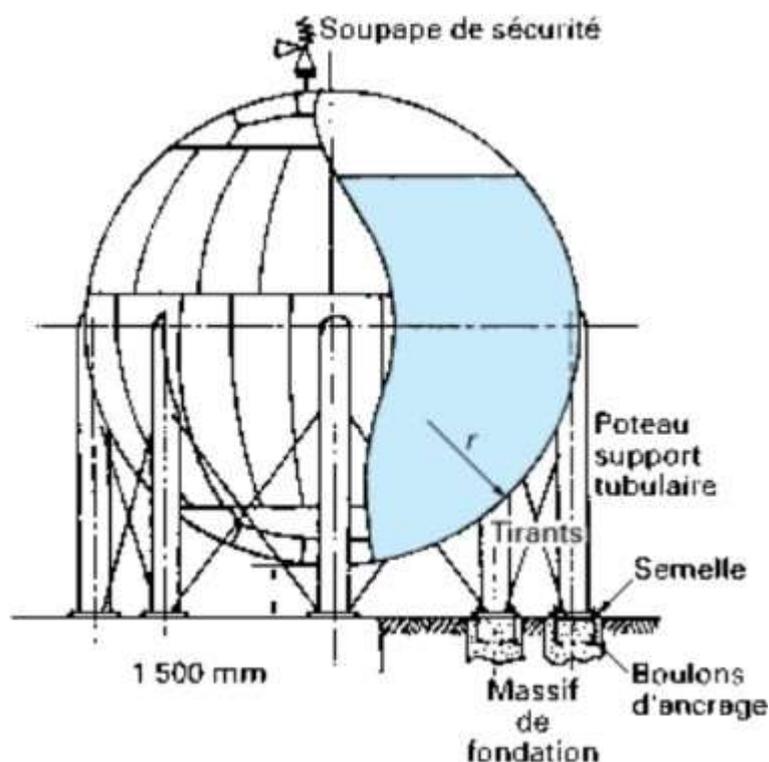


FIGURE IV.6 – réservoir sphérique (sphère) <sup>[5]</sup>

#### IV.8.4 Sphère sous talus :

La sphère est abritée sous un cocon autoporteur ou talus en “Texsol” : mélange de sable et de fils polyester (à raison de 130 km de fil par m<sup>3</sup>, soit 3 kg/m<sup>3</sup>) de masse volumique 1,9 t/m<sup>3</sup>. La sphère repose sur un “coquetier” en béton. Cette dalle repose sur 84 pieux forés à 30 m de profondeur. L’ensemble des équipements est positionné sur trois trous d’homme de 30 cm de diamètre situés au sommet de la sphère. Le transfert vers les autres sphères du dépôt s’effectue par 2 tuyauteries de 8 cm en phase liquide et une tuyauterie de 4 cm en phase gazeuse. Cette technique de stockage a pour avantage, entre autres, de protéger le réservoir par rapport aux incendies externes et donc de limiter les moyens fixes d’extinction, de générer des distances de sécurité et une surface au sol nécessaire plus faible par rapport à des stockages aériens.

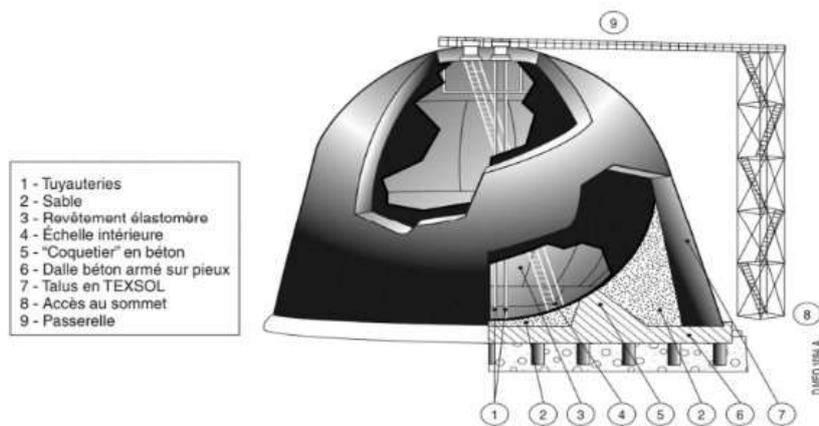


FIGURE IV.7 – schéma détaillé de la sphère sous talus [19]

#### Remarque

Le stockage cryogénique n’est pas trop utilisé pour le stockage des GPL, il est généralement réservé au stockage du GNL (gaz naturel liquéfié).

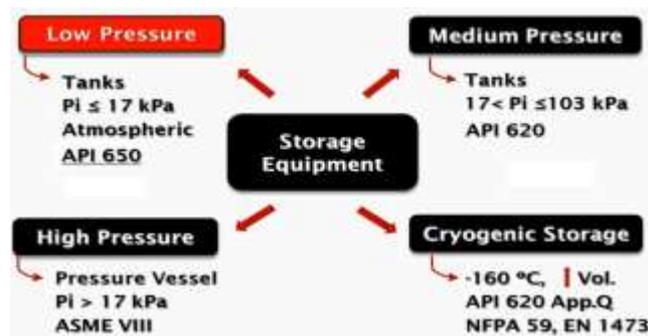


FIGURE IV.8 – Codes de design des bacs en acier (welded steel) [5]

## IV.9 Le transport et les matériels de distribution de GPL

Les stockages « primaires » ou « massifs », réceptionnent le GPL en provenance des raffineries ou de champs de gaz par voie routière, ferroviaire, maritime ou par canalisation.

Puis le GPL est transporté vers d'autres dépôts, dits « secondaires » ou « relais vrac », par wagons-citernes, par camions, par voie maritime ou encore par canalisation depuis une raffinerie voisine. Le relais vrac permet d'approvisionner en GPL par camions la clientèle de proximité, constituée essentiellement de particuliers et d'industriels.

Le conditionnement des bouteilles de gaz a lieu dans les centres emplisseurs.

La distribution se fait essentiellement par voie routière depuis les relais vrac pour assurer l'emplissage des citernes individuelles et depuis les centres emplisseurs pour acheminer les bouteilles vers les points de vente. Certains dépôts GPL peuvent assurer le double rôle de relais vrac et de centre emplisseur. <sup>[18]</sup>

### IV.9.1 Les matériels de distribution de GPL

- de bouteilles à gaz, de 3 à 35 kg,
- de réservoirs « petit vrac », de 200 à 6000 kg,
- de réservoirs « moyen vrac » de 6 à 50 tonnes,
- de stockages industriels de 100 à 5000 m<sup>3</sup> (de 190 kg à 9,4 t),
- de réseaux de distribution par canalisations. <sup>[18]</sup>

## IV.10 Capacités de stockage

La capacité de stockage peut être plus importante dans le cas des réservoirs atmosphérique, Elle est limitée par la hauteur et le diamètre possibles de réaliser.

Le choix de la hauteur est lié à la nature du terrain (résistance du sol), elle est le plus souvent comprise entre 14 et 22m. Le diamètre maximal sera limité par la surface autorisée par les codes de construction pour la partie basse de robe. Cette épaisseur est généralement fixée à 45 mm par la plupart des codes existants.

Hauteur de la robe	Volume et diamètre approximatifs	
	$R_e = 315 \text{ N/mm}^2$	$R_e = 335 \text{ N/mm}^2$
14 m	215 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 140\text{m}$ )	245 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 150\text{m}$ )
20 m	155 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 100\text{m}$ )	175 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 105\text{m}$ )
22 m	140 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 90\text{m}$ )	155 000 m <sup>3</sup> ( $\phi = 95\text{m}$ )

TABLE IV.3 – Capacités maximales déterminées à partir des règles du CODRES, avec une épaisseur de robe en acier de 45 mm <sup>[5][8]</sup>

$R_e$  : limite d'élasticité minimale de l'acier

## IV.11 Les principaux risques liés au stockage de GPL

Le GPL a donc une longue histoire, marquée par des progrès technologiques mais également par des accidents majeurs qui ont notamment fait évoluer les techniques et pratiques autour du GPL. On peut citer entre autres la catastrophe de Feyzin (1966), celle de San Juan Ixuatepec au Mexique (1984) ou encore celui d'Izmit en Turquie (2002).

La survenue de ces incidents et accidents est fortement liée aux caractéristiques physico- chimiques du GPL, qui est un gaz inflammable et explosif. Les phénomènes dangereux à craindre sont :

- Les risques d'explosion (gaz ou de vapeurs)
- Les risques d'incendie dus à la présence des produits inflammables.
- Les risques d'émulsion dus à la présence accidentelle des eaux à des hautes températures (dépassant 110°C).
- Les risques liés à la toxicité des produits stockés.
- Une feu torche et le feu de nappe. <sup>[5]</sup>

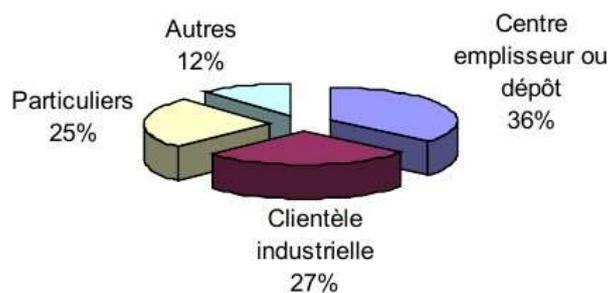


FIGURE IV.9 – Répartition des accidents selon leur lieu de survenance <sup>[18]</sup>

### IV.11.1 Les différents types d'accidents

Dans un parc de stockage on peut s'affronter à plusieurs types d'accidents, on cite :

- UVCE
- FROTH-OVER
- BOIL-OVER
- BLEVE

#### IV.11.1.1 UVCE « Unconfined Vapor Cloud Explosion »

C'est une explosion d'un nuage gazeux à l'air libre produisant des effets de surpression et des effets thermiques. Les étapes de formation d'UVCE :

- Rejet à l'air libre de grande quantité de produits inflammables
- Formation et dispersion d'un nuage explosible (air + gaz)
- Inflammation nuage initiée par une étincelle
- Propagation de la flamme dans le nuage explosif
- Mélange et combustion des zones plus riches en combustible [5]

#### IV.11.1.2 FROTH-OVER :

C'est la mise en ébullition d'eau dans un produit chaud qui n'est pas en feu. Exemple rupture d'un serpentin dans un bac de stockage de produits réchauffés causant un débordement avec moussage.

#### IV.11.1.3 BOIL-OVER :

C'est une explosion par vaporisation résultante de la présence de l'eau dans le fond d'un réservoir qui a pris feu.

#### IV.11.1.4 BLEVE « Boiling liquid expanding Vapor explosion »:

C'est l'explosion par vaporisation instantanée d'un liquide bouillon. Il se produit quand une capacité de gaz liquéfié sous pression est prise dans les flammes suivi d'une augmentation de pression jusqu'à rupture de l'une des parois. [5]

### IV.11.2 Parmi les accidents majeurs marquants du secteur de GPL

**La raffinerie FEYZIN (FRANCE) :** La raffinerie de Feyzin, mise en service en 1964, traite 1,7 Mt/an de pétrole. Sa zone de stockage de GPL comprend 12 850 m<sup>3</sup> (capacité théorique 13 100 m<sup>3</sup>) d'hydrocarbures sous pression dans 10 sphères de propane ou de butane. Les sphères sont au plus proche à 22,50 m de l'autoroute A7.

Un aide opérateur prélève un échantillon lors d'une purge sur une sphère de propane de 1 200 m<sup>3</sup> remplie à 60 %. Après plusieurs incidents, une procédure opératoire stricte avait été établie pour purger les sphères (ouverture de la vanne supérieure, puis progressivement de la vanne inférieure sans jamais l'ouvrir à fond). A 6h40, l'aide opérateur manœuvre dans le mauvais ordre les vannes en série qui givrent et se bloquent en position ouverte.

Une fuite de propane génère un nuage inflammable qui dérive lentement jusqu'à l'autoroute. Des voitures le traversent sans conséquences. Mais à 7h15, une voiture arrêtée à 100 m du point de fuite sur le CD4 longeant l'autoroute allume le nuage ; son chauffeur grièvement brûlé décèdera ultérieurement.

Un violent chalumeau apparaît sous la sphère 1 min plus tard. Les secours de la raffinerie, de Vienne et de Lyon arrivés entre 7 h et 8h30, essaient de refroidir les sphères voisines et d'éteindre la torchère géante qui prend une nouvelle ampleur après l'ouverture des soupapes de sécurité sur le haut de la sphère mise en cause.

Celle-ci explose brutalement vers 8h45 (1er BLEVE) en faisant 13 victimes. La boule de feu culmine à 400 m de hauteur et atteint 250 m de diamètre. Une sphère voisine de propane explose à son tour à 9h40 (2ème BLEVE) sans faire de victimes. Le bilan humain est lourd : 18 morts dont 11 sapeurs-pompiers et 84 blessés sur 158 personnes présentes. D'importants dommages matériels sont observés : inflammation des réservoirs voisins et ouverture de plusieurs sphères de stockage, missiles dus aux BLEVEs retrouvés à plus de 700 m dont l'un de 48 à 325 m, immense cratère à la place des 2 sphères, 8 000 m<sup>3</sup> (1 500 t) de produits pétroliers perdus. Le souffle de l'explosion est perçu jusqu'à Vienne (16 km au sud) et 1 475 habitations ont été atteintes.

Des responsabilités pénales sont retenues envers l'aide opérateur et l'agent de sécurité pour méconnaissance des consignes. Le Directeur du site est également mis en cause. En matière civile, des dommages et intérêt sont retenus. Cette catastrophe entraîne de profondes réformes de la réglementation et de l'administration chargée du contrôle des installations classées.

Cet accident a généré un nombre important d'enseignements, notamment sur :

- L'opération d'échantillonnage en partie basse du réservoir : accessibilité des vannes d'échantillonnage et commande de la position de la vanne avec un dispositif d'écrou pour bloquer la vanne dans la position souhaitée.
- Les cuvettes de rétention : redimensionnement par rapport aux critères de l'époque.
- Les soupapes : Résistance de la sphère à la pression de tarage des soupapes en cas de surchauffe et préconisation d'un refroidissement en partie haute du réservoir.
- Refroidissement des capacités : manque de ressource en eau + renforcement des dispositifs fixes de refroidissement et absence d'un point de commandement unique pour les secours externes. <sup>[18]</sup>

### **IV.11.3 Conclusions et les séquences accidentelles génériques**

Les principaux phénomènes dangereux suite à l'inflammation d'une fuite de GPL sont :

- Une feu torche ou un feu de nappe engendrant des effets thermiques,
- Une explosion engendrant des effets thermiques et de surpression,
- Un BLEVE occasionnant des effets thermiques (boule de feu) et mécaniques (surpression et missiles).

