

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES
Faculté des **Hydrocarbures** et de la **Chimie**



Département Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

Mémoire de Master

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Technologie de la Pétrochimie

Récupération des gaz torchés lors du
démarrage de la section de réfrigération au
niveau du complexe GP1/Z

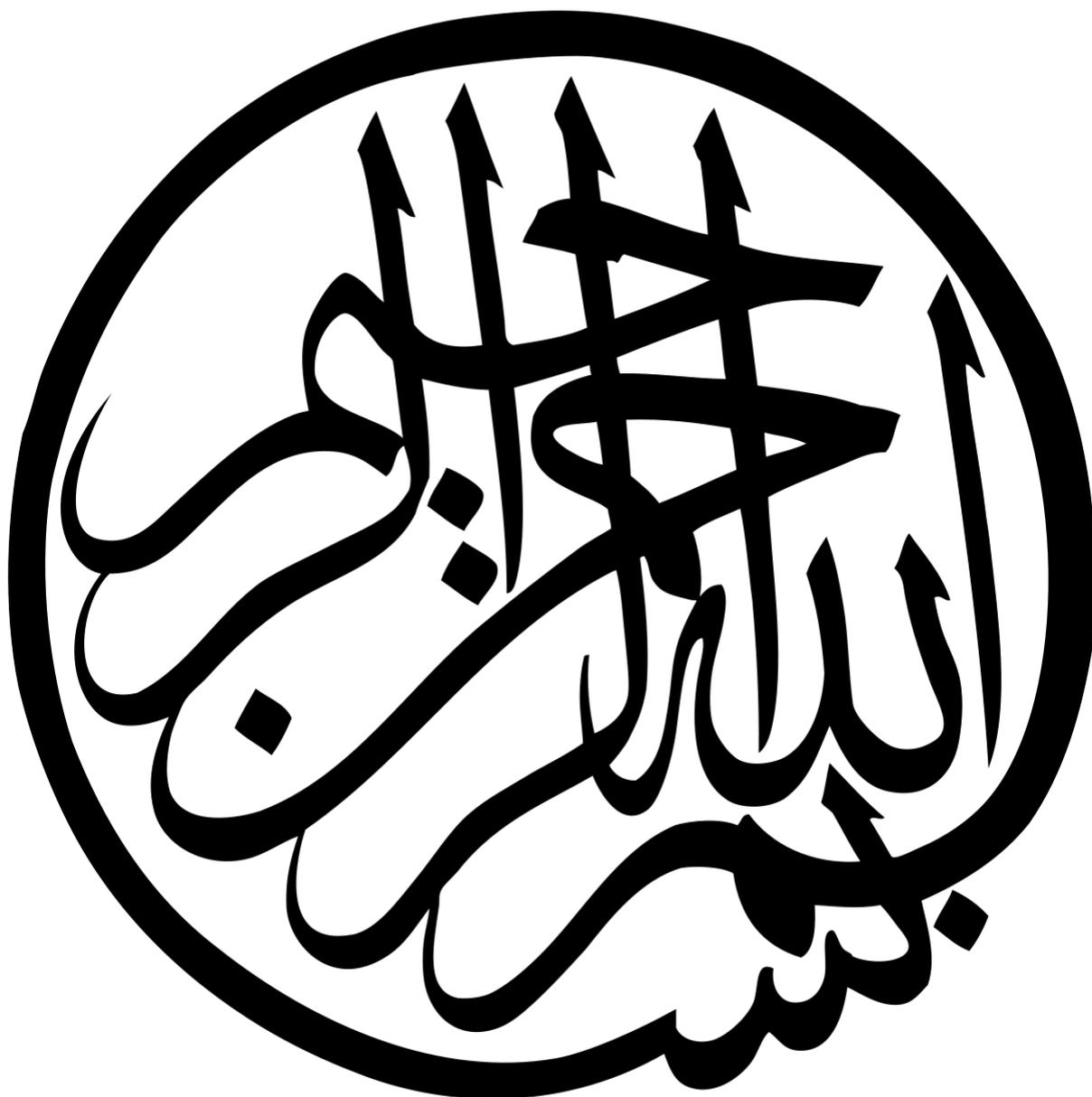
Présenté par :

- Mr HAMIDOU Ibrahim
- Mr KERMICHE Djalal

Devant le jury :

Mr. KADDOUR Omar	UMBB	Président
Mr. SAOUD Abdessalem	UMBB	Examinateur
Mme. BENMABROUKA Hafsa	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Je remercie « ALLAH » le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

En premier lieu, un grand merci à ma mère et mon père pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'a permis de ces études que je vous voulais et par conséquent ce mémoire

Je remercie mon encadrante, Madame «BENMABROUKA. H », pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je voudrais aussi adresser tout de ma gratitude à mon encadreur dans l'entreprise GP1/Z M. KERRMAOUI FAYCAL , il m'a beaucoup appris et a partagé ses connaissances tout au long de cette période, sans oublier sa participation au cheminement de ce rapport.

Mes remerciements s'adressent également au corps professionnel et administratif de complexe GP1/Z pour leurs efforts et la part de leurs expériences qui a été intégré à ce mémoire. Je remercie aussi tous les enseignants du département Génie des procédés de la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie / Université de Boumerdès.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail, à tous ceux qui me sont chers, À mes chers parents qui jusqu'à présent m'ont toujours soutenu sans conditions, À mes chers deux frères Mohamed et Abdelhamid et ma sœur Halima, à toute ma grande famille, À mes camarades de la FHC, mes camarades de chambre et tous mes chers amis, mais surtout Anes, Abdelrahim , Sofiane, Badro, Yahia, À oncle Rédha et tous ceux, qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

HAMIDOU IBRAHIM

Table des matières

Chapitre I : Généralités sur le GPL.

Introduction.....	3
I.1. Généralités sur le GPL.....	4
I.2. Historique.....	5
I.3. Les différents procédés d'obtention du GPL.....	6
I.4 Propriétés Caractéristiques des GPL.....	6
I.4.1. Propriétés physique.....	6
I.4.2. Propriétés chimiques.....	8
I.5. Les différentes utilisations du GPL.....	9
I.5.1. Chauffage.....	9
I.5.2. Le GPL carburant (GPL/c).....	9
I.5.3. L'agriculture.....	10
I.5.4. Dans la pétrochimie.....	11
I.6. Transport des GPL.....	12
I.7. Avantages et inconvénients de GPL.....	14
I.7.1. Les avantage.....	14
I.7.2. Les inconvénients.....	15
I.8. Risques et sécurité des GPL.....	15
I.9. Le GPL dans le monde.....	16
I.10. Production de GPL en Algérie.....	18

Chapitre II : Présentation du complexe GP1Z

II.1. Introduction.....	20
II.2. Présentation du complexe.....	20
II.2.1. Situation géographique et Historique.....	20
II.2.2. Organisation du complexe GP1/Z.....	21
II.2.3. Alimentation de l'usine.....	21
II.2.4. Principales installations du complexe.....	22
II.3. Principales zones du complexe.....	23
II.3.1. Zone de stockage d'alimentation.....	23
II.3.2. Zone de fabrication.....	23
II.3.3. Zone de stockage de produit finis.....	24
II.3.4. Zone des utilités.....	24
II.4. Procédés de fabrication.....	25
II.4.1. Section déshydratation.....	26
II.4.2. Section séparation.....	27
II.4.3. Section réfrigération.....	28
II.4.4. Section d'huile chaude.....	29

CHAPITRE III : section de réfrigération.

III.1. Introduction.....	31
III.2. Généralités sur les techniques de production de froid.....	31
III.2.1 Présentation du processus de cycle frigorifique.....	31

III.2.2 Les différents types des cycles frigorifiques.....	32
III.3. La loi des gaz parfaits.....	33
III.4. Le diagramme de Mollier.....	34
III.5. Les composants du circuit frigorifique.....	35
III.5.1. Le Compresseur.....	35
III.5.2. Echangeur de chaleur (Évaporateur et condenseur)	37
III.5.2.1. Principe de fonctionnement.....	37
III.5.2.2. Les types d'échangeurs	37
III.5.3. Le détendeur.....	38
III.5.3.1. La détente.....	38
III.5.3.2. Objectif de la détente.....	38
III.5.3.2. Types de détendeurs	38
III.5.3.3. Effets de la détente	39
III.6. Les fluides frigorigènes.....	39
III.7. Description de la section de réfrigération.....	40
III.7.1 Principe.....	40
III.7.2. Capacité nominale de réfrigération.....	40
III.7.3. Les équipements principaux	40
III.7.4. Les avantages du propane réfrigérant	42
III.8. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ.....	43
III.8.1. Circuit du butane commercial	43
III.8.2. Circuit du butane commercial	43
III.8.3. Circuit du propane réfrigérant	44
III.9. Les déclenchements et les arrêts d'urgence du compresseur C-1001	46
III.10. Procédure de démarrage de la section de réfrigération.....	47
III.10.1. Mise en marche initiale	47
III.10.2. Mise en marche normale	47

Chapitre IV : le torchage

IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Définition des gaz torchés.....	49
IV.3. Les raisons de torchage.....	49
IV.4. Les sources des gaz torchés.....	50
IV.5. Types de torchage	50
IV.5.1. Torchage continu.....	50
IV.5.2. Torchage opérationnel.....	50
IV.5.3. Torchage d'arrêt et de démarrage des unités de production.....	50
IV.5.4. Torchage d'urgence.....	51
IV.6. Système torche et vide vite.....	51
IV.6.1. Description de la Torche	51
IV.6.2. Fonctionnement.....	51
IV.7. Composition des gaz torchés.....	53
IV.8. Les réactions de combustion	53
IV.8.1. Combustion complète	53

IV.8.2. Combustion incomplète	53
IV.9. Impact des gaz torchés	55
IV.9.1. Sur l'économie	54
IV.9.2. Sur l'Homme.....	55
IV.9.3. Sur l'environnement.....	55
IV.10. L'effet de serre et le réchauffement climatique.....	56
IV.10.1. Définition de l'effet de serre.....	56
IV.10.2. Les Gaz à Effet de Serre.....	57
IV.10.3. L'effet de serre additionnel	57
IV.10.4. Le réchauffement climatique.....	58
IV.11. Le volume des gaz torchés a l'échelle mondiale	58
IV.12. Le torchage en Algérie.....	60
IV.13. Problématique.....	61

Chapitre V : Estimation du volume de propane torché

V.1. Estimation du volume de propane torché	63
V.2.2. Les Cas réel	65
V.3. La quantité annuelle de propane torché.....	72

Chapter VI: Solution proposée

VI.1. L'objectif.....	74
VI.3. La section de BOG.....	74
VI.4. Dimensionnement de la ligne de récupération de propane	75
VI.4.1. Equipements.....	76
VI.5. Généralités sur la Simulation	77
VI.5.2. Présentation du logiciel « HYSYS »	77
VI.5.4. Mode de simulation.....	78
VI.6. Simulation de la ligne de récupération	78
VI.6.1. Simulation en mode dynamique	79
VI.6.1.1 Interprétation des résultats obtenus	80
VI.6.2. Simulation en mode statique	80

Chapitre VII : partie calcul

VII.1. Vitesse d'écoulement du gaz	86
VII.2. Nature de l'écoulement	87
VII.3. Pertes de charges.....	87
VII.4. Les resultats	89