Les cinétiques de déroulement des phénomènes en question sont rapides voire instantanées alors que les cinétiques de la phase pré-accidentelle peuvent s'étendre sur une période un peu plus longue, de l'ordre de la dizaine de minutes. (Plusieurs dizaines de minutes pour l'accident de FEYZIN). [18]

D'après l'accidentologie, les causes de fuite à proximité du réservoir peuvent être :

- une fuite d'un joint d'une pompe de transfert de GPL.
- une fuite de joint sur un joint de tige de soupape et sur un joint de bride.
- une fuite lors d'un échantillonnage ou d'une purge d'eau.
- une fuite d'une canalisation de transfert due à la corrosion, à un dommage mécanique ou d'une connexion d'un tuyau fileté.
- une défaillance d'un joint d'un flexible de transfert ou d'un flexible de dépotage à l'interface entre une installation fixe et une citerne routière, un wagon-citerne ou un container maritime.
- une fuite d'un réservoir de stockage due à la corrosion.
- un sur remplissage d'un réservoir conduisant à un rejet liquide par les soupapes.
- une rupture du réservoir de stockage due à un jet de flamme direct sur la paroi non mouillée.

[18]

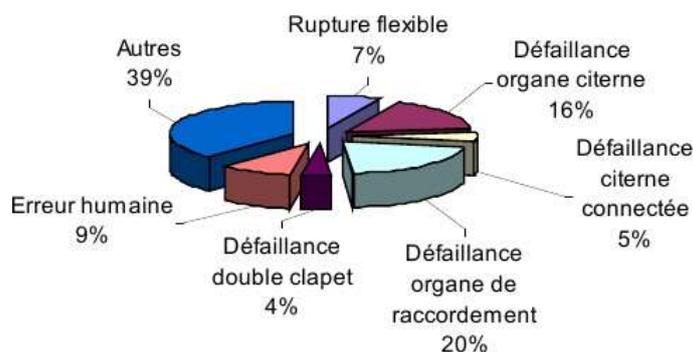


FIGURE IV.10 – Répartition par famille de causes-circonstances [18]

Pour éviter et limiter ces phénomènes dangereux, plusieurs solutions techniques et organisationnelles ont été mises en place de façon à :

- réduire l'occurrence de fuites : choix des matériaux et des équipements à installer sur le réservoir.
- limiter les quantités de produit rejetées accidentellement.
- déployer au plus vite des moyens de lutte contre l'incendie afin d'éviter l'éclatement des capacités : taux d'application défini, obligation d'arrosage fixe, maillage du réseau d'eau incendie.

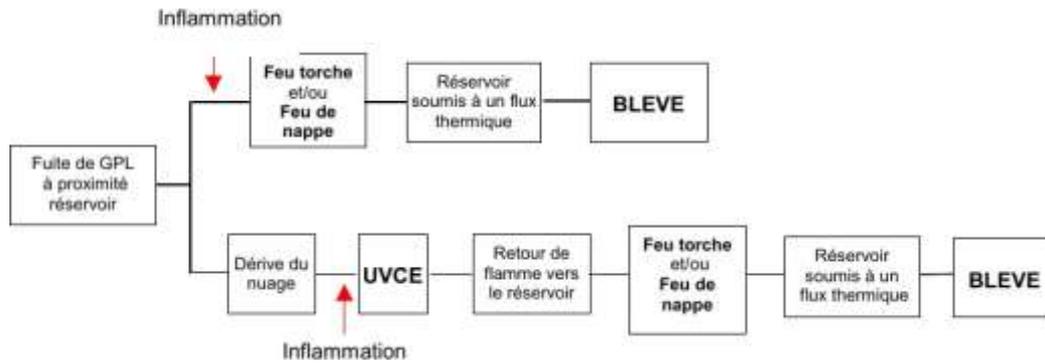


FIGURE IV.11 – Exemples de séquences accidentelles aboutissant à un BLEVE [18]

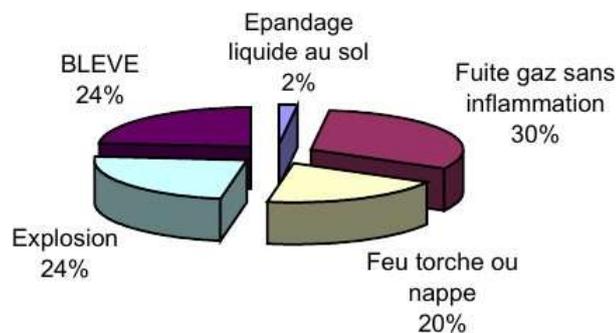


FIGURE IV.12 – Répartition des événements par phénomène observé

#### IV.11.4 Prévention des fuites de GPL

Les fonctions identifiées sont similaires d'un référentiel à un autre : il s'agit de prévenir une fuite, la limiter si elle survient, de prévenir les sources d'inflammation, de limiter les effets thermiques sur un stockage si un incendie survient.

Pour la fonction de prévention des fuites, au-delà des bonnes pratiques de conception et d'installation de ces réservoirs, on retrouve les dispositions suivantes :

- un ou plusieurs indicateurs de niveau asservis à une alarme et à un dispositif d'isolement du réservoir pour limiter les risques de fuite suite à un sur remplissage,
- pour les réservoirs enterrés ou sous talus, une protection contre la corrosion pour limiter les risques de fuite due à la corrosion,
- un ou plusieurs indicateurs de pression pouvant être asservis à une alarme et à un isolement du réservoir pour limiter les risques de surpression,
- une ou plusieurs soupapes de sécurité déchargeant vers une ligne d'évent.

Les lignes de purge font également l'objet d'une attention particulière (cf. accident de Feyzin). De manière générale, des recommandations sont prodiguées pour tous les raccords et vannes équipant le réservoir de stockage de GPL.

Dans tous les cas, la survenue d'un incident doit déclencher la mise en sécurité du réservoir (fermeture des vannes de sectionnement, isolement du réservoir et mise en sécurité des équipements connexes de type pomperie) et de l'installation en général.

#### IV.11.5 Prévention et protection vis-à-vis de l'incendie et réservoirs sous talus

Dans les différents guides et référentiels, les mesures suivantes sont proposées pour prévenir un incendie et limiter les conséquences d'agressions thermiques sur le réservoir :

- Les distances de séparation entre stockages et entre un stockage et un autre équipement. Les distances minimales de séparation pour l'ensemble des guides prennent en compte les 2 scénarios suivants :
  1. un incendie survenant à l'extérieur du stockage GPL,
  2. un incendie survenant sur des installations inflammables à proximité.
- La détection incendie (feu/flamme/fumée).
- L'ignifugation ou isolation thermique.

La protection thermique peut être assurée principalement de trois façons :

- placer le réservoir sous terre (réservoir enterré).
- couvrir le réservoir avec de la terre (réservoir sous talus).
- équiper le réservoir d'un système d'extinction d'incendie (déluges, rampes,... avec le réseau d'eau adapté aux besoins).<sup>[18]</sup>

#### IV.11.6 Fonction de sécurité

- Eviter et limiter le sur remplissage.
- Contrôler la pression dans la capacité de stockage.
- Eviter et limiter la surpression de la capacité.
- Eviter l'accumulation de liquide.
- Eviter une fuite de GPL sur la ligne de purge.
- Permettre l'intervention des services de secours.
- Refroidir les réservoirs en cas d'incendie.
- Arrêter de la pomperie<sup>[18]</sup>

#### IV.11.7 En cas de fuite de GPLc

- fermer les vannes du réservoir ;
- ventiler intensément, ouvrir portes et fenêtres ;
- rechercher l'origine de la fuite et l'étancher.

Si la fuite persiste :

- pousser le véhicule à la main, à l'air libre ;
- disperser le nuage de gaz avec un jet d'eau pulvérisé ;
- maintenir une zone de sécurité de 10 mètres autour du véhicule pendant toute la durée de l'intervention.<sup>[20]</sup>

### IV.12 CONCLUSION

On a constaté que le type de stockage le plus utilisé est le stockage aérien (sous pression) dans les unités que nous avons visité lors de notre stage. Le réservoir sphérique sous l'appellation d'une sphère est celui que nous avons choisi dans cette étude. Nous avons alors rassemblé toutes les informations possibles concernant sa construction et son exploitation.

# **Chapitre V**

## **Etude mécanique de la sphère de stockage**

## **V.1 Introduction**

Dans ce chapitre, on va réaliser l'étude mécanique d'une sphère T410 sous pression interne en réalisant la géométrie d'une demi-sphère 2D par le logiciel RDM6 - éléments finis.

## **V.2 La méthode des éléments finis**

L'évaluation du comportement mécanique et thermique d'une pièce par la méthode des éléments finis peut être décomposée en cinq phases :

### **Modèle géométrique :**

- contour extérieur
- lignes intérieures, points à mailler
- discrétisation ou maillage du domaine ...

### **Définition du problème :**

- élastique plane ou de révolution
- thermique plan ou de révolution
- flexion des plaques
- section droite ...

### **Entrées des données mécaniques et thermiques :**

- matériaux, épaisseur
- conditions aux limites
- charge ...

### **Calculs :**

- déplacements, contraintes
- actions de liaisons ...

### **Exploitation des résultats du calcul :**

- déformée
- courbes iso valeurs, graphes
- éditions ...

## **V.3 Les quatre modules des éléments finis**

### **Géométrie et maillage :**

Ce module permet la modélisation de la géométrie de la structure, le maillage de la pièce à étudier. Deux méthodes de maillage sont proposées : maillage automatique en triangles à trois ou six nœuds, maillage par blocs étudier en triangles à trois ou six nœuds et en quadrangles à 4, 8 ou 9 nœuds.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension .géo.

### **Thermique et élasticité :**

Ce module permet la détermination du comportement mécanique (statique et dynamique) et thermique (dans le domaine stationnaire) de pièces planes ou de révolution.

Les sollicitations prises en compte sont :

- les charges ponctuelles et nodales
- les charges réparties
- les charges réparties
- le poids propre
- les déplacements d'appuis
- les charges thermiques (températures imposés, flux de chaleur, convection,...).

Les charges thermiques peuvent être :

- des températures imposées
- des sources de chaleurs
- des flux de chaleur imposés
- des échanges de chaleur par convection

Les fichiers créés par ce module ont l'extension .cal.

### **Section droite :**

Ce module permet la détermination des caractéristiques d'une section droite et les contraintes sur cette section pour un effort donné.

Les fichiers créés par ce module ont l'extension .cal.

### **Flexion des plaques :**

Ce module permet la détermination du comportement statique et dynamique de plaques sollicitées en flexion. Le cisaillement transverse est pris en compte.

Les sollicitations prises en compte sont :

- les charges ponctuelles et nodales

### **Manuel d'utilisation**

- les charges linéiques
- les charges surfaciques
- les poids propre
- les déplacements d'appuis

## V.4 Le maillage

On a utilisé le maillage triangulaire à 6 nœuds et à 800 éléments.

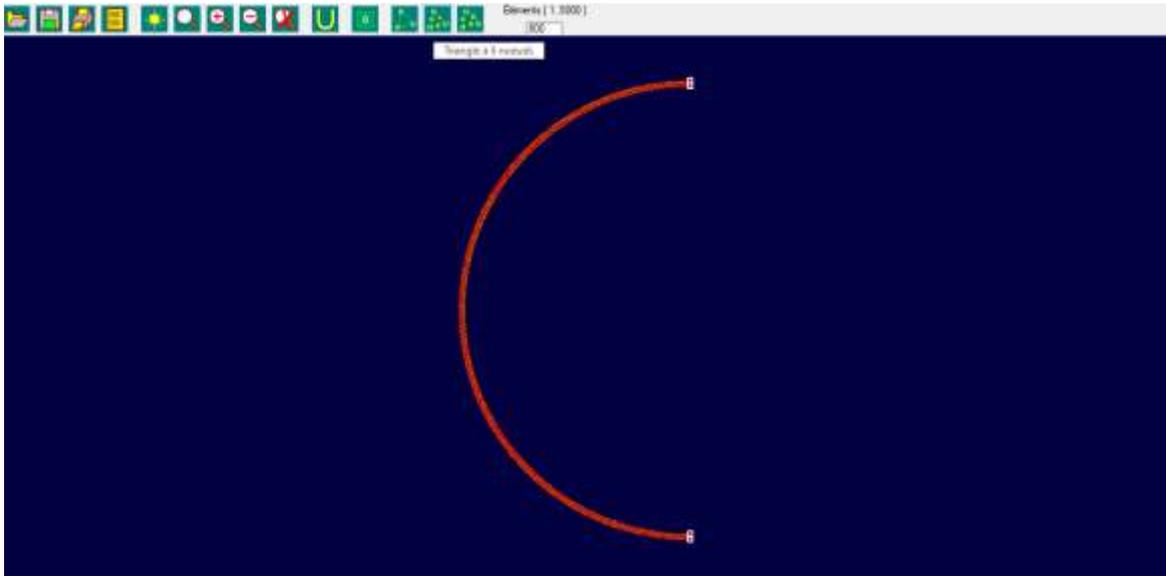


FIGURE V.1 – Le maillage

## V.5 Les propriétés du matériau

Matériau	
Nom du matériau	Acier JKS
Module de Young [MPa]	205000
Coefficient de Poisson	0.29
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	7858
Coefficient de dilatation [1/K]	1.20E-005
Limite élastique [MPa]	283
Conductivité thermique [W/(m.K)]	50.0000
Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	450.00
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Annuler"/>	

FIGURE V.2 – Les propriétés du matériau utilisé

## V.6 Pour la pression 6 Bars

### Le Déplacement sur x

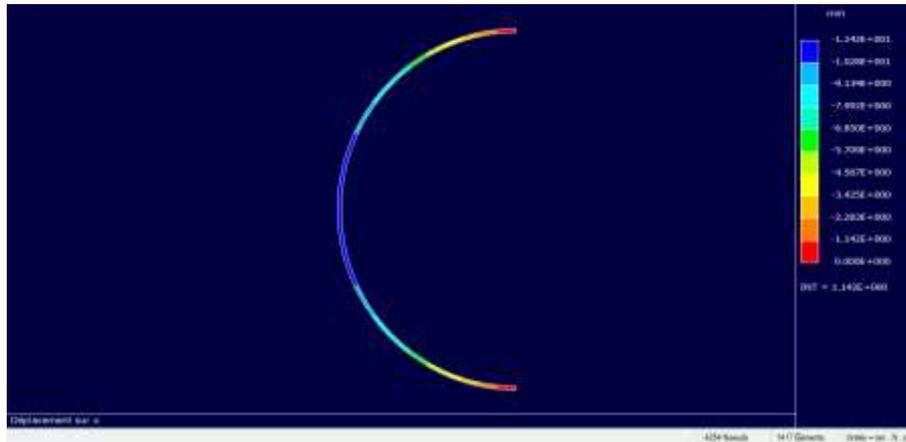


FIGURE V.3 – Le Déplacement sur x

	Min	Max
Le Déplacement sur X [mm]	-1.142e001	0.00e+00

### Le Déplacement sur Y

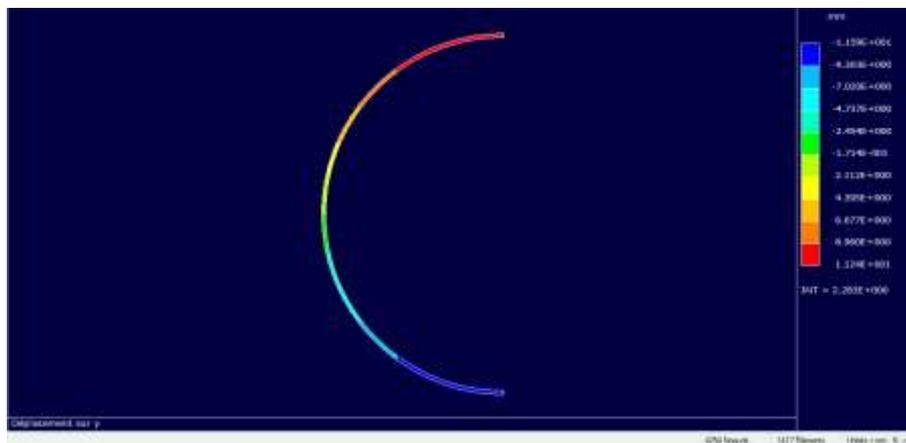


FIGURE V.4 – Le Déplacement sur Y

	Min	Max
Le Déplacement sur Y [mm]	-1.159e001	1.124e001

### Contrainte équivalente de Von Mises

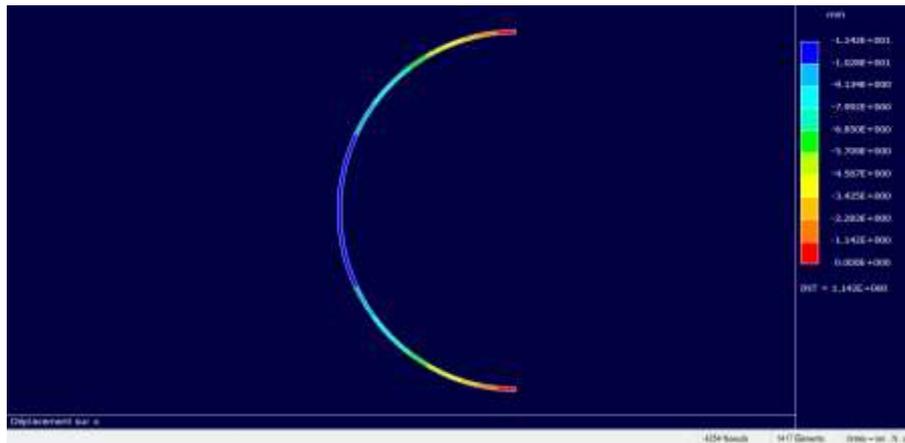


FIGURE V.5 – Contrainte équivalente de Von Mises

	Min	Max
La contrainte Von Mises [MPa]	246.11	247.32

La contrainte est maximale au niveau de la partie inférieure de la paroi de la sphère et elle est inférieure à la limite d'élasticité car la pression imposée est inférieure à la pression de service.

### Les Cercle de mohr des contraintes

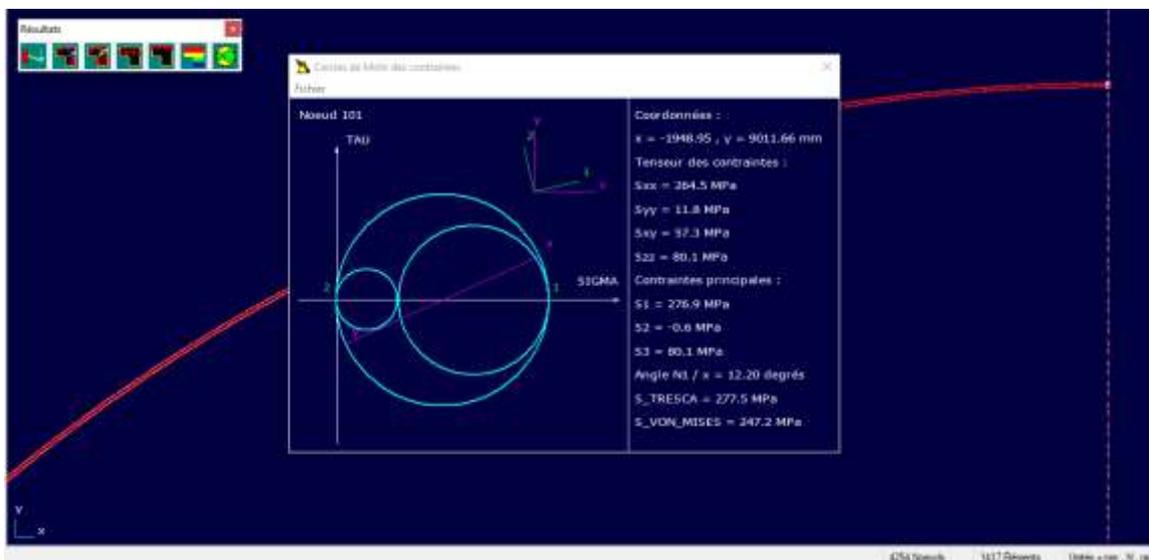


FIGURE V.6 – Les Cercles de mohr des contraintes

## V.7 Pour la pression 7 Bars

### Le Déplacement sur x

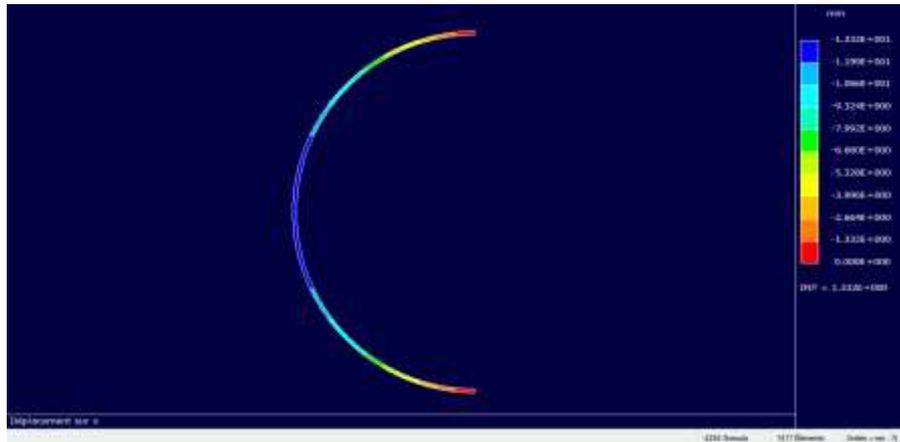


FIGURE V.7 – Le Déplacement sur x

	Min	Max
Le Déplacement sur X [mm]	-1.332e+001	0.00e+00

### Le Déplacement sur Y

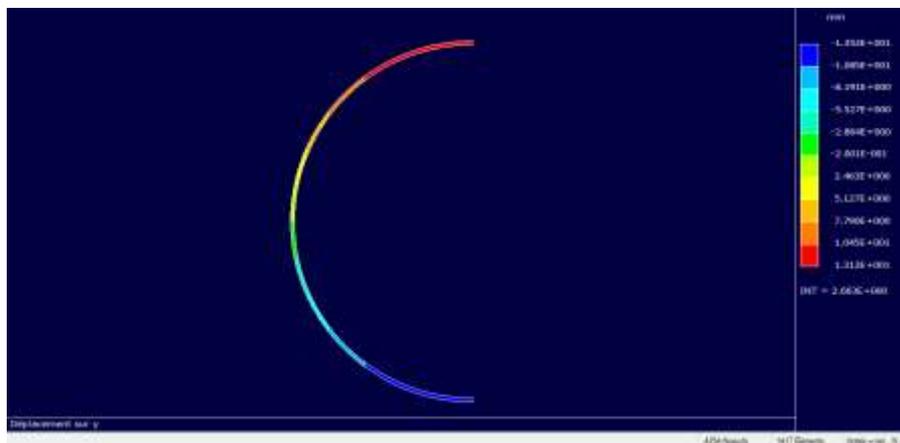


FIGURE V.8 – Le Déplacement sur Y

	Min	Max
Le Déplacement sur Y [mm]	-1.352e+001	1.312e+001

Contrainte équivalente de Von Mises

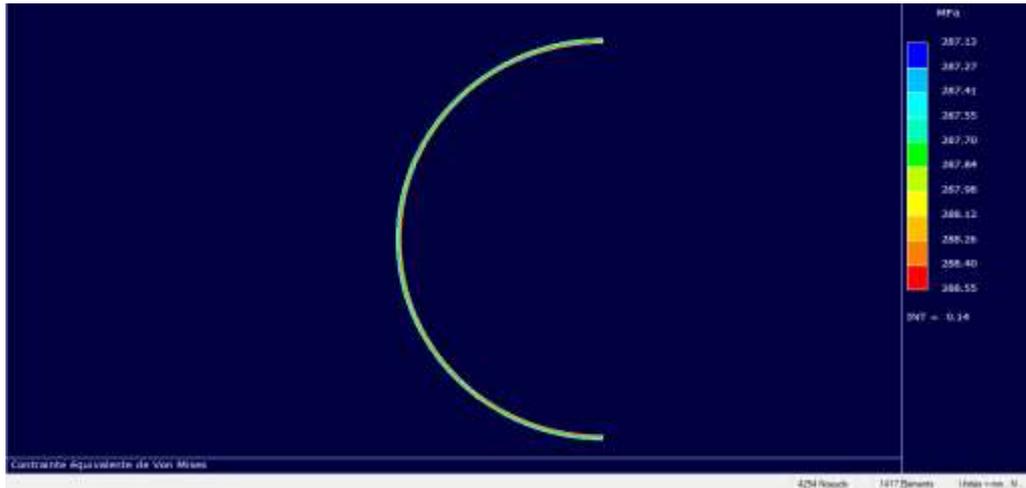


FIGURE V.9 – Contrainte équivalente de von Mises

	Min	Max
La contrainte Von Mises [MPa]	287.13	288.55

La contrainte maximale est beaucoup plus importante avec le premier cas, mais elle reste toujours inférieure à la limite d'élasticité ce qui signifie que la paroi de la sphère résiste à de telles conditions.