ETUDE TECHNICO- ECONOMIQUE

VIII.1. Introduction	95
VIII.2. L'évaluation de la rentabilité	95
VIII.3. L'évaluation du manque à gagner	95
VIII.4. Estimation du coût de l'investissement de la ligne de récupération.....	95
VIII.5. Le bénéfice	97
Conclusion générale	99

Liste des figures

Figure I.1 : molécules de propane et de butane	4
Figure I.2 : Sources de GPL	6
Figure I.3 :L'utilisation du GPL comme carburant.....	9
Figure I.4 : Les ventes de GPL entre 2020-2022.....	10
Figure I.5 :Les ventes des produits raffinés	10
Figure I.6 :véhicule agricole en GP	10
Figure I.7 :Schéma représentatif des principaux produits fabriqués à partir de propane	11
Figure I.8 :Schéma représentatif des principaux produits fabriqués à partir de Butane.....	12
Figure I.9 : Wagon citernes	13
Figure I.10 :Transport du GPL par navire.	13
Figure I.11 :La demande mondiale en GPL.....	16
Figure I.12 :La consommation du GPL par région.....	17
Figure I.13 :consommation du GPL par secteur en 2021	17
Figure I.14 :Répartition de la production primaire en 2022 (MTEP)	18
Figure I.15 :Production de GPL en Algérie au cours de 5ans.....	18
Figure II.1 : Situation géographique du complexe GP1/Z.....	20
Figure II.2 : organigramme du complexe GP1/Z.....	21
Figure II.3 :installation de séparation	22
Figure II.4 :Sphères de stockage	23
Figure II.5 :bacs de stockage.....	24
Figure II.6 : Schéma de fabrication du GPL.....	25
Figure II.7 :section de déshydratation.	26
Figure II.8 :Section de séparation.....	27
Figure II.9 : Schéma représentatif de la section de séparation	28
Figure II.10 :schéma représentatif de la section de réfrigération.....	28
Figure II.11 :schéma représentatif de la section d'huile chaude	29
Figure III.1 :schéma d'un cycle frigorifique.....	31
Figure III.2 :Diagramme de mollier	34
Figure III.3 :Compresseur à piston.....	35
Figure III.4 : Compresseur à spirale.....	35
Figure III.5 : Compresseur à vis.....	36
Figure III.6 : Compresseur centrifuge	36
Figure III.7 : échangeur à calandre et tubes	38
Figure III.8 : détenteur	39
Figure III.9 : échangeur de chaleur à faiceaux et calandre.....	40
Figure III.10 : Une série des aéro-réfrigérants	41
Figure III.11 : section de réfrigération au niveau du complexe GP1Z.....	42
Figure III.12 : un système de réfrigération typique et le cycle thrmodynamique.....	45
Figure III.13 : shéma globale de la section de réfrigération	45
Figure IV.1 : Brulage des gaz torchés au niveau de la torche.....	49
Figure IV.2 :schéma représentatif d'un système de torchage	51
Figure IV.3 : sysystème torche et bide vite.	52
Figure IV.4 :combustion complète	53
Figure IV.5 : combution incomplète.....	54
Figure IV.6 : Mécanisme de l'effet de serre	56
Figure IV.7 : Concentration des principaux gaz à effet de serre.....	57
Figure IV.8 : Accumulation du CO2 dans l'atmosphère	58
Figure IV.9 : Evaluation des volumes des gaz torchés et la production de pétrole.....	59

Figure V.1: Dimensionnement du ballon V-1009	164
Figure V.2: Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur avant l'arrêt	66
Figure V.3: Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur au démarrage	167
Figure VI.1 : Section BOG	75
Figure VI.2 : localisation de la ligne de récupération	76
Figure VI.3: schéma représentatif de la ligne de récupération	76
Figure VI.4: Dépressurisation en mode dynamique	79
Figure VI.5: profil de dépressurisation	80
Figure VI.6: schéma représentatif de la simulation de la ligne de récupération	81
Figure VI.7: profil d'élévation	82
Figure VI.8: profil de pression	82
Figure VI.9: profil de température	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Exemple de composition d'un mélange GPL	4
Tableau I.2 : Les données de combustion : [8]	7
Tableau I.3: les propriétés chimiques des GPL	8
Tableau I.4 : Comparaison des rejets d'un moteur fonctionnant GPL et d'un moteur diesel	14
Tableau I.5: Equivalence thermique du propane	14
Tableau II.1: les normes de propane et de butane commerciale	23
Tableau III.1 : les températures d'évaporation de certains fluides frigorigènes à la pression atmosphérique	39
Tableau III.2: les principales causes de déclenchement du compresseur C-1001	46
Tableau V.1 : Nombre d'arrêt par train	63
Tableau V.2 : niveau du ballon V-1009 avant et après un arrêt des trains	65
Tableau V.1: Composition du réfrigérant	79
Tableau V.2: conditions opératoires	80
Tableau V.3: donnée de simulation du pipe-100	81
Tableau V.4 les résultats obtenus par la simulation	83
Tableau VII.1 : les conditions opératoires	88
Tableau VII.2: Comparaison entre les résultats obtenus	92
Tableau VIII.1: Tableau récapitulatif de l'évaluation du manque à gagner	95
Tableau VIII.2: Le coût de tuyauterie	96
Tableau VIII.3: Le coût des accessoires	96
Tableau VIII.4 : Les coûts des différentes étapes de réalisation	96

Liste des abréviations

GPL : Gaz pétrolier liquéfié.

C3 : Propane.

C4 : Butane.

GP1Z : Complexe du gaz pétrolier liquéfié Arzew.

GES : Gaz à effet de serre.

CCNUCC : Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques.

COP21 : 21ème conférence des parties.

BOG : Boil Of Gaz

LQS : Activité de séparation et liquéfaction.

SONATRACH : Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

BP : Basse pression.

MP : Moyenne pression.

HP : Haute pression.

RPM : Tour par minute.

GN : Gaz naturel.

CE : Coefficient de consommation.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

DCS : Control direct du système.

PHD : Process history database.

RTO : Région transport ouest.

$f(Z_e)$: Coefficient d'un cylindre horizontal.

$f(Z_c)$: coefficient ellipsoïdal.

PIC : Indicateur de pression.

Introduction générale :

Dans le contexte actuel marqué par les préoccupations croissantes concernant l'impact environnemental des activités industrielles, qui entraînent une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et aggravent le réchauffement climatique, la récupération des gaz torchés représente un domaine d'intérêt majeur pour les entreprises du secteur pétrochimique. Parmi ces entreprises, le complexe de séparation de GPL GP1Z se distingue comme un acteur clé de l'industrie, jouant un rôle crucial dans la production et la distribution de gaz de pétrole liquéfié (GPL).

Les gaz torchés, produits lors des processus de séparation et de traitement du GPL, représentent une source précieuse de ressources énergétiques. Cependant, traditionnellement, ces gaz sont brûlés en torchères, ce qui entraîne des pertes énergétiques considérables ainsi que des émissions de gaz à effet de serre néfastes pour l'environnement.

Notre projet de fin d'études a été mené au sein du complexe GP1/Z, connu sous le nom de Jumbo. Ce complexe a été érigé dans le but de traiter le gaz de pétrole liquéfié brut provenant des divers champs situés dans le sud de l'Algérie, afin de produire du propane et du butane destiné à la consommation locale et à l'exportation.

Au niveau du complexe GP1Z des quantités importantes de propane sont brûlées au sein du complexe GP1Z pendant les arrêts d'urgence et les arrêts programmés, notamment lors du démarrage de la section de réfrigération, qui exige une pression de démarrage inférieure à 3 kg/cm².

L'objectif de notre travail, inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études consiste à estimer la quantité de propane torché lors du démarrage de la section réfrigération et à étudier la possibilité de récupérer cette quantité de matière.

Après avoir donné une description générale du complexe GP1/Z et une autre détaillée de la section réfrigération concernée par le torchage du propane, nous avons estimé la quantité annuelle de propane torchée d'un train de production ,ensuite, nous avons proposé une solution pour récupérer cette quantité torchée en créant une ligne de récupération qui relie le ballon V-1006 à la section B.O.G (Boil off Gas) Enfin, nous avons terminé notre travail par étude technico-économique afin d'évaluer le coût de la modification apporté aux trains de production et les intérêts économiques et environnementaux de cette nouvelle solution.

Chapitre I : Généralités sur le GPL.

Introduction :

Le gaz de pétrole liquéfié est un résidu naturel du raffinage du pétrole il se compose essentiellement du propane et de butane considéré comme l'un des produits de substitution aux carburants classiques notamment les essences.

Le GPL a été largement adopté principalement grâce en raison de ces caractéristiques propres, sa souplesse d'utilisation, vu son pouvoir calorifique important et son aspect non polluant car il ne contient pas de soufre. Notons aussi que le GPL constitue une charge pétrochimique intéressante pour la fabrication des polymères. Ce combustible fait actuellement l'objet de plusieurs utilisations dans de nombreuses applications, le coût raisonnable que présente son stockage et son transport, sa sécurité d'approvisionnement, son prix compétitif, et d'autres avantages d'un point de vue écologique.

I.1. Généralités sur le GPL :

Le gaz de pétrole liquéfié, ou GPL, est un mélange d'hydrocarbures légers qui se compose principalement de propane (C₃H₈) et de butane (C₄H₁₀) stocké à l'état liquide. C'est un carburant dit propre, issu du raffinage du pétrole brut (40 % des ressources mondiales) et plus généralement du traitement du gaz naturel (60 % des ressources mondiales)



Figure I.1 : molécules de propane et de butane

La composition chimique du GPL est variable selon les normes et ses utilisations dans différents pays. [1]

Tableau I.1 : Exemple de composition d'un mélange GPL

La composition de GPL	% molaire
Méthane	0,32
Ethane	1,12
Propane	60,95
n-butane	15,46
i-butane	22,14
Pentane	0,01

Le GPL se trouve à l'état liquide, dès qu'on le soumet à l'une des conditions suivantes :

- ✚ Pression relevée à la température ambiante.
- ✚ Pression atmosphérique et température basse.
- ✚ Pression modérée et température partiellement basse

Cette propriété, leur confère l'avantage de manipuler et/ou d'emmagasiner une importante quantité d'énergie sous un très faible volume (1 litre de GPL liquide égal 250 litres de GPL gazeux), ce qui permet de le transporter plus facilement que pour les gaz non condensables (méthane, éthane) qui exigent des pressions très élevées pour pouvoir être liquéfiés à la température ambiante, et de le commercialiser aisément, dans des bouteilles en acier.

I.2. Historique :

L'histoire des gaz de pétrole liquéfié débute avec celle du XXe siècle. L'un des problèmes rencontrés au tout début de la production d'essence était la rapide évaporation du produit une fois stocké.

Un chimiste américain, Walter Snelling, en 1911, démontra que la cause de cette évaporation est la présence de propane et de butane dans l'essence, il développa par la suite une méthode pour les séparer. Dès 1912, aux USA, le GPL alimentait les voitures comme carburant de substitution en cas de crises. La première production de GPL pour leur utilisation remonte aux années 20 et il faut attendre les années 50 pour les échanges commerciaux d'envergure. L'utilisation du GPL n'a commencé que dans les années 40.