Les Cercle de mohr des contraintes

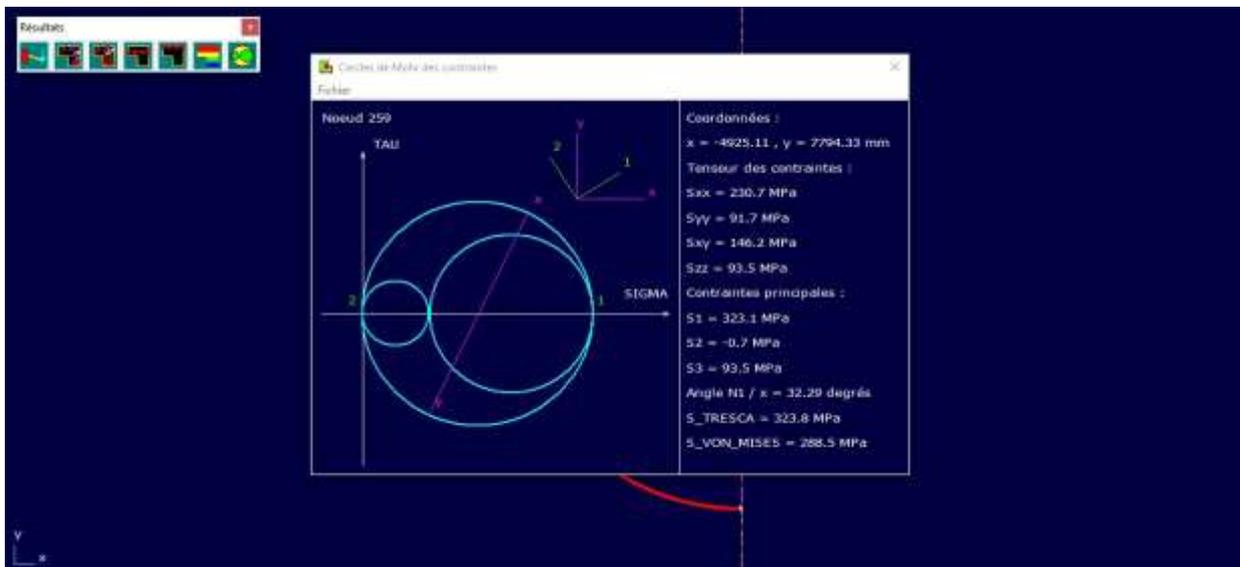


FIGURE V.10 – Les Cercles de mohr des contraintes

## V.8 Pour la pression 8 Bars

### Le Déplacement sur x

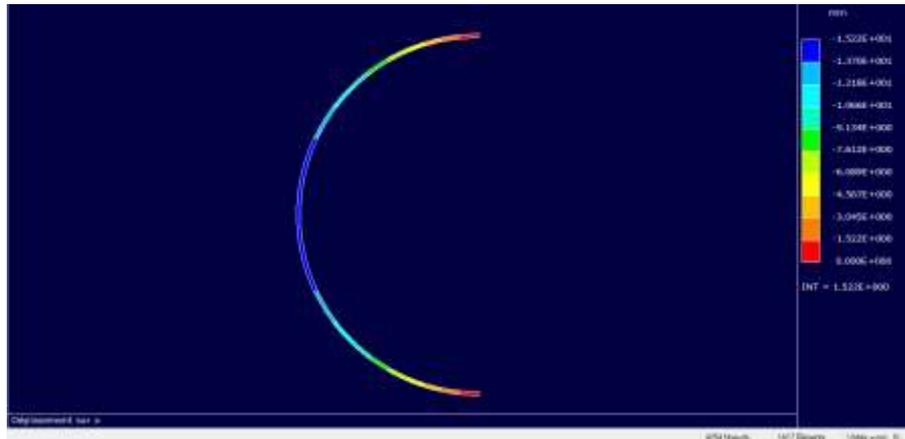


FIGURE V.11 – Le Déplacement sur x

	Min	Max
Le Déplacement sur X [mm]	-1.522e+001	0.00e+00

### Le Déplacement sur Y

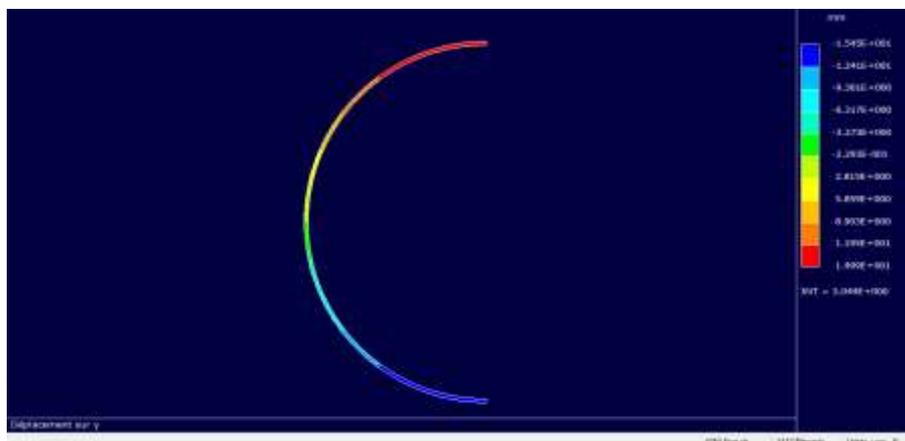


FIGURE V.12 – Le Déplacement sur Y

	Min	Max
Le Déplacement sur Y [mm]	-1.545e+001	1.499e+001

Contrainte équivalente de von Mises

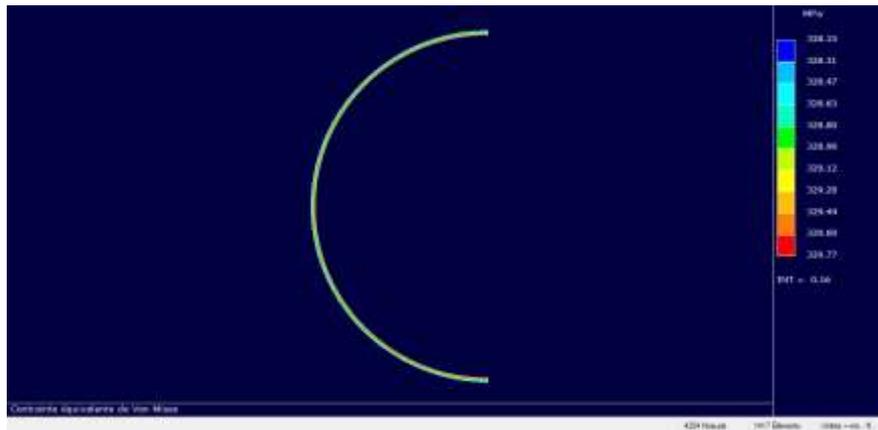


FIGURE V.13 – Contrainte équivalente de von Mises

	Min	Max
La contrainte Von Mises [MPa]	328.15	329.77

la contrainte de Von mises est proche de la limite d'élasticité parce que la pression appliqué est plus proche de la pression de service.

Les Cercle de mohr des contraintes



FIGURE V.14 – Les Cercles de mohr des contraintes

## V.9 Pour la pression 9 Bars

### Le Déplacement sur x

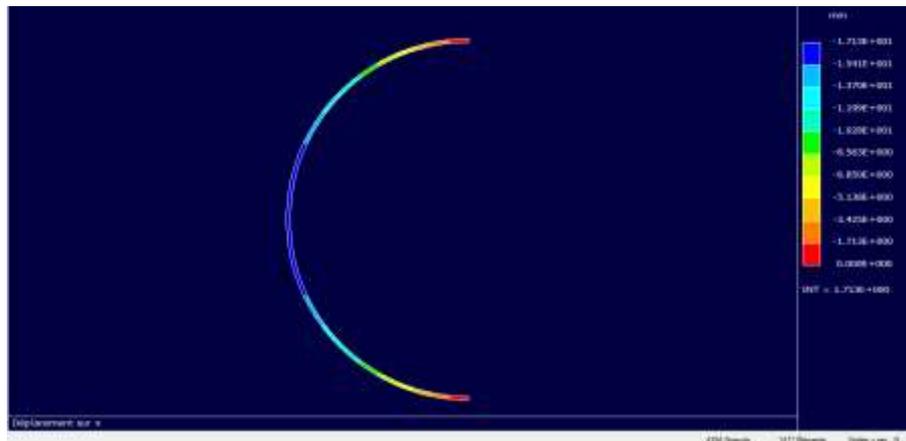


FIGURE V.15 – Le Déplacement sur x

	Min	Max
Le Déplacement sur X [mm]	-1.713e+001	0.00e+00

### Le Déplacement sur Y

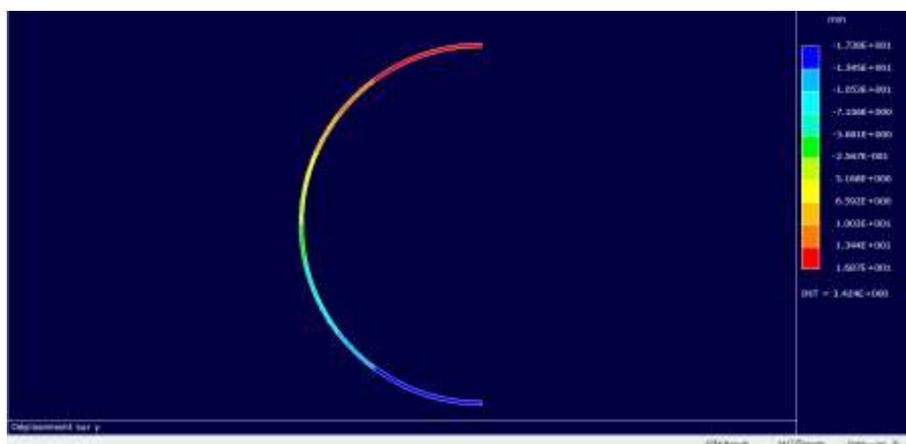


FIGURE V.16 – Le Déplacement sur Y

	Min	Max
Le Déplacement sur Y [mm]	-1.738e+001	1.687e+001

### Contrainte équivalente de Von Mises

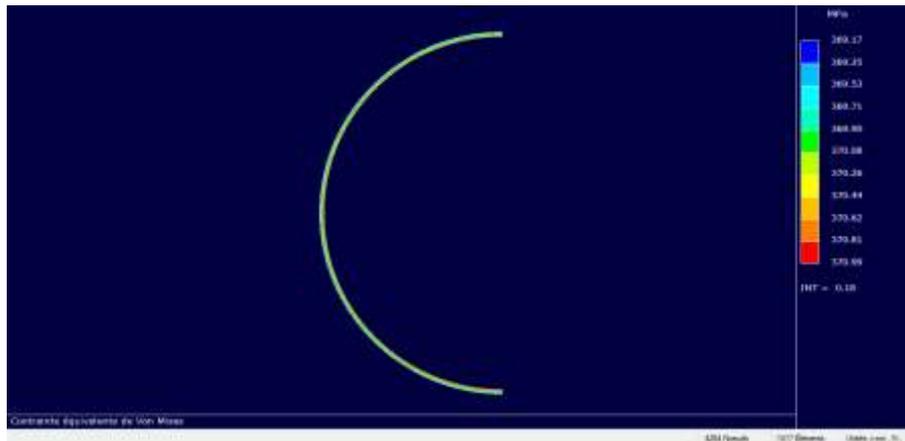


FIGURE V.17 – Contrainte équivalente de Von Mises

	Min	Max
La contrainte Von Mises [MPa]	369.17	370.99

Lorsqu'on a appliqué une pression supérieure de celle de la pression de service on a constaté que La contrainte maximale est supérieure de la limite d'élasticité d'acier. Alors la paroi résiste jusqu'à 8.6 bars.

### Les Cercle de mohr des contraintes

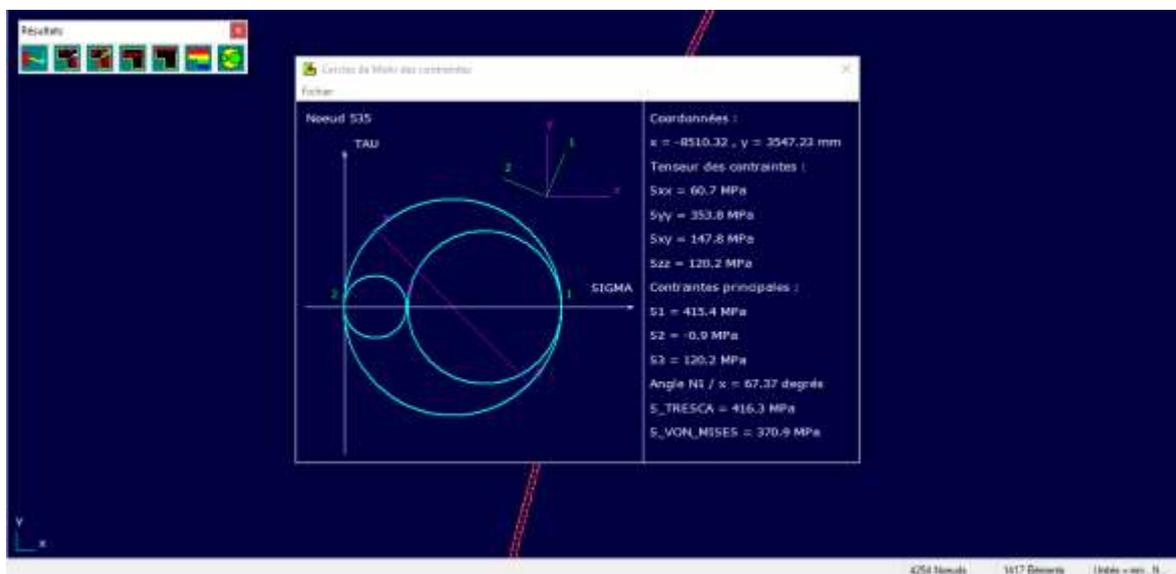


FIGURE V.18 – Les Cercles de mohr des contraintes

**V.10 Pour la pression 10 Bars**

**Le Déplacement sur x**

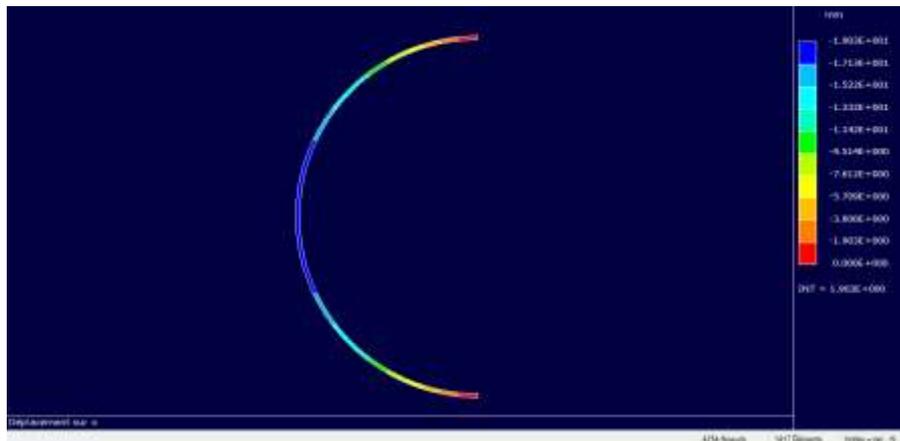


FIGURE V.19 – Le Déplacement sur x

	Min	Max
Le Déplacement sur X [mm]	-1.903e+001	0.00e+00

**Le Déplacement sur Y**

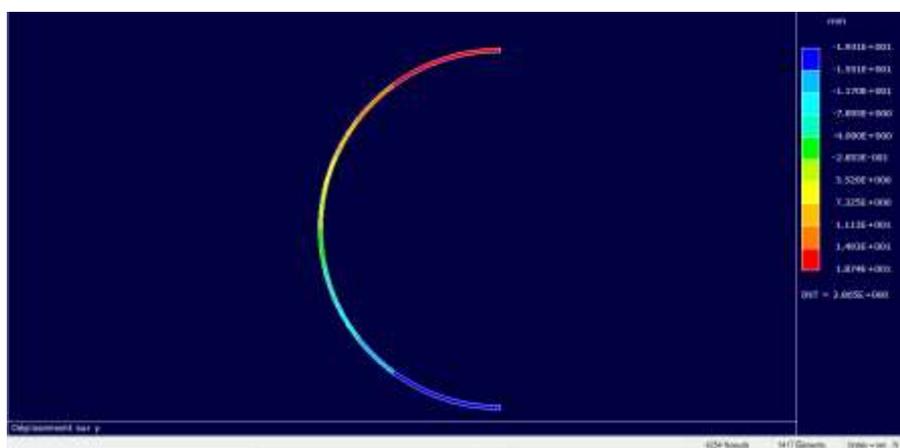


FIGURE V.20 – Le Déplacement sur Y

	Min	Max
Le Déplacement sur Y [mm]	-1.931e+001	1.874e+001

Contrainte équivalente de Von Mises

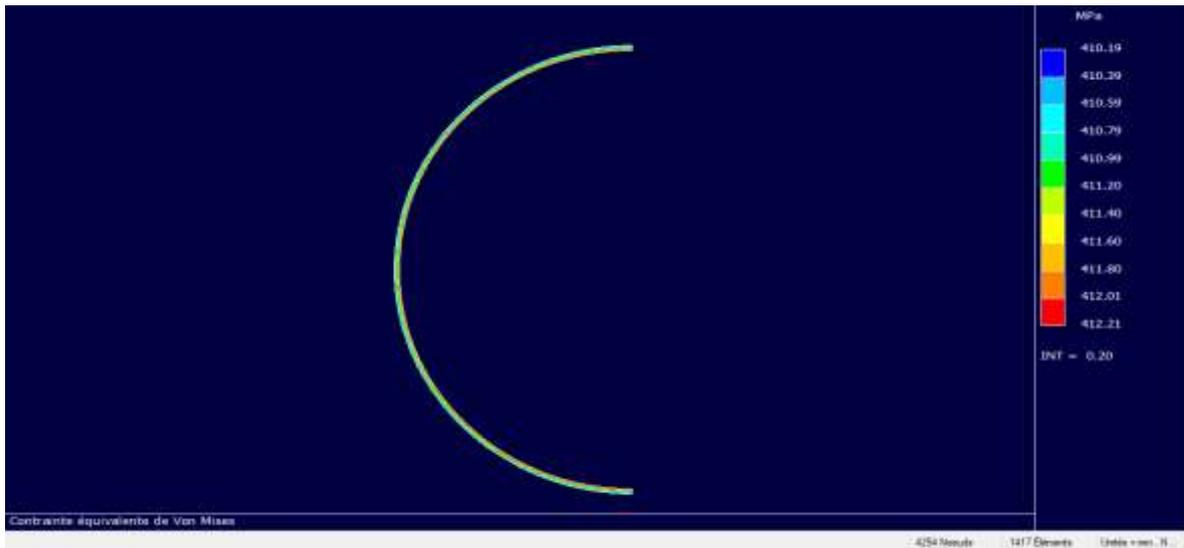


FIGURE V.21 – Contrainte équivalente de von Mises

	Min	Max
La contrainte Von Mises [MPa]	410.19	412.21

La contrainte maximale est plus grande par rapport la limite d'élasticité car la pression est plus importante que la pression de service.

Les Cercle de mohr des contraintes



FIGURE V.22 – Les Cercles de mohr des contraintes

### V.11 L'interprétation générale de déplacement

L'allure générale des déplacements selon x et y est presque la même, mais les valeurs sont différents d'une pression à l'autre.

Le déplacement augmente dans les deux sens x et y par rapport au repère situé au centre de la sphère.

C'est-à-dire positive vers le haut et négative vers le bas sur l'axe y, et négative à gauche et positive à droite sur l'axe x.

Physiquement ceci montre gonflement de la sphère sous l'action de l'augmentation de la pression

### V.12 L'interprétation générale de cercle de mohr

La limite d'élasticité d'acier de construction usuel non allié peut atteindre 355 MPA. Alors dans notre étude on a pris la  $\sigma_e = 355$  MPA.

D'après le cercle de mohr on peut vérifier la résistance du matériau à partir de la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = +\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = \text{critère de tresca}$$

$$\sigma_{eqv} = \sigma_e \text{ plastification}$$

#### Pour la pression 6 bars

A partir le cercle de mohr on a obtenu les résultats suivantes :

$$\sigma_1 = 276.9 \text{ MPA}$$

$$\sigma_3 = -0.6 \text{ MPA} \quad \text{Et la contrainte de Von mises } \sigma_v = 247.2 \text{ MPA}$$

$$\sigma_2 = 80.1 \text{ MPA}$$

Alors maintenant on calcule la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = 276.9 + 0.6 = 277.5 \text{ MPA}$$

D'après la contrainte de plastification on constate que  $\sigma_{eqv} < \sigma_e$  et  $\sigma_v < \sigma_e$

Alors la résistance de la sphère est vérifiée selon la contrainte équivalente ou tresca et selon Von mises.

#### Pour la pression 7 bars

A partir le cercle de mohr on a obtenu les résultats suivantes :

$$\sigma_1 = 323.1 \text{ MPA}$$

$$\sigma_3 = -0.7 \text{ MPA} \quad \text{Et la contrainte de Von mises } \sigma_v = 288.5 \text{ MPA}$$

$$\sigma_2 = 93.5 \text{ MPA}$$

Puis on calcule la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = 323.1 + 0.7 = 323.8 \text{ MPA}$$

D'après la contrainte de plastification on constate que  $\sigma_{eqv} < \sigma_e$  et  $\sigma_v < \sigma_e$

Alors la résistance de la sphère est vérifiée selon la contrainte équivalente ou tresca et selon Von mises.

#### Pour la pression 8 bars

A partir le cercle de mohr on a obtenu les résultats suivantes :

$$\sigma_1 = 369.2 \text{ MPA}$$

$$\sigma_3 = -0.8 \text{ MPA} \quad \text{Et la contrainte de Von mises } \sigma_v = 329.6 \text{ MPA}$$

$$\sigma_2 = 106.8 \text{ MPA}$$

Alors maintenant on peut calculer facilement la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = 369.2 + 0.8 = 370 \text{ MPA}$$

D'après la contrainte de plastification on constate que  $\sigma_{eqv} > \sigma_e$  et  $\sigma_v < \sigma_e$

Alors la résistance de la sphère est vérifiée selon Von mises et n'est pas vérifiée selon la contrainte équivalente ou Tresca.

### **Pour la pression 9 bars**

A partir du cercle de Mohr on a obtenu les résultats suivants :

$$\sigma_1 = 415.4 \text{ MPA}$$

$$\sigma_3 = -0.9 \text{ MPA} \quad \text{Et la contrainte de Von mises } \sigma_v = 370.9 \text{ MPA}$$

$$\sigma_2 = 120.2 \text{ MPA}$$

On calcule la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = 415.4 + 0.9 = 416.3 \text{ MPA}$$

D'après la contrainte de plastification on constate que  $\sigma_{eqv} > \sigma_e$  et  $\sigma_v > \sigma_e$

Alors la résistance de la sphère n'est pas vérifiée selon Von mises et selon la contrainte équivalente ou Tresca pour la pression égale 9 bars.

### **Pour la pression 10 bars**

A partir du cercle de Mohr on a obtenu les résultats suivants :

$$\sigma_1 = 461.5 \text{ MPA}$$

$$\sigma_3 = -1 \text{ MPA} \quad \text{Et la contrainte de Von mises } \sigma_v = 412.1 \text{ MPA}$$

$$\sigma_2 = 133.6 \text{ MPA}$$

Alors maintenant on peut calculer facilement la contrainte équivalente.

$$\sigma_{eqv} = \sigma_1 - \sigma_3 = 461.5 + 1 = 462.5 \text{ MPA}$$

D'après la contrainte de plastification on constate que  $\sigma_{eqv} > \sigma_e$  et  $\sigma_v > \sigma_e$

Alors la résistance de la sphère n'est pas vérifiée selon Von mises et selon la contrainte équivalente ou Tresca pour la pression 9 bars et 10 bars.

## **Chapitre VI**

# **Simulation numérique diphasique du GPL au niveau de la sphère**

## **VI.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons simuler l'écoulement et la thermodynamique du fluide vaporisé dans la sphère de stockage de GPL T410 en implémentant la géométrie de la section verticale 2D et en simulant les paramètres physiques à travers le module Ansys Fluent bien connu en mécanique des fluides.

## **VI.2 La conception assistée par ordinateur**

La conception assistée par ordinateur ou CAO comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

On confond souvent CAO et DAO (dessin assisté par ordinateur) : la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

## **VI.3 Spaceclaim**

ANSYS Spaceclaim est la solution de modélisation parfaite pour les ingénieurs qui souhaitent accéder à des réponses 3D mais n'ont pas le temps ou l'envie d'apprendre les systèmes de CAO traditionnels complexes. Il vous fournit des outils pour accélérer la préparation de la géométrie et passer à la simulation plus tôt tout en éliminant les retards entre les équipes de conception.

## **VI.4 ANSYS fluent**

Le logiciel Ansys FLUENT contient les vastes capacités de modélisation physique nécessaires pour modéliser le flux, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions pour des applications industrielles allant du flux d'air sur une aile d'avion à la combustion dans un four, des colonnes à bulles aux plateformes pétrolières, du flux sanguin au semi-conducteur fabrication, et de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Des modèles spéciaux qui donnent au logiciel la capacité de modéliser la combustion dans les cylindres, l'aéroacoustique, les turbomachines et les systèmes multiphasiques ont permis d'élargir sa portée.

Aujourd'hui, des milliers d'entreprises à travers le monde bénéficient de l'utilisation du logiciel Ansys FLUENT dans le cadre de leurs phases de conception et d'optimisation de développement de produits. La technologie de solveur avancée fournit des résultats CFD rapides et précis, des maillages mobiles et déformants flexibles et une évolutivité parallèle supérieure. Les fonctions définies par l'utilisateur permettent la mise en œuvre de nouveaux modèles d'utilisateurs et la personnalisation poussée des modèles existants. La configuration, la solution et le post-traitement du solveur interactif d'Ansys FLUENT facilitent la mise en pause d'un calcul, l'examen des résultats avec le post-traitement intégré, la modification de n'importe quel paramètre puis la poursuite du calcul dans une seule application. Les fichiers de cae et de données peuvent également être lus dans Ansys CFD-Post pour une analyse plus approfondie avec des outils de post-traitement avancés et pour comparer les résultats de différents cas côte à côte.

L'intégration d'Ansys FLUENT dans Ansys Workbench offre aux utilisateurs des connexions bidirectionnelles supérieures à tous les principaux systèmes de CAO, une modification et une création de géométrie puissantes avec Ansys Design Modeller et des technologies de maillage avancées dans Ansys Meshing. Il permet le transfert facile par glisser-déposer des données et des résultats à partager entre les applications (par exemple, pour utiliser une solution d'écoulement de fluide dans la définition d'une charge aux limites d'une simulation de mécanique structurelle ultérieure). Combinez ces avantages avec la vaste gamme de capacités de modélisation physique et les résultats CFD rapides et précis que le logiciel Ansys FLUENT a à offrir et vous disposez de l'un des logiciels les plus complets pour la modélisation CFD disponibles dans le monde aujourd'hui.

## **VI.5 Partie simulation**

### **VI.5.1 Propriétés du fluide**

Le fluide en mouvement à l'intérieur de la cavité est le butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), dont les caractéristiques sont prises en compte par Fluent.

### **VI.5.2 Conditions extérieures**

La pression ambiante est prise égale à la pression atmosphérique, ce qui correspond à 101325 Pa. Il est également nécessaire de spécifier à Fluent que le calcul doit tenir compte de la gravité, et de l'orienter par rapport au repère dans lequel a été créé le maillage. Dans le cas présent, l'accélération de la pesanteur est fixée à  $-9.81 \text{ m.s}^{-1}$  sur l'axe des Y.

### **VI.5.3 Conditions aux limites**

Etant donné que le phénomène étudié (la convection naturelle dans la phase vapeur) est un volume limité par une cavité sphérique. On a imposé :

- Sur le mur de la sphère l'extérieur une condition d'échange convectif ( $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) et avec l'ambiance (T égale à 310K) est imposée.
- température de liquide (T égale à 298.05K).

## **VI.6 Configuration de l'étude**

### **VI.6.1 Configuration du maillage**

Tout d'abord, nous utilisons le solveur Fluent pour sélectionner l'étude de mécanique des fluides. Dans l'onglet Géométrie, nous insérons notre géométrie, puis nous utilisons l'outil de maillage pour mailler. Nous suivons les instructions en annexe pour configurer les paramètres de maillage pour changer Mince et guidé par la courbure. On obtient alors les statistiques suivantes :

Nœuds	29169
Éléments	28792

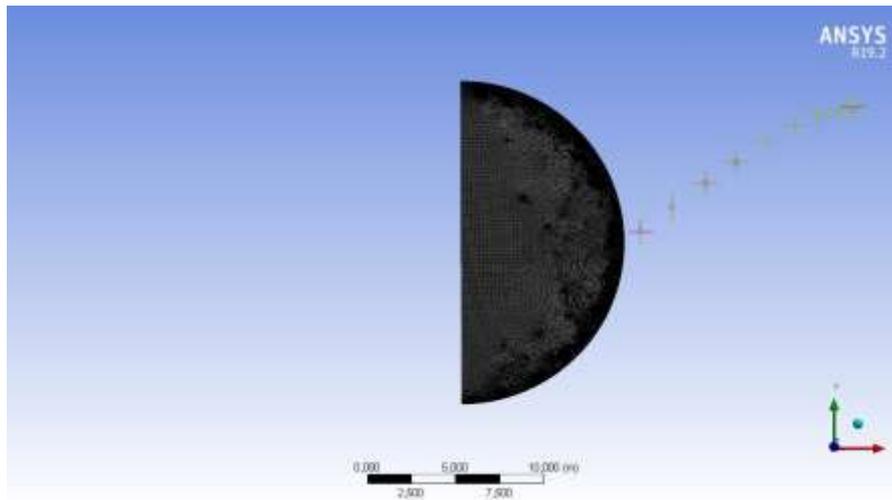


FIGURE VI.1 – Le maillage de la sphère

### VI.6.2 Configuration du solveur

Dans cette partie, nous allons introduire les paramètres requis par le solveur. Tout d’abord, nous choisissons le mécanisme transitoire, qui simule l’évolution de divers paramètres au cours du temps, puis nous vérifions la case gravité pour introduire la gravité sur l’écoulement et le fluide, et le solveur sera basé sur la différence de pression, comme indiqué ci-dessous sur la figure :



FIGURE VI.2 – Configuration du solveur

### VI.6.3 Configuration du modèle multiphasique

Au début, nous avons activé le mode multiphase pour pouvoir simuler les deux phases du butane (Liquide et Vapeur) en sélectionnant le modèle VOF (Volume of Fluid) utilisé pour générer Deux ou plusieurs fluides non miscibles, où l’interface entre eux est intéressante.

Par conséquent, nous cochons la case sur la force entre les objets (Implicit Body Force) à prendre en compte. Considérez les forces causées par la gravité et la tension de surface.

La différence entre le mode explicite et implicite est que la fonction explicite est basée sur Calculer à partir des paramètres reçus à l'étape précédente, en revanche, dans la fonction Les paramètres implicites dépendent les uns des autres dans la même étape de calcul, donc toujours la solution est plus compliquée, mais elle converge bien dans le processus de calcul. C'est pour C'est pourquoi nous avons choisi cette méthode pour résoudre les équations considérées.

Le nombre des phases Eulériennes sera configuré sur deux phases. Le

modèle de l'interface contient trois options :

- Sharp : quand une interface distincte est présente entre les phases.
- Dispersed : lorsque les phases sont interpénétrées ou mélangées.
- Sharp/Dispersed : une approche hybride pour des écoulements composés des deux fonctions.

Pour cette étude, le modèle Sharp sera utilisé car l'interface entre les deux phases liquide- vapeur sera considérée distincte.



FIGURE VI.3 – Le modèle multiphasique

#### VI.6.4 Configuration de l'équation d'énergie

Afin de prendre en compte le transfert d'énergie dû à la conduction, à la diffusion de matière et à la dissipation visqueuse, y compris la chaleur de réaction chimique et toute autre source de chaleur volumétrique, le mode d'équation d'énergie doit être activé.