Dès 1932, une grande compagnie pétrolière introduisit les GPL en France. En 1938, une importante compagnie gazière fit construire une usine de remplissage de bouteilles de gaz en Italie, près de Venise. Mais la guerre mit un frein à ces premiers développements.

En 1950, des entreprises ont commencé à conditionner du GPL en bouteilles pour un usage domestique.

La croissance alla de pair avec les capacités de raffinage. Capacités qui furent augmentées dans les années 60 alors que de nouvelles raffineries étaient construites et que le fuel remplaçait le charbon comme combustible industriel. Les ventes de GPL en Europe passèrent de 300 000 tonnes en 1950 à 3.000.000 de tonnes en 1960 puis à 11 millions en 1970.

Avant les années 70, la commercialisation des GPL était essentiellement une activité régionale, chaque secteur géographique ayant ses propres structures de prix, expéditions, acheteurs et vendeurs. La première transaction d'envergure eut lieu dans les années 1950, des États-Unis vers l'Amérique du Sud.

La crise pétrolière de 1973 a été un tournant majeur. Après avoir réalisé que les exportations de GPL pourraient générer un important retour sur investissement, de nombreux pays pétroliers construisirent les infrastructures pour les GPL.

L'expansion de la capacité de production de GPL au Moyen-Orient au cours de la décennie 1975-1985 fut réellement impressionnante passant d'un total de 6 millions de tonnes de capacité existante en 1975 à 17 millions en 1980 et 30 millions en 1985.

Le Moyen-Orient ne fut pas la seule région d'implantation d'usines GPL. L'Australie, l'Indonésie, l'Algérie, la mer du Nord, et le Venezuela représentaient également de nouvelles sources d'approvisionnement.

Les années 1980 se révélèrent être une période d'expansion considérable des exportations de GPL dans le monde.

Le marché des GPL devint véritablement international à cette époque. Les producteurs avaient besoin de d'acheteurs, qu'ils soient en Asie, en Europe, aux États-Unis ou en Amérique du Sud. Les nouveaux volumes à l'exportation devaient trouver de nouveaux débouchés.

I.3. Les différents procédés d'obtention du GPL :

Les gaz de pétrole liquéfiés sont obtenus principalement à partir : [2]

- Lors de la récupération directe des gaz séparés du brut dans les champs de production (gaz associés au pétrole). Le butane et le propane sont piégés dans le pétrole brut, donc durant chaque étape du processus de raffinage de pétrole, les GPL sont extraits. Environ 3% d'un baril standard de pétrole brut est raffiné en GPL, alors que jusqu'à 40% du baril pourraient être convertis en GPL (une tonne de pétrole brut traitée produit 20 à 30 kg de GPL).
- lors de la séparation de l'essence du gaz naturel (GN) dans le but de recueillir les Condensats (propane, butane, essences légers).
- Des raffineries de pétrole brut ; soit au cours de la distillation de pétrole brut soit lors du cracking ou du reforming des produits plus lourds.
- Comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL.
- En moyenne de un champ de gaz est composé de :
 - ✓ 90% de méthane (CH_4)
 - ✓ 5% de propane (C_3H_8)
 - ✓ 5% d'autres gaz, dont le butane (C_4H_{10}).

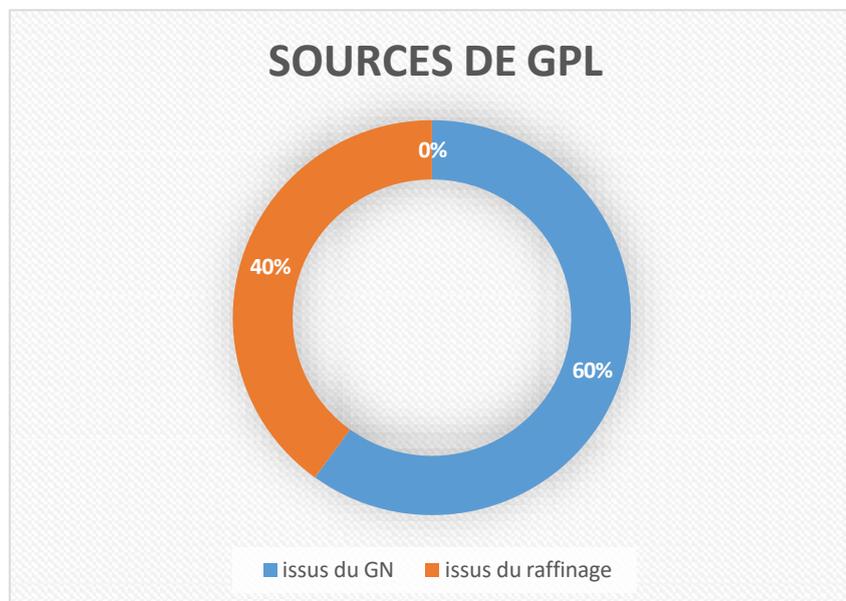


Figure I.2 : Sources de GPL

I.4 Propriétés Caractéristiques des GPL :

I.4.1. Propriétés physique :

Les caractéristiques des Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) sont les suivantes :

a) **Tension de vapeur** : À 20 °C, la tension de vapeur est de 2 bars pour le butane et de 8 bars pour le propane.

- b) Température d'ébullition** : À la pression atmosphérique, les températures d'ébullition sont de -6 °C pour le butane, -42 °C pour le propane et -25 °C pour le GPL.
- c) Pouvoir calorifique** : Le pouvoir calorifique des GPL est élevé, atteignant 12 200 Kcal/Nm³ pour le propane et 11 800 Kcal/Nm³ pour le butane.
- d) Indice d'octane** : Les GPL ont un indice d'octane recherché (RON) naturellement élevé, atteignant aisément une valeur de 98. De plus, leur indice d'octane moteur (MON) est légèrement plus élevé que celui des essences classiques.
- e) Densité** : Aux conditions normales de température et de pression, les GPL sont environ deux fois plus lourds que l'air. Leur densité diminue avec l'augmentation de la température, par exemple, elle est de 0,534 à 38 °C.
- f) 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.
- g) Explosibilité et inflammabilité** : Le GPL étant plus dense que l'air, contrairement au gaz naturel, il risque, en cas de fuite, de s'accumuler au niveau du sol et dans les parties basses telles les caves. Cela entraîne un danger d'explosion lorsque l'accumulation permet un mélange GPL/air adéquat et qu'il y a une source d'inflammation. Cela entraîne également un danger d'asphyxie en remplaçant l'air et diminuant donc la concentration en oxygène. [3]

Tableau I.2 : Les données de combustion :

	BUTANE	PROPANE
Pouvoir comburivore	29,5 m ³ /m ³	23 m ³ /m ³
Pouvoir fumigène (ramené à 15 °C eau supposée non condensée)	31,8 m ³ /m ³	24,8 m ³ /m ³
Limite d'inflammabilité dans l'air - inférieure - supérieure	1,8 % 8,8 %	2,4 % 9,3 %
Composition théorique des produits d'une combustion neutre : - CO ₂ - N ₂	14 % 86 %	13,7 % 86,3%
Température d'auto-inflammation dans l'air	525 °C	535 °C
Vitesse de propagation de la flamme	33 cm/s	32 cm/s
Température maximum de la flamme dans l'air	1 915 °C	1 920 °C

I.4.1. Propriétés chimiques : [4].

Tableau I.3:les propriétés chimiques des GPL

	Propriétés Chimiques	Conséquences Pratiques
Odeur et couleur	Les GPL sont naturellement incolores et pratiquement inodores. Pour des raisons de sécurité, une odeur particulière est ajoutée au moyen de substances appropriées, telles que les mercaptans.	L'odeur permet de signaler l'existence d'une fuite qui est recherchée avec un produit moussant, jamais avec une flamme.
Etat gazeux	Le GPL est un gaz plus lourd que l'air aux conditions normales de température et pression	Il a tendance à s'accumule dans les points bas en cas de fuite
Etat liquide	Le GPL liquide est plus léger que l'eau.	Les réservoirs sur les terrains inondables (instables) doivent être ancrés parce qu'ils risqueraient de flotter en cas d'inondation.
Action sur les composés organiques	Le GPL dissout les graisses, les huiles et les vernis.	Les joints et les trigones doivent être en caoutchouc synthétique de qualité appropriée.
Solubilité	Il est insoluble dans l'eau.	
Corrosion :	Le GPL n'est pas corrosif pour l'acier, mais il peut être corrosif pour le cuivre, les alliages de cuivre ou d'aluminium	
Toxicité physiologique	L'inhalation de grandes quantités de GPL peut entraîner un effet légèrement narcotique. La concentration acceptable dans l'air est de 1 ppm pour le propane	

I.5. Les différentes utilisations du GPL :

En raison de son haut pouvoir calorifique, de sa pureté, de sa combustion propre et de sa facilité de transport, le GPL est adapté à une vaste gamme d'applications et est utilisé dans divers secteurs, notamment :[5]

I.5.1. Chauffage :

Les établissements, les hôtels, les maisons...exigent une source d'énergie idéale pour une variété d'applications à savoir le chauffage central, l'eau chaude et ainsi de suite. Les GPL avec leurs caractéristiques en font un combustible fiable pour répondre à tous ces besoins comme ils présentent l'avantage supplémentaire de garantir particuliers et entreprises des risques de ruptures ou de fluctuations d'alimentation en énergie.

I.5.2. Le GPL carburant (GPL/c)

Le Gaz de Pétrole Liquéfié comme carburant (GPL/C) est utilisé dans de nombreuses régions à travers le monde, notamment en Amérique, en Europe et dans le sud asiatique, bien que sa composition puisse varier d'un endroit à l'autre. Environ 7 à 8% de la consommation mondiale de GPL est utilisée sous forme de carburant. Son utilisation internationale a prouvé qu'il s'agit d'un carburant fiable et largement adopté. Les atouts de ce carburant lui confèrent les caractéristiques d'un carburant propre, moins polluant que l'essence. L'indice d'octane élevé des GPL permet leur substitution à l'essence sans modification du moteur, de plus il confère à celui-ci un pouvoir antidétonant. Le GPL présente de nombreux avantages environnementaux, notamment une meilleure capacité de mélange avec l'air que l'essence, l'absence de plomb, ainsi qu'une réduction des émissions de CO₂ et de CO.



Figure I.3:L'utilisation du GPL comme carburant.

Il est à noter que le GPL/C n'encrasse pas le moteur, et cela grâce à son indice d'octane élevé, ce qui augmente la longévité du moteur et lui assure en plus un pouvoir antidétonant, ainsi qu'un pouvoir calorifique élevé. Le GPL/C est le premier carburant sans plomb compétitif au gas-oil et au super sans plomb, avec près de 23000 stations dans le monde qui délivrent du GPL/C à plus de 5 millions véhicules pour une consommation de 10 MT.

En 2022 les ventes de GPL sur le marché national ont progressé de 9% par rapport à 2021. Cette hausse est expliquée principalement par la forte demande sur le propane destiné à l'utilisation en GPL carburant (+16% par rapport à 2021). [6]

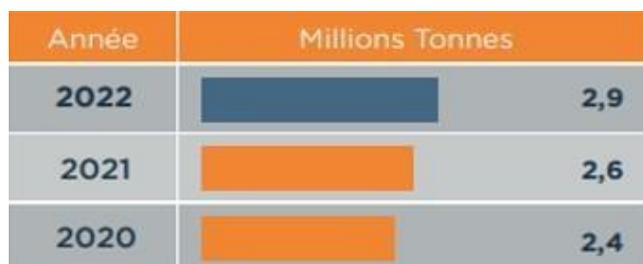


Figure I.4: Les ventes de GPL entre 2020-2022

Les ventes d'essence et de gasoil représentent 92% du total des ventes des produits raffinés sur le marché national. Les ventes d'essence ont atteint un volume de 3,3 Millions Tonnes en 2022, en baisse de 2% par rapport à 2021, en raison, principalement, de sa substitution par le GPLC

Détails produits raffinés

Produit	Millions Tonnes
Essence	3,3
	3,4
Gasoil	10,0
	9,8
Kéro Jet	0,5
	0,3
Autre(*)	0,7
	0,7

■ 2021 ■ 2022

Figure I.5: Les ventes des produits raffinés

I.5.3. L'agriculture :

Dans le domaine de l'agriculture, le GPL joue un rôle important dans le développement agricole en étant utilisé pour diverses applications telles que la déshydratation et le séchage des végétaux, le chauffage des serres, le désherbage thermique (remplaçant ainsi les produits chimiques), ainsi que comme carburant pour les véhicules agricoles et comme insectifuge. [5]



Figure I.6: véhicule agricole en GP

I.5.4. Dans la pétrochimie :

- **Propane :**

18% de la production mondiale du propane est utilisée comme matière première dont le but d'obtenir des produits finaux ou des produits semi finaux pour les autres industries chimiques à savoir :

- ✓ Acétaldéhyde, formaldéhyde, acide acétique par oxydation.
- ✓ Ethylène et propylène par pyrolyse.
- ✓ Nitro éthane et nitro propane par nitration.

10% de l'éthylène, produits par la pétrochimie, est produit mondialement à partir du propane. La demande globale pétrochimique des GPL enregistre un taux de croissance de l'ordre de 10%.

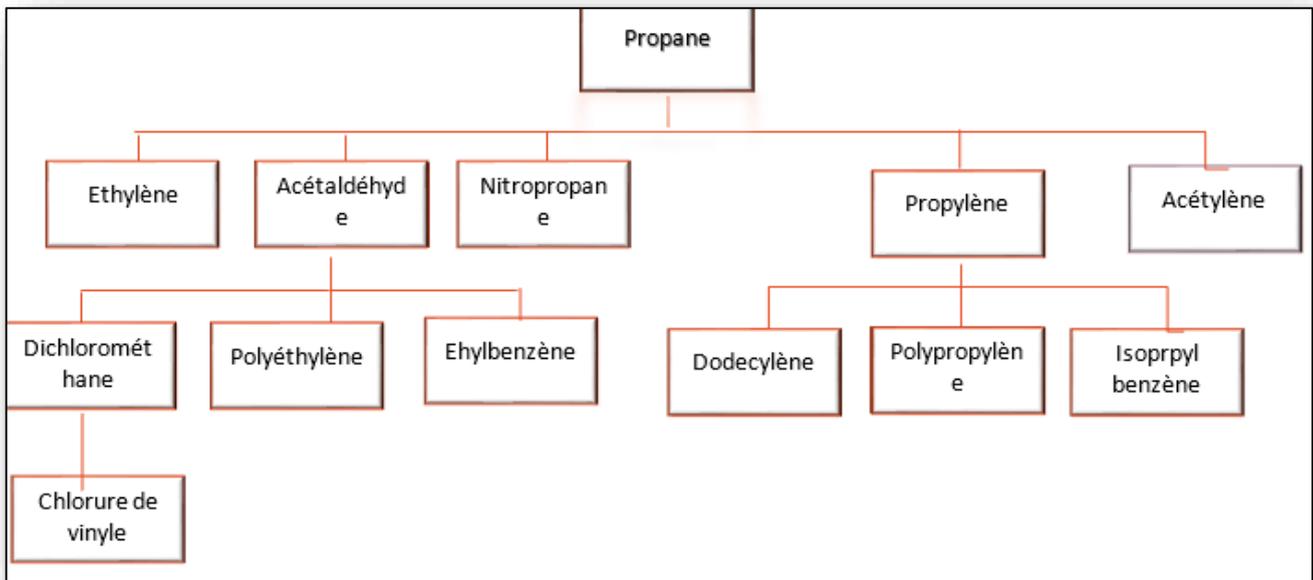


Figure I.7:Schéma représentatif des principaux produits fabriqués à partir de propane

- **Butane :**

L'utilisation du butane dans le secteur de la pétrochimie est essentiellement liée à la fabrication du MTBE utilisé pour l'augmentation de l'indice d'octane des essences en substitution au plomb butane est aussi utilisé pour l'obtention de :

- ✓ Butadiène par déshydrogénation du n-butane.
- ✓ Anhydride maléique par oxydation.
- ✓ L'iso butylène formé lors de la déshydrogénation de l'isobutane, est utilisé comme matière Première pour la fabrication des plastiques, des caoutchoucs, des produits cosmétiques et pharmaceutiques.

En Algérie, cette activité présente le double avantage de permettre la production de produits nécessaires à la consommation interne ainsi qu'à l'exportation des produits intermédiaires. Etant donné que la capacité de production de Butane a passé 4 MT en 2022, il subsisterait une quantité des GPL qui pourra être valorisé comme charge pétrochimique.

Les principales sous-produits fabriqués à partir de butane sont représentés dans le schéma suivant :

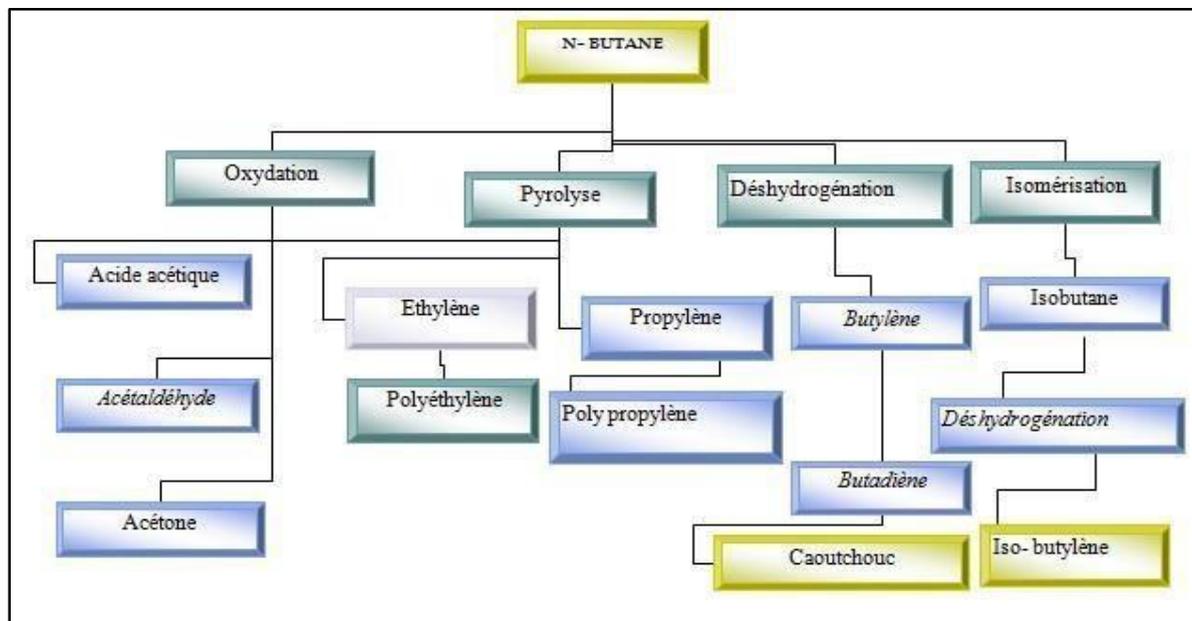


Figure I.8 Schéma représentatif des principaux produits fabriqués à partir de Butane

I.6. Transport des GPL :

I.6.1. Le transport par canalisations :

Ce mode de transport est utilisé dans les cas de transfert des grandes quantités de GPL de leur point de récupération vers les unités de séparations ou vers les stockages importants. Ce mode de transport est retenu également dans le cas d'acheminement des GPL sur de longues distances ; et il est plus économique.

L'Algérie dispose d'un réseau de canalisations de près de 19599 km en 2013 contre 19063km en 2012, soit une augmentation de 536 km (la quantité des GPL transporté en 2013 était de 6,4 millions de tonnes), suite à la réception du GR4 et répartis comme suit :

- Des gazoducs d'une longueur de 9689 km.
- Des oléoducs d'une longueur de 9910 km.
- Le réseau de canalisation a une capacité de transport de 357 millions Tonne.
- Les centres de dispatching comptent parmi les installations névralgiques de l'Activité.
- Le Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides, se trouve à Hassi R'mel.

I.6.2. Transport par camion- citernes (par route) :

Ce type de transport est destiné pour la commercialisation des quantités petites du GPL au niveau du marché national à partir des centres de stockage vers les clients dont les GPL sont transportés sous une température ambiante et une haute pression. [7]

I.6.3. Transport par wagon- citernes :

Ce type de transport est destiné pour des quantités inférieures à celle transportée par les canalisations en utilisant la voie ferroviaire. Le train comporte plusieurs wagons citernes avec une capacité unitaire de 50 tonnes. Les wagons - citernes sont sous pression et sont fabriqués conformément à des normes contrôlées. Ce mode d'expédition est surtout utilisé pour la livraison des GPL à partir des raffineries vers des stockages primaires ou à partir des stockages primaires vers des stockages secondaires.



Figure I.9: Wagon citernes

I.6.4. Transport par navires :

Ce type de transport est destiné pour les échanges internationaux dont des quantités importantes du GPL sont transportées dans des navires qui ont des capacités de stockage énorme environ de 70000 m³, c'est l'équivalent d'un bac de stockage de GPL. Les GPL sont stockés dans des réservoirs réfrigérés (jusqu'à -40°).



Figure I.10:Transport du GPL par navire.

I.7. Avantages et inconvénients de GPL :

I.7.1. Les avantages :

1. Propre :

Les GPL ne génèrent ni particules, ni plomb, ni benzène, ni soufre lors de sa combustion. De plus, ses émissions de carbone sont très réduites. Comparé au fioul, son empreinte carbone est inférieure de 20% sur l'ensemble de son cycle de vie, et elle est même inférieure de 50% par rapport au charbon. La majorité des GPL, soit 60%, sont issus des champs de gaz naturel, ce qui les rend non toxiques et exempts de tout impact sur l'environnement, que ce soit le sol, la mer ou l'air. Ceci suffit au gouvernement pour considérer le GPL comme un carburant "propre".

Tableau I.4 : Comparaison des rejets d'un moteur fonctionnant GPL et d'un moteur diesel. [8]

Emission d'un moteur (en g/KWh)			
Rejets	GPL	Diesel	Pourcentage
Oxydes d'azote	0,4	7	15 fois
HC imbrûlés	0,01	1,1	100 fois
Oxyde de carbone	0,25	4	16 fois

2. Performant :

Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) se distinguent par leur performance énergétique supérieure par rapport à d'autres sources d'énergie. Leur puissant pouvoir calorifique signifie qu'une flamme de GPL produit plus de chaleur, avec un rendement de combustion pouvant être jusqu'à cinq fois plus important. Par exemple, 1 kilogramme de propane est thermiquement équivalent à 3 à 6 kilogrammes de bois, 1,5 à 2 kilogrammes de charbon, 1,29 litre de fioul et 1,38 kilowattheure d'électricité.