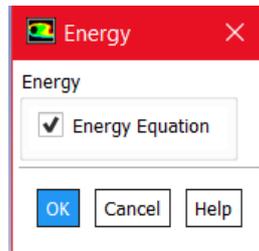


FIGURE VI.4 – Configuration de l'équation d'énergie

### VI.6.5 Configuration des caractéristiques de l'écoulement

Le choix des paramètres de l'écoulement est très important pour aboutir à des résultats significatifs ce qui nécessite une bonne configuration du modèle de turbulence.

Fluent propose plusieurs modèles pour les écoulements monophasiques par contre pour ceux multiphasiques, il fournit le modèle  $k-\epsilon$ , de plus, il propose deux options additionnelles dans le modèle Reynolds Stress Models RSM.

Pour le cas étudié, on utilise Realizable  $k-\epsilon$  et dans les paramètres de traitement auprès des parois (Near All Treatment) on choisit le traitement des parois amélioré (Enhanced Wall Treatment) pour améliorer le traitement de la turbulence auprès des parois des tubes et on coche les options concernant les effets thermiques et les effets de gradient de la pression pour les prendre en considération lors du calcul.



FIGURE VI.5 – modèle de viscosité

### VI.6.6 Configuration des matériaux

Dans l'onglet Matériaux (Materials), on sélectionne le n-butane dans la partie fluide et Acier en carbone (steel) dans la partie solide.

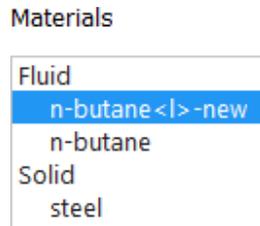


FIGURE VI.6 – Configuration des matériaux

### VI.6.7 Configuration des deux phases

Dans la barre des tâches, on accède aux paramètres physiques (Setting up physics) puis aux phases (Phases), dans la fenêtre, on introduit le butane vapeur comme phase primaire (primary phase) et le butane liquide comme phase secondaire (secondary phase).

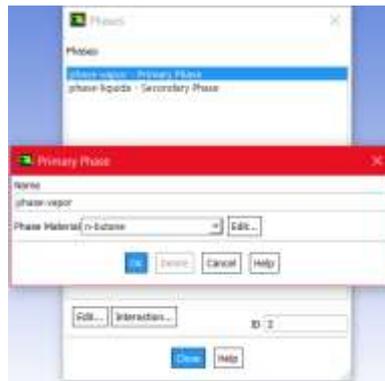


FIGURE VI.7 – Configuration des deux phases

Puis on clique sur le bouton Interaction.

Côté masse, on met le nombre de transfert de matière sur 1 et on choisit le mécanisme d'évaporation-condensation de la phase 2 à la phase 1.

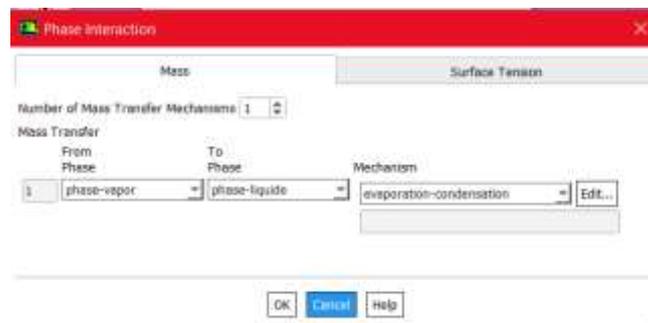


FIGURE VI.8 – La phase d'interaction

### VI.6.8 Configuration de la méthode de solution

On met les paramètres sur Second Order Upwind pour une précision de second ordre des calculs.



FIGURE VI.9 – la méthode de solution

### VI.6.9 Configuration des conditions initiales

On supposera qu'initialement la sphère est totalement remplie de liquide à l'état statique, soumis à des conditions ambiantes de température et de pression.

Les valeurs de  $k$  et de  $\varepsilon$  seront prises par défaut égales à 1.

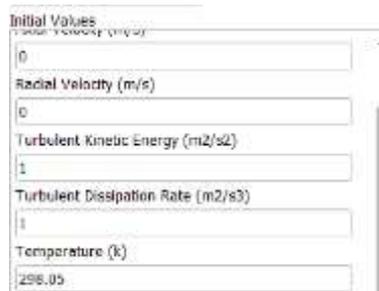


FIGURE VI.10 – Les conditions initiales

## VI.7 Les résultats de la simulation

### VI.7.1 Pour une heure

#### a) La pression statique par rapport la position Y

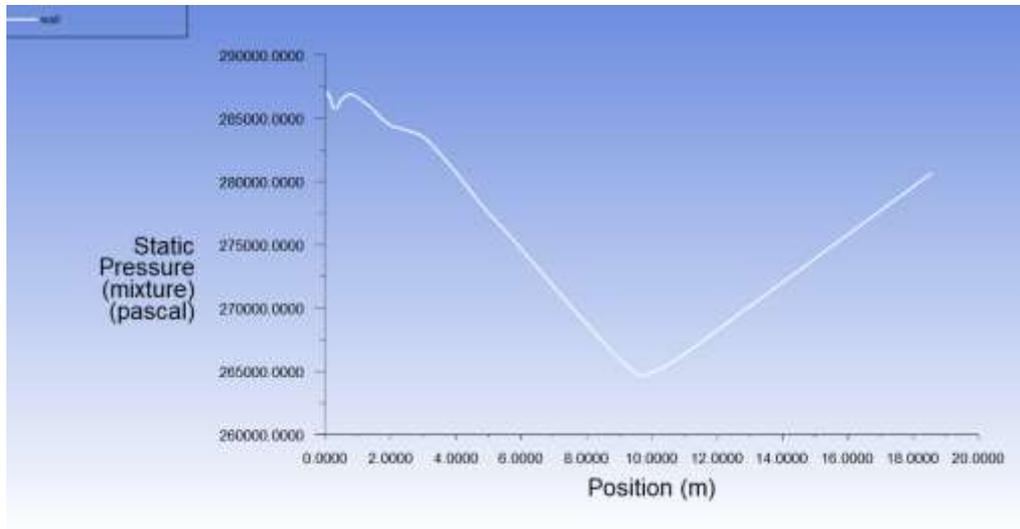


FIGURE VI.11 – La pression statique P en fonction de la position Y

#### b) La pression statique

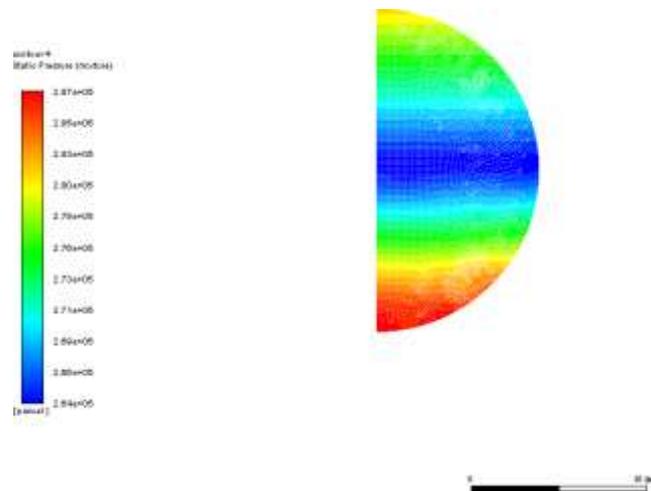


FIGURE VI.12 – La pression statique

	Min	Max
La pression statique [Pascal]	2.64e+05	2.87e+05

Sur la figure (VI.11) on représente la variation de la pression statique qui diminue progressivement du fond vers la surface libre ou  $p = 265000$  pascals ensuite commence à augmenter dans la phase vapeur vers le sommet de la sphère.

**c) La Température statique**

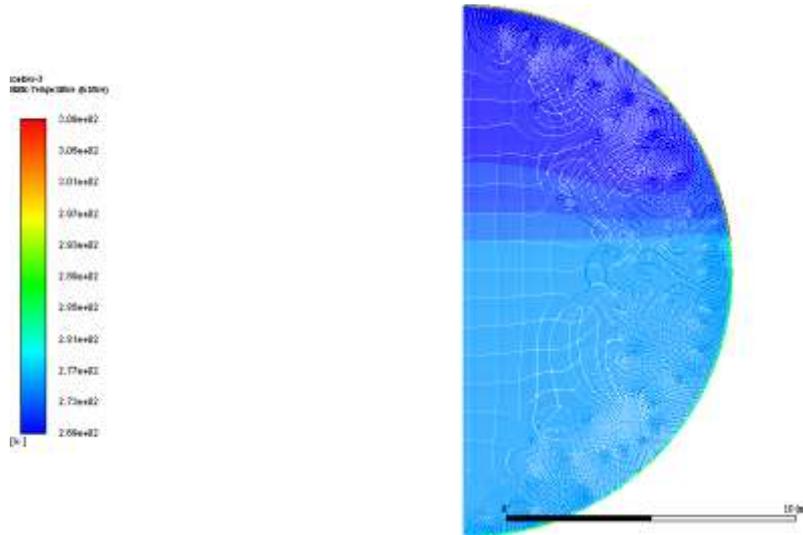


FIGURE VI.13 – La Température statique

	Min	Max
La Température statique [K]	2.69e+02	3.09e+02

Sur la figure (VI.13), nous représentons le champ de temps dans la phase liquide où les valeurs varient de 269K à 283K alors que dans la phase vapeur T augmente jusqu'à 309K. Cette augmentation est due au chauffage thermique à travers le mur de la sphère

**d) La fonction de courant**

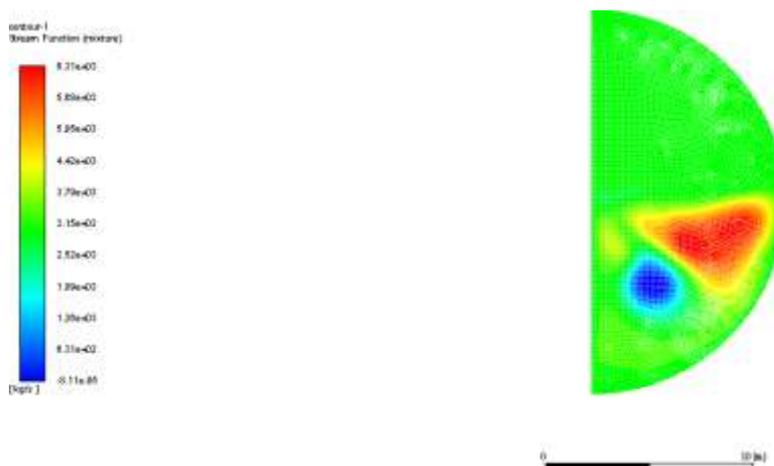


FIGURE VI.14 – La fonction de courant

	Min	Max
La fonction de courant [Kg\S]	-8.11e-05	6.31e+03

**e) La température du mur par rapport la position**

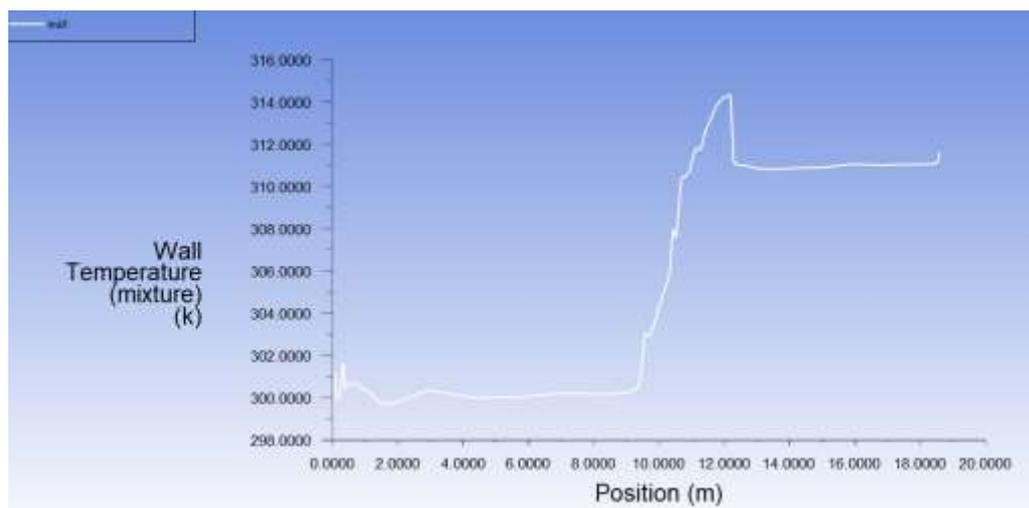


FIGURE VI.15 – la température du mur par rapport la position

Sur la figure (VI.15) on représente le profil de la température ou long de la paroi, où un maximum 314K atteint à  $y=12m$  puis une chute jusqu'à environ 310K pour  $y > 12m$ .

**f) Le vecteur vitesse**

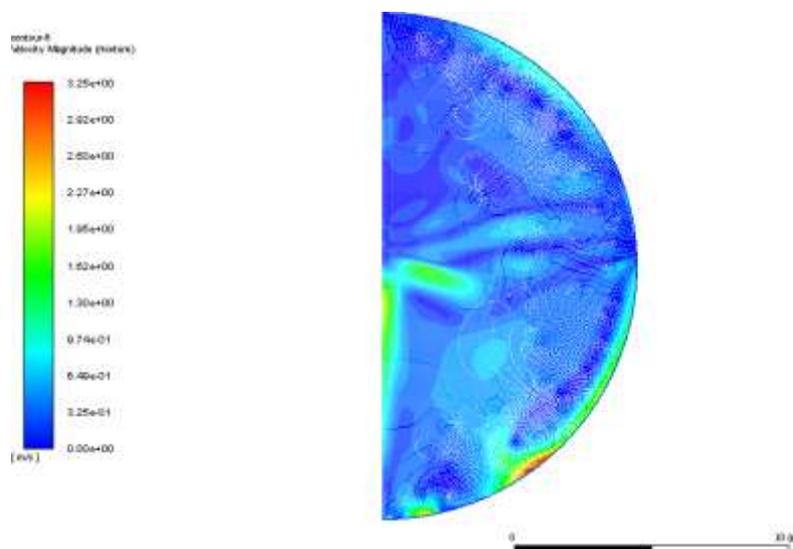


FIGURE VI.16 – Le vecteur vitesse

	Min	Max
Le vecteur vitesse [m\s]	0.00e+00	3.25e+00

Le champ de vitesse atteint une valeur maximale de 3.25m/s suite au phénomène de convection naturelle.