Les fours fonctionnant au propane peuvent atteindre jusqu'à 25 degrés Celsius de plus que ceux utilisant d'autres combustibles fossiles. Cette efficacité énergétique du GPL contribue à réduire les pertes d'énergie et à optimiser l'utilisation des ressources. [7]

Tableau I.5: Equivalence thermique du propane.

1Kgdepropane				
Bois	Charbon	Fioul	Gaz naturel	Electricité
3 à 6 Kg	1,5 à 2 Kg	1,29L	1,16 m ³	1,38KWh

3. Techniquement avantageux :

Le GPL a un indice d'octane élevé, un grand pouvoir calorifique et bien homogène, lui assurant un rendement énergétique plus efficace ce qui se traduit par une combustion beaucoup plus complète, l'absence de résidus lors de la combustion du GPL (ni encrassement, ni dépôt de calamine) profite également à la longévité de la mécanique, permettant même un espacement des vidanges en utilisation quotidienne.

4. **Economiquement avantageux :**

Le GPL est généralement moins coûteux que l'essence ou le diesel. Les utilisateurs du GPL peuvent économiser de l'argent sur leur carburant.

I.7.2. Les inconvénients :

- Un véhicule essence est plus puissant que celui roulant au GPL, cette différence peut être remarquable au niveau de la tonicité en reprise du véhicule.
- L'ajout du réservoir de GPL peut augmenter le poids total du véhicule.
- Les roues de secours sont souvent remplacées par des bombes anti-crevaisson pour économiser de l'espace et du poids.
- L'installation d'un kit de carburation et d'un réservoir spécifique peut engendrer des coûts significatifs, notamment en raison de la nécessité d'importer des équipements spécifiques qui exigent des ressources financières en devises.
- Le réservoir de GPL peut réduire le volume du coffre, bien que certains constructeurs intègrent désormais des réservoirs de GPL lors de la conception de leurs modèles pour minimiser cet inconvénient.
- Si auparavant, certains vieux modèles de véhicules fonctionnant au GPL étaient sujets à une usure prématurée des soupapes, cette problématique a été résolue grâce à l'utilisation de matériaux plus adaptés dans les moteurs modernes.
- En raison d'une mauvaise information et d'une perception erronée de certains consommateurs quant à la sécurité et à la durabilité des moteurs fonctionnant au GPL, une certaine prudence est observée.

I.8. Risques et sécurité des GPL :

Les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) peuvent représenter un danger si les mesures de sécurité suivantes ne sont pas respectées :

- ✚ Les fuites de GPL peuvent provoquer un risque d'incendie dès que le gaz s'échappe dans l'atmosphère.
- ✚ Les réservoirs de GPL ne doivent jamais être remplis à plus de 85 % de leur capacité totale, laissant ainsi 15 % pour la dilatation.
- ✚ Étant plus lourds que l'air, les GPL peuvent s'accumuler au sol et dans les endroits bas, comme les caves, en cas de fuite, augmentant ainsi le risque d'explosion en présence d'une source d'inflammation. Cela peut également entraîner un risque d'asphyxie en remplaçant l'air et en réduisant la concentration en oxygène, d'où la nécessité d'éviter les espaces confinés et de bien ventiler les zones contaminées.
- ✚ La faible viscosité des GPL peut augmenter les risques de fuites, d'où l'importance de minimiser les assemblages non soudés.
- ✚ Après le dépotage, il est essentiel de purger les canalisations de liquide pour prévenir les ruptures potentielles des réservoirs lorsqu'ils sont remplis.
- ✚ Les GPL liquides peuvent causer des brûlures par évaporation.
- ✚ La dispersion des gaz est lente, donc une bonne aération est nécessaire pour assurer la sécurité.

I.9. Le GPL dans le monde :

Pour la décennie entre 2010 et 2019, la demande de GPL a augmenté de manière ininterrompue, à un rythme moyen de 3 % par an. Mais la pandémie de Covid-19 qui a ravagé l'économie mondiale en 2020 a mis brusquement fin à cette croissance. La demande de produits pétroliers a diminué de 5 % en 2020 par rapport à l'année précédente. L'impact sur la demande de GPL a été moins sévère, mais elle a quand même baissé de 2 %.

L'utilisation diversifiée du GPL dans les secteurs de l'énergie et non énergétique a contribué à soutenir la demande pendant la crise de la Covid-19. Le secteur résidentiel représente environ la moitié de la consommation totale, la cuisson et le chauffage sont restés des activités essentielles lorsque des mesures de confinement étaient en place. La consommation mondiale de produits pétrochimiques a été soutenue par une forte demande d'emballages et d'équipements médicaux. [9]

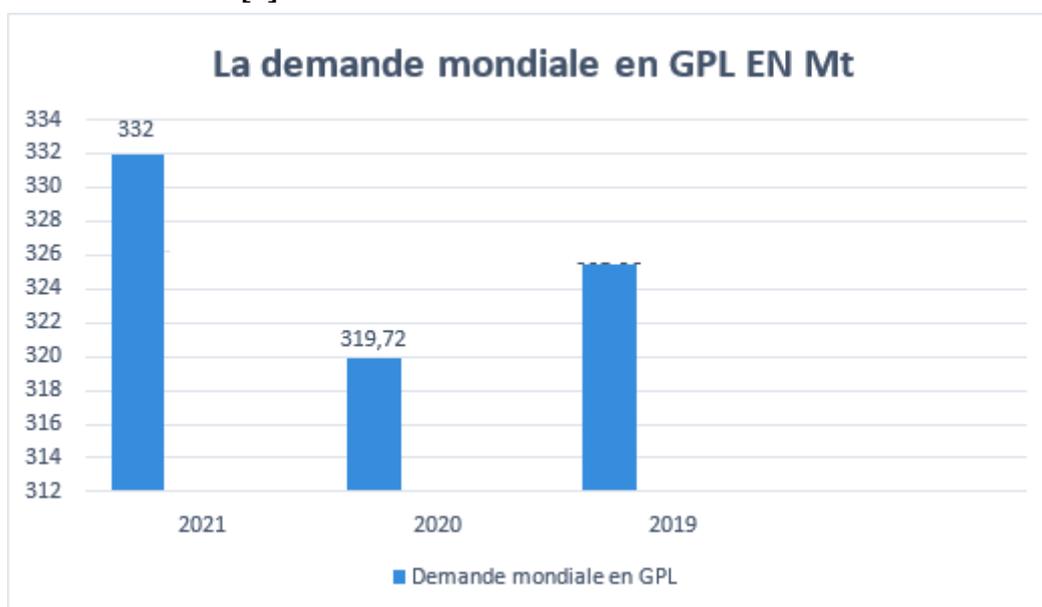


Figure I.11: La demande mondiale en GPL

L'approvisionnement en GPL en 2021 s'est redressé par rapport aux niveaux bas de 2020 atteignant 333 millions de tonnes, presque à parité avec les niveaux de 2019. Le traitement du gaz représentait 64 % de la production et les raffineries 36 %.

Les États-Unis restent le plus grand producteur avec 91 millions de tonnes représentant 27 % de la production mondiale, Les États-Unis sont également l'un des plus grands consommateurs de GPL, avec 43,5 millions de tonnes en 2021. Mais avec une production plus de deux fois supérieure à ses besoins domestiques, il dispose de la plus grande disponibilité à l'exportation parmi tous les producteurs. L'année écoulée a vu les États-Unis combler les lacunes d'approvisionnement en Chine et en Europe, soulignant leur rôle en tant qu'exportateur mondial clé.

La Chine est le deuxième plus grand producteur avec 47,6 millions de tonnes en 2021, entièrement issu d'opérations de raffinage. La demande du pays a augmenté de 13 % pendant la même période, pour atteindre 71 millions de tonnes. Cette hausse a été entraînée par une demande d'énergie plus élevée et par l'expansion du secteur pétrochimique. Avec un déficit

d'environ 24 millions de tonnes par an, la Chine était le plus grand importateur — un statut qu'elle devrait conserver dans les années à venir.

Le Moyen-Orient est un producteur et exportateur clé, notamment vers l'Asie du Sud où le GPL est principalement utilisé comme combustible de cuisson. La production de la région était estimée à 65 millions de tonnes en 2021, soit environ 20 % de l'offre mondiale. L'Arabie saoudite est le plus grand producteur de la région avec 25 millions de tonnes par an, suivi du Qatar et des Émirats arabes unis avec environ 10,5 millions de tonnes par an chacun. La forte consommation intérieure de GPL en Arabie saoudite — principalement de son secteur pétrochimique — limite sa disponibilité à l'exportation à environ 20 % de l'offre totale. En comparaison, le Qatar et les Émirats arabes unis ont exporté 97 % et 78 % de leur production de GPL en 2021.

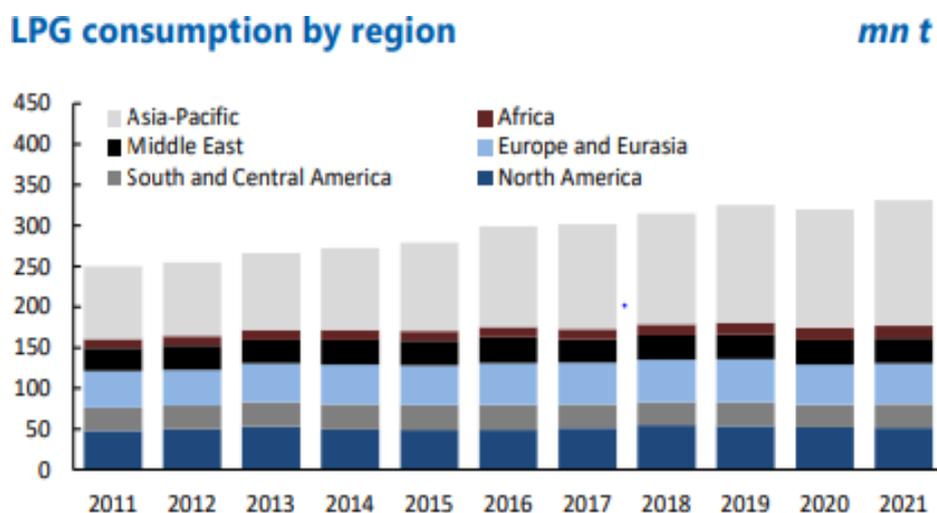


Figure I.12: La consommation du GPL par région

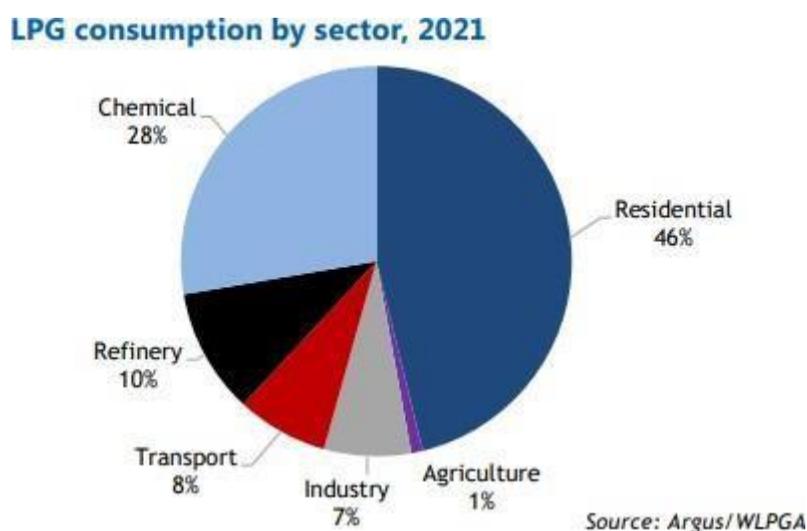


Figure I.11: consommation du GPL par secteur en 2021

I.10. Production de GPL en Algérie :

La production de GPL en Algérie représente 5% de la production totale d'hydrocarbures. [6]

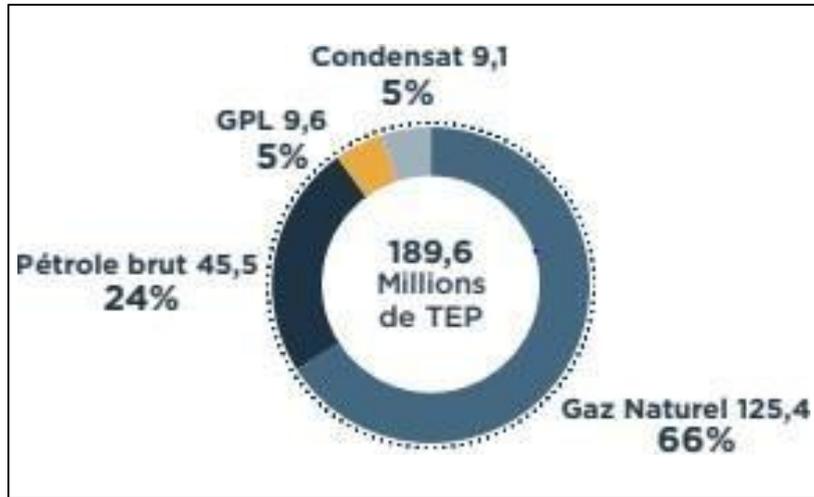


Figure I.14:Répartition de la production primaire en 2022 (MTEP)

Cette production est assurée à travers deux complexes GPL, d'une capacité de séparation design de 10,4 Millions tonnes par an.

L'offre du GPL est localisée essentiellement dans la région ouest à Arzew avec 87%, 9% dans la région de Skikda ; 2% au sud et 2% dans la région centre Cet accroissement est dû à la mise en place d'unités d'extraction au niveau des champs de Hassi-R'mel en 1979 ; Adrar en 1985 ; Haoudh-Berkaoui en 1993 et EL Hamra en 1995

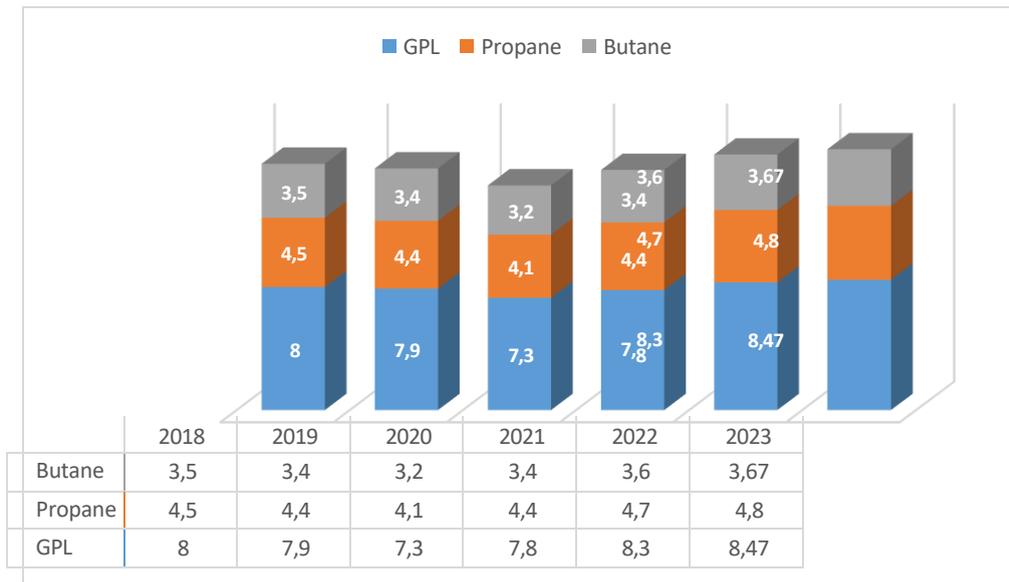


Figure I.15:Production de GPL en Algérie au cours de 5ans

Chapitre II : Présentation du complexe GP1Z

II.1. Introduction :

Le gaz de pétrole liquéfié connu sous le terme de GPL, dont l'Algérie est l'un des principaux producteurs et exportateurs dans le monde, constitue l'une des priorités des plans de développement et de la politique énergétique de la SONATRACH.

Vu la demande du GPL sur le marché national et international qui cesse de s'accroître et vu la charge importante arrivant des champs pétroliers Dans ce cadre, la SONATRACH a développé d'importantes installations de production, de transport et de séparation des GPL permettant leurs valorisations et leurs commercialisations aussi bien sur le marché local qu'international. Parmi ces installations de traitement du GPL, le complexe GP1/Z est cité en premier.

II.2. Présentation du complexe :

II.2.1. Situation géographique et Historique :

Le complexe GP1/Z dénommé JUMBO-GPL fait partie des six complexes de liquéfaction appartenant à l'activité (AVAL) de l'entreprise national SONATRACH a pour objectif le traitement du GPL venant de plusieurs sources du sud algérien (Hassi Messaoud, HassiR'mel) pour la production des gaz « Propane » et « Butane » liquéfiés. Il est situé entre la centrale thermoélectrique de Mers EL Hadjadj à l'Est et les complexes de GNL à l'Ouest et qui s'étend sur une superficie de 120 hectares. Il a été construit en trois phase avec le concours d'un consortium Japonais IHI-C-ITACHI dans le cadre d'un contrat clé en main (EPC) impliquant des travaux comprenant l'ingénierie (E), l'approvisionnement (P), la construction (C), le transport, les travaux civils, l'installation et la mise en service. Ce projet majeur comprenait des réservoirs sphériques (six, chacun contenant 1 000 mètres cubes) pour le stockage de la matière première de GPL, des trains de séparation et de liquéfaction pour le propane et le butane (trois, chacun avec une capacité de production annuelle de 1 million de tonnes), des réservoirs pour le propane et le butane (deux, chacun contenant 70000 mètres cubes) et d'autres installations accessoires. [7]



Figure II.1: Situation géographique du complexe GP1/Z.

La première phase a été construite en 1984,4 trains avec une capacité de production annuelle de 4 millions de tonnes. Cette capacité a été augmentée de 2 millions de tonnes suite à l'expansion de la deuxième phase en 1998. L'achèvement de la dernière expansion de la troisième phase en 2010 a ajouté une capacité de production annuelle supplémentaire de 3 millions de tonnes. Cela porte la capacité annuelle à 9 millions de tonnes.

II.2.2. Organisation du complexe GP1/Z :

L'organisation du complexe GP1/Z est étudiée de manière à avoir une coordination complète entre les différentes structures de l'usine afin de permettre une exploitation optimale des ressources disponibles. Quatre équipes, dont une en repos, sont chargées de suivre, ainsi que du personnel de maintien qui travaille en journées normales.

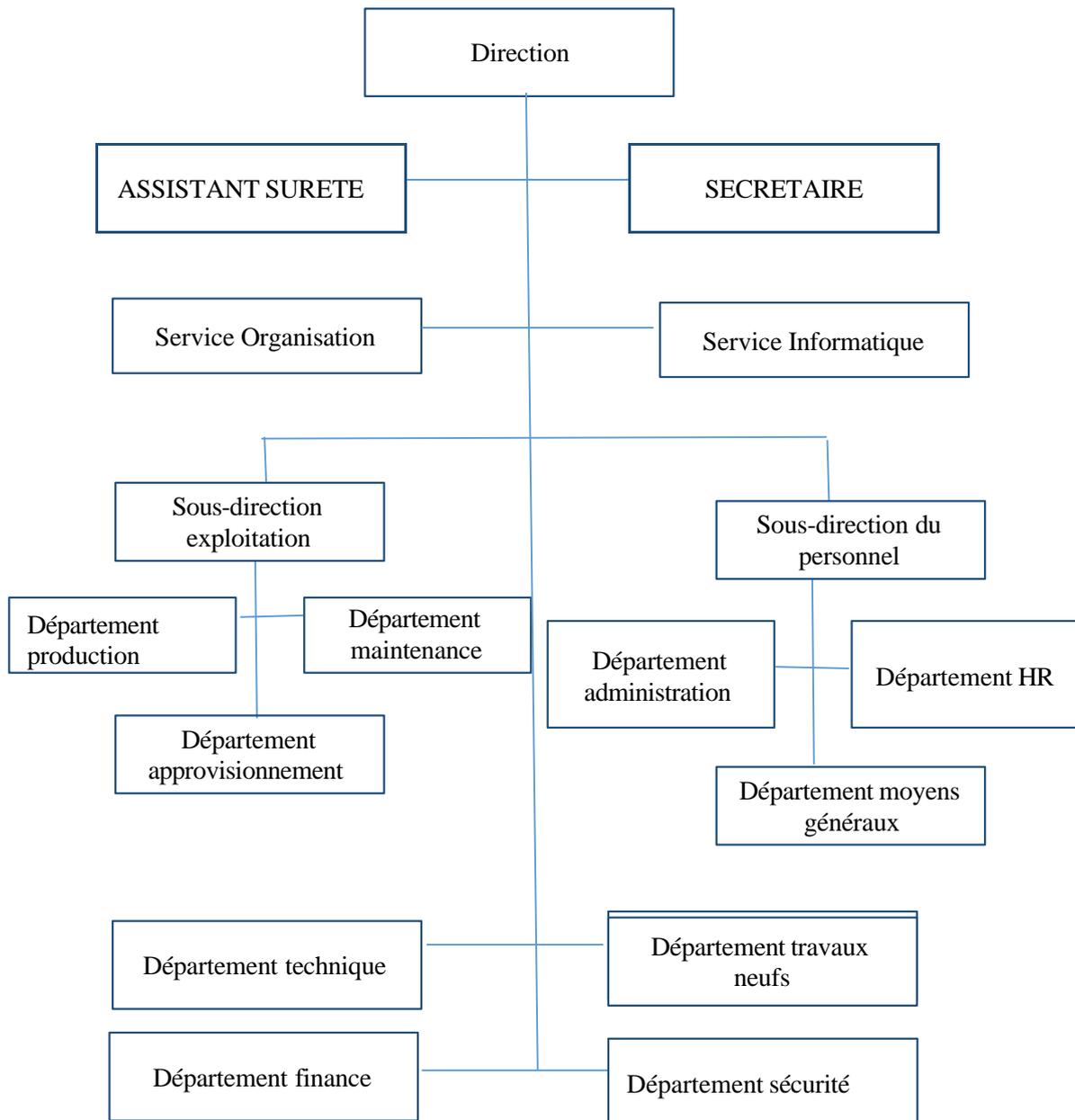


Figure II. 1: organigramme du complexe GP1/Z.