**g) La viscosité turbulente**

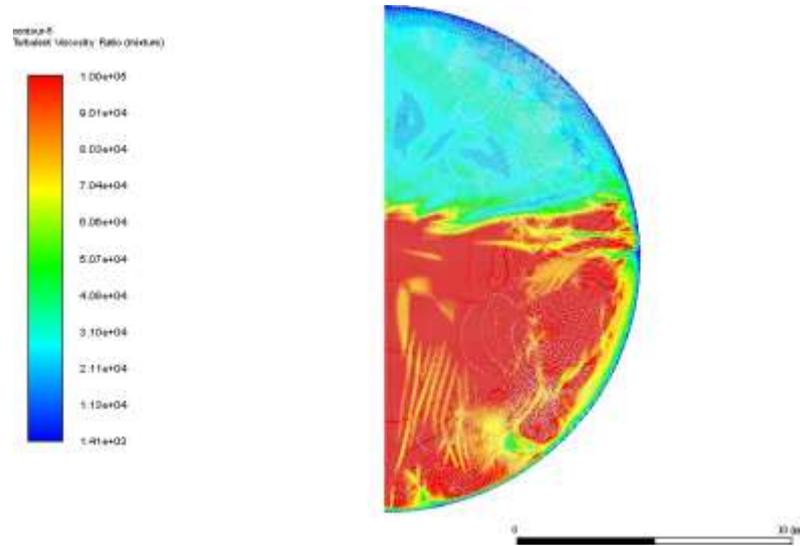


FIGURE VI.17 – La viscosité turbulente

	Min	Max
La viscosité turbulente	1.41e003	1.00e005

**h) La fraction volumique**

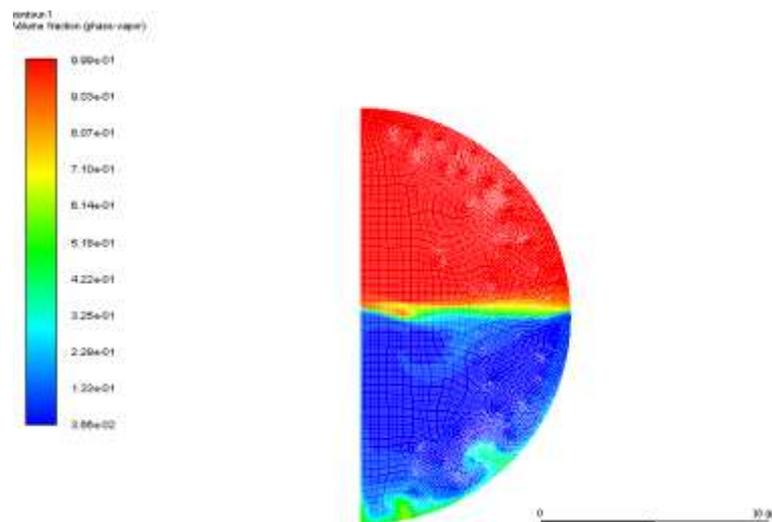


FIGURE VI.18 – La fraction volumique

	Min	Max
La fraction volumique	3.66e-02	9.99e-01

**VI.7.2 Pour trois heures**

**a) La pression statique par rapport la position Y**

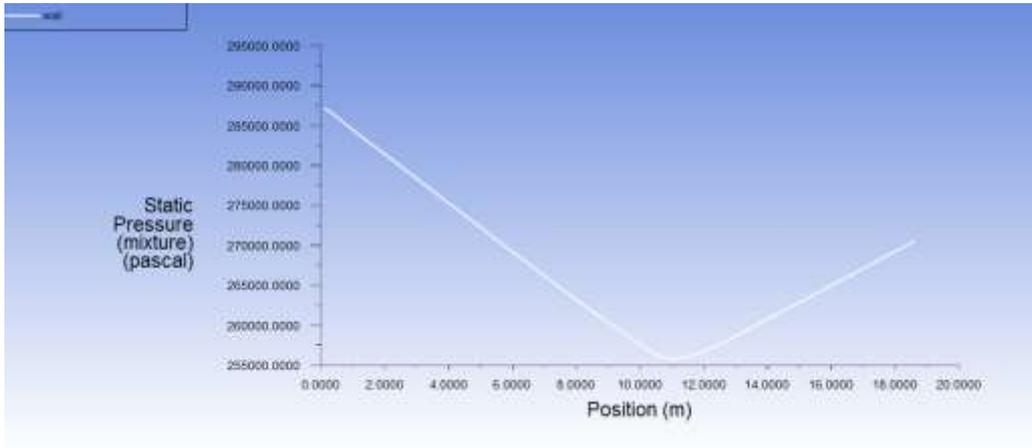


FIGURE VI.19 – La pression statique P en fonction de la position Y

Sur la figure (VI.19) la pression statique varie de la même façon que pour 1h de temps mais la valeur minimale est de 255000 Pa au niveau de la surface libre et pression se minimise au niveau de la phase vapeur où le maximum est au sommet = à 270000 Pa au lieu de 280000 Pa pour 1heure de temps.

**b) La pression statique**

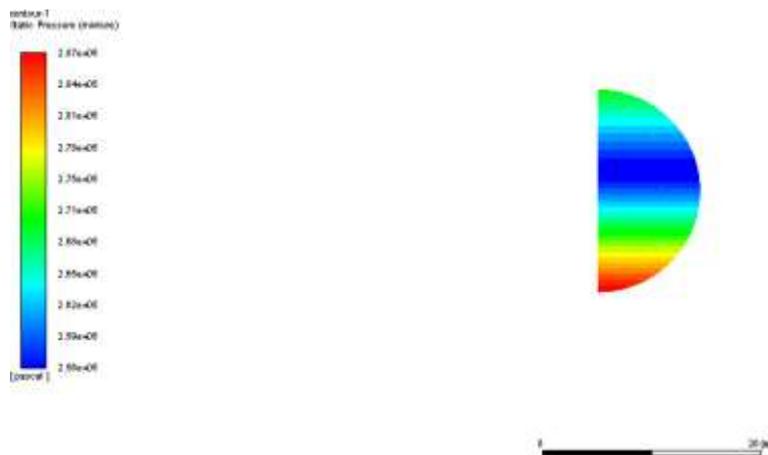


FIGURE VI.20 – La pression statique

	Min	Max
La pression statique [Pascal]	2.56e+05	2.87e+05

**c) La Température statique**



FIGURE VI.21 – La Température statique

	Min	Max
La Température statique [K]	2.72e+02	3.10e+02

Sur la figure (VI21), le champ de température enregistrer des valeurs plus élevées au cours du temps et variant entre 272K et 285K dans la phase liquide alors que le profil de température du mur de la sphère, par rapport à celui d'une 1h de temps. Et on enregistre une valeur max à  $y=13m$  puis le temps chute jusqu'à 310K à  $y > 14m$ .

**d) La fonction de courant**



FIGURE VI.22 – La fonction de courant

	Min	Max
La fonction de courant [Kg\S]	1.24e-05	7.10e+02

**e) La température du mur par rapport la position**

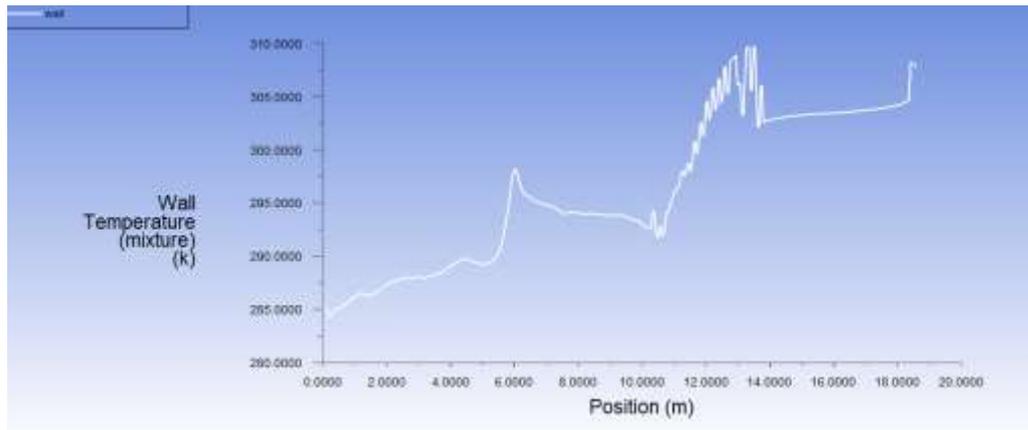


FIGURE VI.23 – la température du mur par rapport la position

**f) Le vecteur vitesse**



FIGURE VI.24 – Le vecteur vitesse

	Min	Max
Le vecteur vitesse [m\s]	0.00e+00	5.92e-00

Le champ de vitesse est de plus en plus important avec l'augmentation du temps jusqu'à  $V_{max} = 5.92\text{m/s}$ . vu que le chauffage est plus important sur la figure (VI24).