II.2.3. Alimentation de l'usine :

Le complexe GP1Z reçoit sa charge d'alimentation en GPL brut en provenance des divers champs situés dans le sud (Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Adrar, In Amenas) par l'intermédiaire de la Région Transport Ouest (RTO) [2]

II.2.4. Principales installations du complexe :

Les principales installations du complexe GP1/Z sont :

- 09 Trains de traitement du GPL.
- 22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1000 m³ chacune.
- 04 Bacs de stockage de propane basse température de 70000 m³ chacune.
- 04 Bacs de stockage de butane basse température de 70000 m³ chacune.
- 04 Sphères de stockage de produits ambiants (propane et Butane) de 500 m³ chacune.
- 01 Sphères de stockage de gazoline de 500 m³.
- 02 unités de liquéfaction des boil-off.
- Unité de démercurisation.
- 01 Station électrique alimentée par SONELGAZ.
- 04 Générateurs assurant l'énergie des cours du complexe.
- 02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité variée
- Une rampe de déchargement de camions.
- Une station de pompage d'eau de mer.
- 05 salles de contrôle.



Figure II. 2: installation de séparation

II.3. Principales zones du complexe :

Le complexe GP1Z est divisé en quatre zones principales chargées du traitement du GPL, d2s le début de la chaîne jusqu'au stockage des produits finis.

II.3.1. Zone de stockage d'alimentation :

Cette section comprend des réservoirs d'alimentation, 22 sphères de stockage de GPL, chacune ayant une capacité individuelle de 1000 m³. [10]

Son objectif est de maintenir un fonctionnement stable et de garantir une autonomie de plus de 10 heures pour fournir du GPL brut aux trains en cas d'arrêt de pompage. Elle est également conçue pour recevoir soit le flux de recyclage, soit le produit hors spécification provenant des sections en aval.



Figure II. 3:Sphères de stockage

II.3.2. Zone de fabrication :

Cette zone comprend 3 sections de traitement :[7]

- ✚ Section de déshydrations.
- ✚ Section de séparation.
- ✚ Section de réfrigération.

Le rôle de cette section est de produire du propane et du butane commercial conformes aux normes de l'industrie suivantes :

Tableau II.I: les normes de propane et de butane commerciale

Normes	Propane	Butane
Densité à 15 °C	0,5068	0,5772
Teneur en eau	1ppm	1ppm
point d'ébullition à 760 mm Hg (°C)	- 40	- 5
Pureté	≥95%	≥ 90%
Teneur en mercure nano-g/Nm3	5	5

II.3.3. Zone de stockage de produit finis :

La section B.O.G (Boil of Gas) se compose de deux ensembles distincts, chacun étant dédié respectivement au propane et au butane. Son objectif est de ré-liquéfier les gaz d'évaporation provenant des réservoirs de stockage à basse température et des jetées D1 et M6 lors du chargement des navires, afin de les réinjecter dans les réservoirs de stockage.

Il existe deux types de stockage :

➤ **Stockage à température ambiante :**

Destiné à la distribution nationale du gaz, le chargement des camions se fait à partir des quatre sphères, chacune ayant une capacité de 500 m³, où le propane et le butane sont stockés sous pression.

➤ **Stockage à basses températures :**

Les produits réfrigérés (propane, butane) sont véhiculés aux bacs ou ils seraient stockés dans les conditions de basse température. La capacité de chacun est 70000m³ et sont munis des pompes immergées pour la circulation du produits et chargement navires.



Figure II. 4:bacs de stockage

II.3.4. Zone des utilités :

Les utilités disponibles dans le complexe sont :

- Gaz naturel: utilisé comme combustible.
- Azote : il est utilisé pour l'inertie des équipements.
- Eau : L'eau distillée, L'eau de refroidissement et L'eau potable.
- Méthanol
- Energie électrique-
- Air et Vapeur

II.4. Procédés de fabrication :

La charge d'alimentation distribuée par RTO est transportée vers le stockage à l'aide d'un pipeline de 24 pouces. Avant d'être stocké, le GPL brut passe d'abord par un collecteur équipé d'un contrôleur de pression pour maintenir une pression de service stable, puis traverse des filtres, chacun équipé d'un dispositif de différence de pression ($\Delta P=0,5$ PDI), afin de détecter tout encrassement. Ensuite, le GPL traverse des dégazeurs pour séparer et purger les vapeurs du mélange vers les sphères d'alimentation.

Une fois filtrée et dégazée, la charge passe à travers six (06) démercuriseurs pour réduire sa teneur en mercure jusqu'à environ 5 nano-g/Nm³. Après cela, la charge passe par des redresseurs pour rendre l'écoulement laminaire, permettant une lecture correcte du débit et de la densité du GPL.

Le GPL brut est ensuite acheminé vers les sphères de charge sous une pression de 18 à 22 Kg/cm² et une température de 5 à 41.8°C. La charge est stockée dans 22 réservoirs sphériques, chacun ayant une capacité de 1000 m³ de GPL, à des pressions variables entre 7 et 9 bars. [10]

Une fois stocké, le GPL est acheminé vers la zone de fabrication au moyen de 9 trains identiques installés en parallèle sous une pression de 2,94 bars et une température ambiante. Chaque train est conçu de manière à produire 1 million de tonnes/an et comprend les sections suivantes :[3]

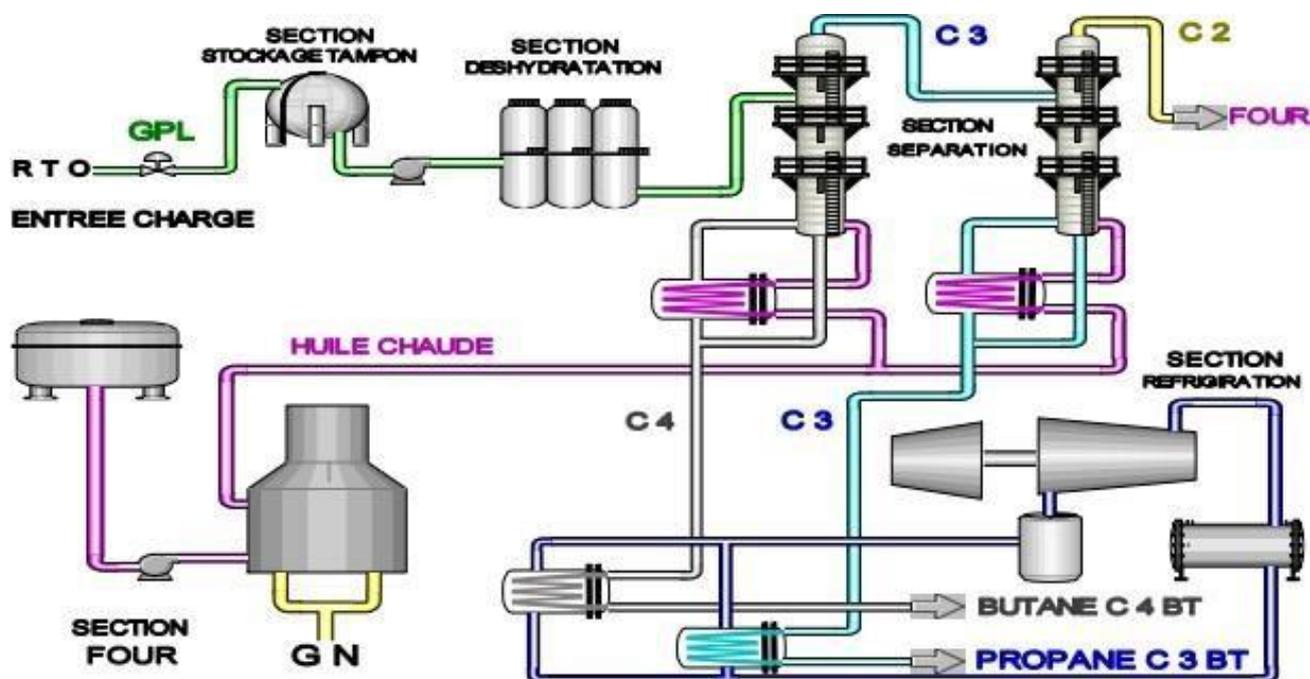


Figure II.6: Schéma de fabrication du GPL

II.4.1. Section déshydratation :

L'objectif de cette section est de diminuer la quantité d'eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à 5 ppm en poids afin de prévenir la formation de givre. Cette section est équipée de trois colonnes d'adsorption à tamis moléculaires, avec une colonne en service (en adsorption) à tout moment, une autre en cours de régénération, et la dernière en attente. Le GPL traverse le sécheur de bas en haut pendant l'adsorption, permettant l'extraction de l'humidité à travers les tamis moléculaires. La durée de cette opération est de 36 heures, une fois cette durée dépassée le sécheur passe automatiquement en régénération. [11]

La régénération passe par les séquences suivantes :

- a) **Drainage** (durée 1h) : La vidange du sécheur se fait par l'injection du gaz naturel sous une pression de 20 kg/cm². Le GPL restant est acheminé vers les sphères de charge.
- b) **Dépressurisation** (durée 30 mn) : Cette séquence sert à réduire la pression du sécheur de 20 kg/cm² à 3 kg/cm² et cela se fait par l'évacuation de GN contenu dans le sécheur
- c) **Chauffage** (durée 1h) : Le réchauffage se fait par le GN chauffé dans le four à une température de 280°C. Il passe dans le sécheur de haut en bas pour évaporer l'eau contenue dans les tamis moléculaires.
- d) **Refroidissement** (durée 5h) : Le sécheur est refroidi par le GN porté à une température de 12 à 45 °C et une pression de 3kg/cm².
- e) **Pressurisation** (durée 30 min) : Avant le remplissage de la colonne par le GPL, il faut atteindre une pression de service de. Cette opération se fait par l'introduction de GN à haute pression pour atteindre une pression de service de 20 kg/cm².
- f) **Remplissage** : Cette opération consiste à mettre le sécheur en attente.



Figure II.7:section de déshydratation.

II.4.2. Section séparation :

C'est la section qui assure la séparation du GPL en deux produits finis, Propane et Butane. Après avoir passé par trois préchauffeurs, le GPL déshydraté est préchauffé à une température de 71°C, ensuite il passe directement dans le fractionnateur (plateaux à clapets) où il est séparé en (propane + éthane) en tête de colonne et en (butane + pentane) au fond de la colonne. Le produit de tête du fractionnateur est envoyé à l'aide d'une pompe vers le dééthaniseur afin de réduire sa teneur en éthane. Le gaz riche en éthane sortant de la partie supérieure du dééthaniseur est utilisé comme combustible du four. Le propane sortant de la partie inférieure du dééthaniseur est canalisé vers la section réfrigération.

Le produit de fond du fractionnateur est envoyé vers le débutaniseur commun à l'ensemble des trains afin de réduire sa teneur en pentane. Le butane sortant de la tête de débutaniseur, est envoyé à la section de réfrigération. Le pentane recueilli du fond du débutaniseur sera refroidi par aéroréfrigérant et envoyé vers le stockage ambiant.