**g) La viscosité turbulente**

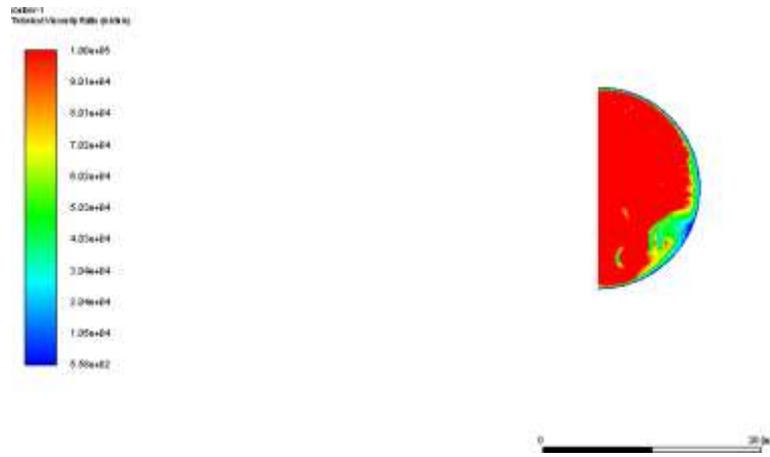


FIGURE VI.25 – La viscosité turbulente

	Min	Max
La viscosité turbulente	5.58e002	1.00e005

**h) La fraction volumique**

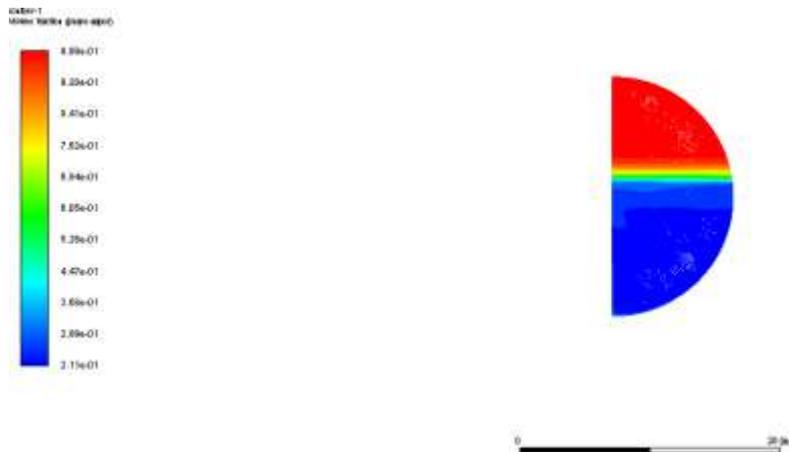


FIGURE VI.26 – La fraction volumique

	Min	Max
La fraction volumique	2.11e-01	9.99e-01

**VI.7.3 Pour cinq heures**

**a) La pression statique par rapport la position Y**

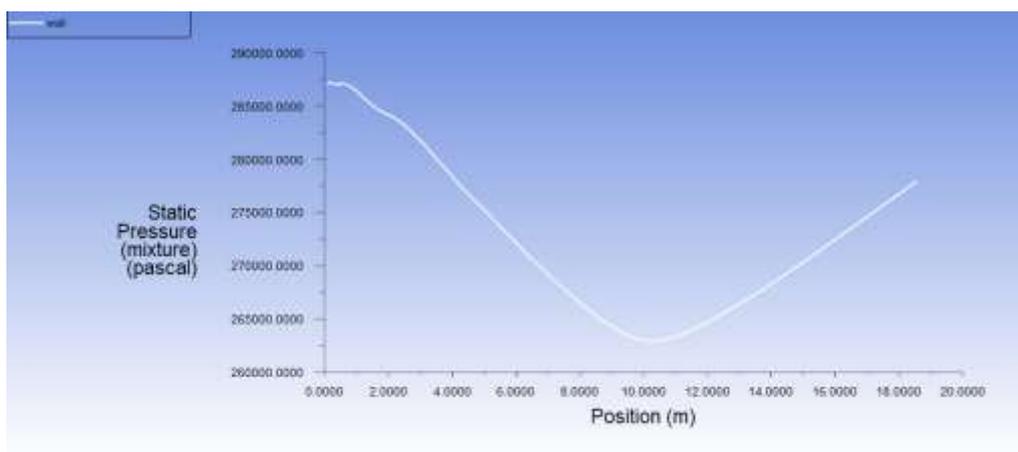


FIGURE VI.27 – La pression statique P en fonction de la position Y

**b) La pression statique**



FIGURE VI.28 – La pression statique

	Min	Max
La pression statique [Pascal]	2.63e+05	2.87e+05

**c) La Température statique**



FIGURE VI.29 – La Température statique

	Min	Max
La Température statique [K]	2.73e+02	3.31e+02

**d) La fonction de courant**



FIGURE VI.30 – La fonction de courant

	Min	Max
La fonction de courant [Kg\S]	-2.641e-05	1.50e+03

**e) La température du mur par rapport la position**

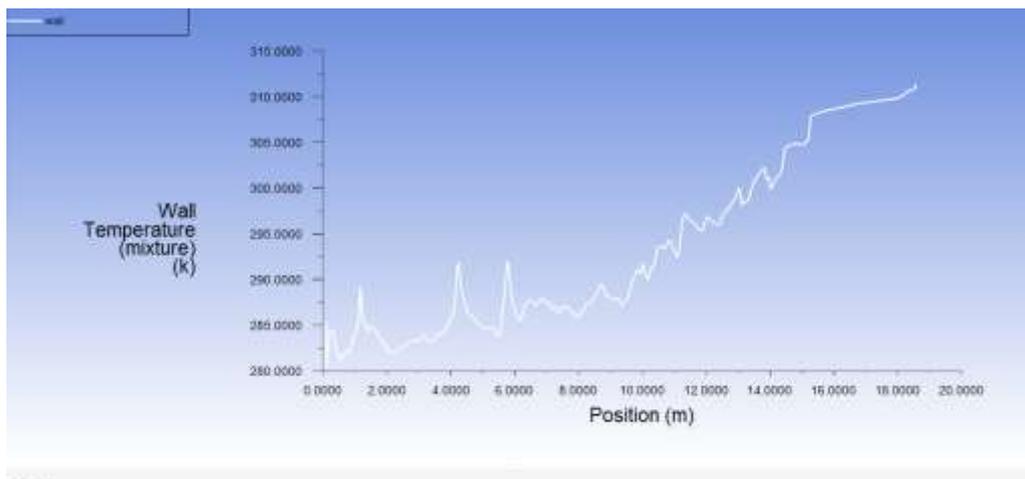


FIGURE VI.31 – la température du mur par rapport la position

**f) Le vecteur vitesse**

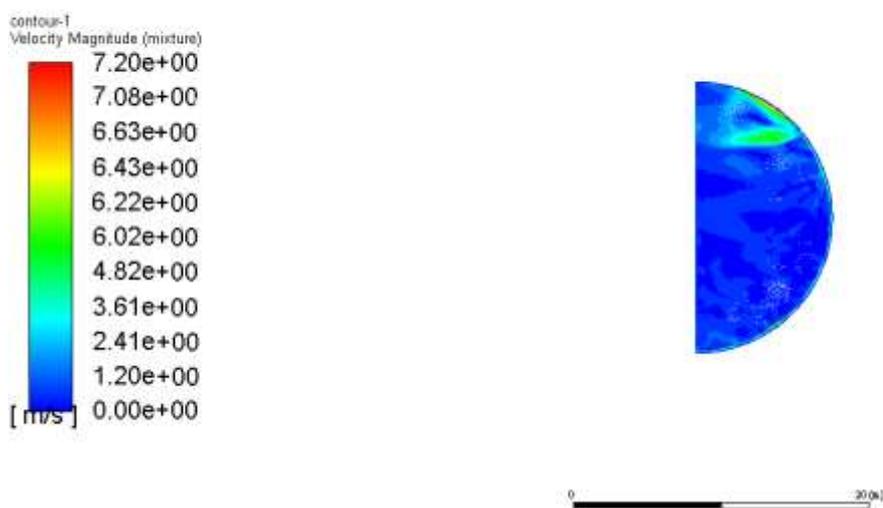


FIGURE VI.32 – Le vecteur vitesse

	Min	Max
Le vecteur vitesse [m\s]	0.00e+00	7.20e+00

**g) La viscosité turbulente**



FIGURE VI.33 – La viscosité turbulente

	Min	Max
La viscosité turbulente	1.05e003	1.00e005

**h) La fraction volumique**



FIGURE VI.34 – La fraction volumique

	Min	Max
La fraction volumique	0.00e+00	9.99e-01

Nous remarquons que le profil de température de la paroi augmente progressivement de la base vers le sommet (VI31) entre 280 – 310k. Alors que les températures au niveau de la phase vapeur sont plus élevées et atteigne 331K au niveau de l’axe alors que les vitesses sont augments  $V_{max} = (7.2m/s)$  de la sphère.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Dans cette recherche, nous essayons de simuler la convection naturelle de la phase Vapeur à l'intérieur de la sphère, notamment la détermination du profil de température Le long de la paroi intérieure de la sphère.

On a étudié le comportement mécanique de la sphère avec le module de simulation étude statique, on a utilisé le programme RDM6- éléments finis qui très réputé par l'étude mécanique. Qui nous permet de voir les déplacements sur X et Y et les différents contraintes (contraintes Von mises et tresca) avec un cercle de mohr qui généralisée toutes les contraintes principales, Von mises, tresca, des déplacements et même la direction de rupture probable.

Alors dans cette étude on a trouvé que les contraintes Von mises et tresca sont inférieure a la contrainte admissible où la limite d'élasticité à pression 6, 7 et 8 bar alors on dit que les pressions Sont acceptable et la résistance est vérifié selon tresca et Von mises sauf à la pression de 8 bar la valeur de tresca est faiblement supérieur à la limite d'élasticité mais par contre à la pression 9 et 10 bar n'est pas vérifier ni selon tresca parce que on a obtenu des valeurs plus importantes à celles des pressions 6, 7 et 8 la contrainte est supérieur de la limite élastique.

Sachant que la pression de service de la sphère T410 et égale 8.6 bar on a obtenu cette valeur d'après la plaque signalétique de la sphère alors on dit que la pression de service est confirmée par l'étude mécanique et la sphère T410 elle support uniquement les pressions inférieure de 8.6bar.

L'étude du logiciel fluide ANSYS sur la sphère T410 rend la visualisation possible Analyse de l'écoulement des fluides et de la thermodynamique dans le processus de changement diphasique différents paramètres (fraction de vapeur générée, température, pression, viscosité, Vitesse...etc.) et ses changements.

La partie recherche est Phase gazeuse, mais un modèle multiphase a été ajouté pour nous permettre de surveiller L'apparition de la phase liquide, son évolution et son influence sur d'autres paramètres.

Explication de l'évolution des paramètres de base tels que la distribution des vitesses et la densité Et des turbulences ont été générées, nous pouvons conclure que la plupart des phénomènes se produisent dans des vents contraires La paroi et l'interface liquide-gaz. La différence peut se justifié par le faire que le flux de chaleur par le bas a été négligé pour avoir un problème axisymétrique.

Les vitesses de l'écoulement et toujours en augmentation en fonction de temps ainsi que les températures sont maximal à côté de mur à cause de le flux de chaleur.

## Bibliographie

- [1]. Pétrole, le pétrole brut, universalis.  
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-petrole-brut/>
- [2]. Pétrole, le raffinage, universalis.  
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-raffinage/>
- [3]. Les techniques du raffinage, les trois étapes du raffinage, planète énergies.  
<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-trois-etapes-du-raffinage>
- [4]. Partie XII. Industries chimiques et parachimiques, chapitre 78 - Le raffinage du pétrole, Richard S. Kraus.  
<http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo078.htm>
- [5]. Support de formation, stockage des hydrocarbures liquides, Sonatrach, Janvier 2017
- [6]. 12 le raffinage du pétrole-1, l'étape après l'extraction et le transport : le raffinage, lyc-ée Hoche.  
[http://www.lyc-hoche-versailles.ac-versailles.fr/IMG/pdf/12\\_le\\_raffinage\\_du\\_petrole-1.pdf](http://www.lyc-hoche-versailles.ac-versailles.fr/IMG/pdf/12_le_raffinage_du_petrole-1.pdf)
- [7]. Support de formation, les équipements, stockage et terminaux, total.
- [8]. support de cours, stockage des hydrocarbures liquides, chapitre 2, I.bouhafs.
- [9]. BLEVE dans un dépôt de GPL en raffinerie le 4 janvier 1966 Feyzin (69) – France  
[https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files\\_mf/FD\\_1\\_feyzin\\_1966\\_fr.pdf](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_1_feyzin_1966_fr.pdf)
- [10]. Énergies fossiles, pétrole, connaissance des énergies.  
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/petrole>
- [11]. Tpe : les produits dérivés du pétrole et ses applications, le pétrole.  
<http://afrostylingenieurs.f.a.f.unblog.fr/files/2014/10/devoirs-petrole-tpe.pdf>
- [12]. Situation du complexe, direction technique, complexe RA1Z, activité aval, Sonatrach, 2001.
- [13]. Manuel opératoire – Service carburants zone 4, Sonatrach.
- [14]. Manuel opératoire – Service carburants zone 3, Sonatrach.

[15]. GPL/C, développement du GPL/c, naftal.

<https://www.naftal.dz/fr/index.php/gplc-gnc>

[16]. Généralités, GPL1, Académie de Nancy-Metz, E.NAUDIN.

[http://www4.ac-nancy-metz.fr/autocompetences/2\\_ressources\\_pedagogiques/1\\_motorisation/stockage\\_le%e7ons\\_technologie/gpl1\\_generalites.pdf](http://www4.ac-nancy-metz.fr/autocompetences/2_ressources_pedagogiques/1_motorisation/stockage_le%e7ons_technologie/gpl1_generalites.pdf)

[17]. Horizon GPL, Installation et entretien des équipements GPL, composition du GPL.

[http://www.horizongpl.com/tout\\_gpl\\_composition.php](http://www.horizongpl.com/tout_gpl_composition.php)

[18]. Rapport d'appui, Influence des enseignements tirés d'accidents impliquant des stockages de GPL dans l'évolution des guides de bonnes pratiques à l'étranger, Programme INERIS EAT DRA 71 : Evaluation des risques des systèmes industriels - Opération B.1.1, 04 septembre 2008.

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/benchmark-gpl-web.pdf>

[19]. Mémoire de fin d'études, Simulation numérique du comportement thermique d'un réservoir de stockage de propane, Mr Mezrague Abdenour / Melle Ounnas Nabila, 2015

[20]. La sécurité à propos des véhicules GPL, LT G EIFFEL.

[http://www4.ac-nancy-metz.fr/autocompetences/2\\_ressources\\_pedagogiques/6\\_confort\\_et\\_securite/stockage\\_le%e7ons\\_technologie/gpl-securite.pdf](http://www4.ac-nancy-metz.fr/autocompetences/2_ressources_pedagogiques/6_confort_et_securite/stockage_le%e7ons_technologie/gpl-securite.pdf)

[21]. J.P.Wauquier, Raffinage et génie chimique, (tome I), édition Technip, (1972) ,p.220.

[22]. Les caractéristiques du butane et propane Algérien, Nafta site web, [www.naftal.dz](http://www.naftal.dz) (Mai2010).

[23]. P. WUITHIER, raffinage et génie chimique, Tome I, 2ème édition 1972-Paris. [24]. P.

.WUITHIER, raffinage et génie chimique, Tome II, 2ème édition 1972-Paris.[25]. Énergies

fossiles, gaz de pétrole liquéfiés (GPL), connaissance des énergies.

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-petrole-liquefies-gpl>

[26]. Le GPL ou LPG, <https://www.econologie.com/gpl-ou-lpg/>

[27]. Séminaire sur la maintenance des réservoirs de stockage des hydrocarbures, ISM-M.HADJERSI-Y.ABDELAZIZ

[28]. [https://files.solidworks.com/Supportfiles/Release\\_Notes/2019/French/relnotes.htm](https://files.solidworks.com/Supportfiles/Release_Notes/2019/French/relnotes.htm)

[29]. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

# **Annexes**

## Les images utilisées dans le chapitre de simulation

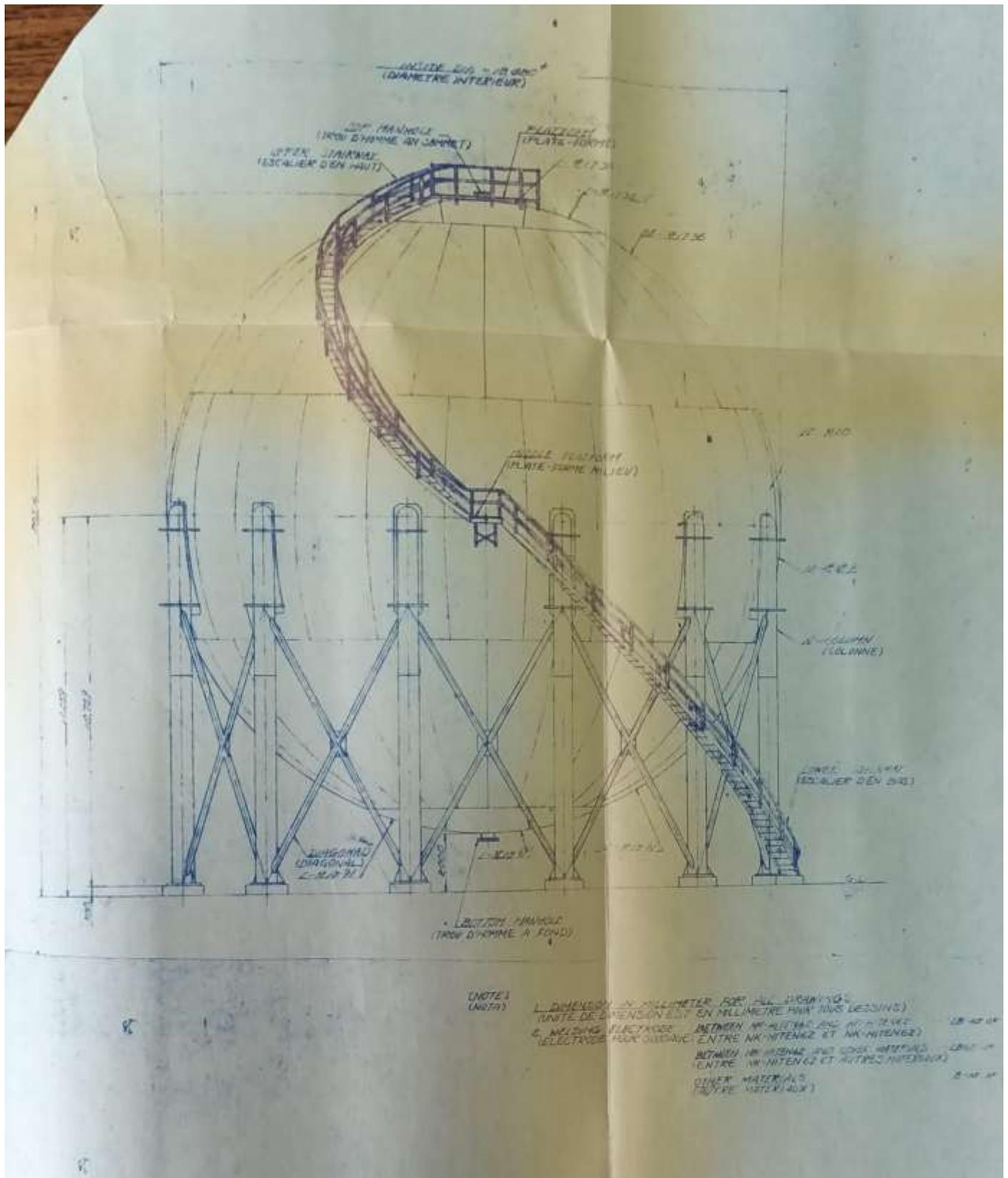


FIGURE 35 – La géométrie de la sphère