Le produit de fond du fractionnateur est envoyé vers le débutaniseur commun à l'ensemble des trains afin de réduire sa teneur en pentane. Le butane sortant de la tête de débutaniseur, est envoyé à la section de réfrigération. Le pentane recueilli du fond du débutaniseur sera refroidi par aéroréfrigérant et envoyé vers le stockage ambiant.



Figure II.8:Section de séparation.

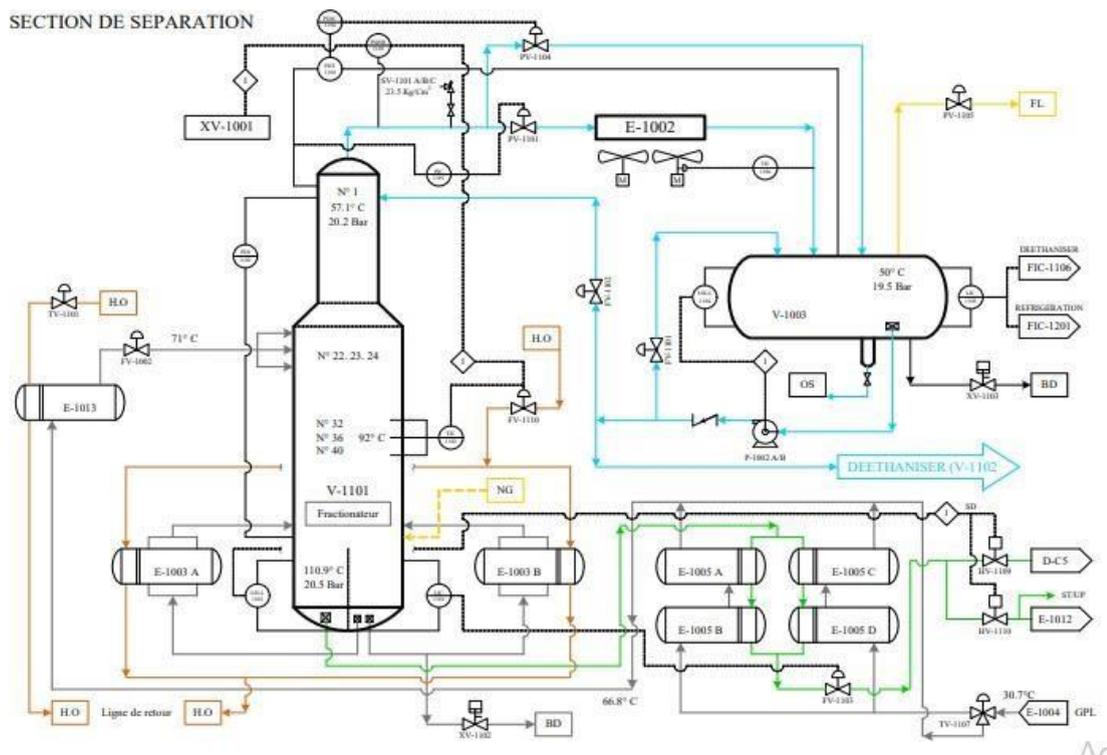


Figure II.9: Schéma représentatif de la section de séparation

II.4.3. Section réfrigération :

La section de réfrigération a pour objectif de refroidir les produits finis à leurs températures de stockage respectives, soit -40°C pour le propane et -8°C pour le butane. Ce processus de refroidissement se déroule en trois étapes : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Le système de réfrigération fonctionne selon un circuit fermé, utilisant du propane pur comme fluide réfrigérant.

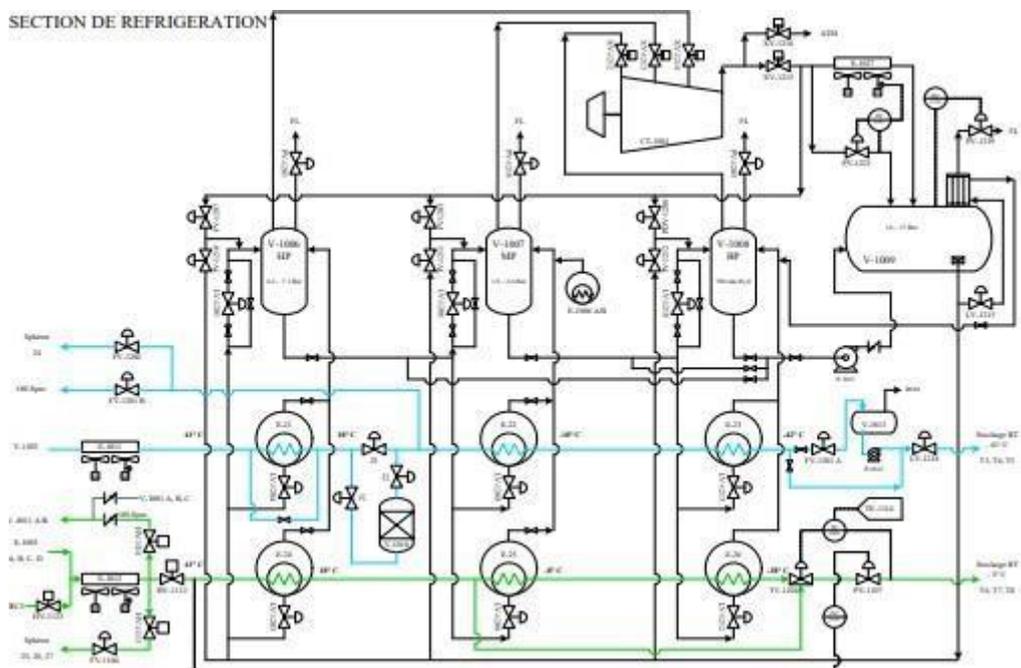


Figure II.10:schéma représentatif de la section de réfrigération

II.4.4. Section d'huile chaude :

Cette section de fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour le troisième préchauffeur et les rebouilleurs de la section de déshydratation. L'huile circule en boucle fermée à une température de 180°C, cette température est atteinte grâce à un four, ce dernier est également utilisé pour chauffer le GN de la section de déshydratation.

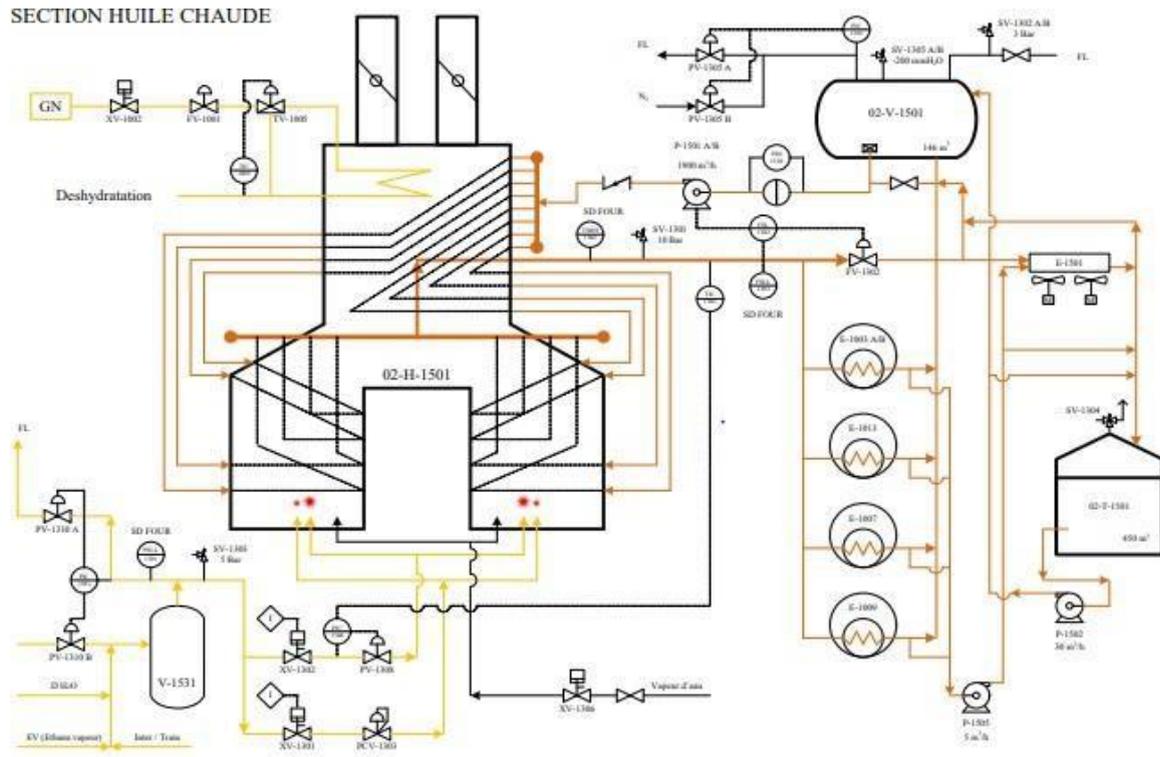


Figure II.11:schéma représentatif de la section d'huile chaude

CHAPITRE III : section de réfrigération.

III.1. Introduction :

Le propane et le butane produits par fractionnement dans la section de séparation sont introduits dans la section de réfrigération, où ces produits sont refroidis à leurs températures de stockage respectives par trois refroidisseurs associés aux différents étages d'un compresseur. Le propane utilisé comme fluide réfrigérant est fourni à ces refroidisseurs et au condenseur du dé-éthaniseur. Les vapeurs qui en résultent sont comprimés en trois étages, condensées puis reprises par les utilisateurs, sous forme d'une seule boucle fermée de réfrigération. [12]

III.2. Généralités sur les techniques de production de froid :

Il existe diverses méthodes pour générer du froid, toutes basées sur le transfert de chaleur (calories) du système à refroidir vers l'environnement. La technologie la plus couramment utilisée dans la plupart des réfrigérateurs domestiques et de nombreuses applications industrielles est la réfrigération à compression de vapeur. [13]

III.2.1 Présentation du processus de cycle frigorifique :

Le cycle frigorifique est le processus fondamental permettant le transfert de chaleur d'un espace à basse température vers un espace à haute température, en utilisant un fluide frigorigène comme agent de transfert thermique. Il est largement utilisé dans les systèmes de réfrigération et de climatisation pour maintenir des températures contrôlées dans divers environnements.

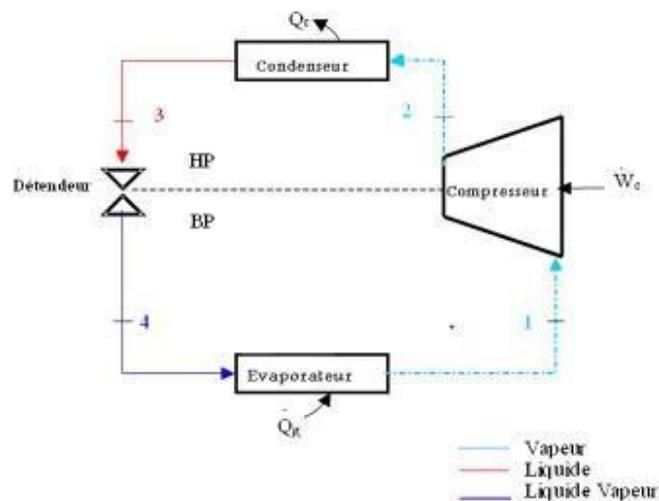


Figure III.1:schéma d'un cycle frigorifique :

Voici une description du cycle frigorifique :

1. Compression :

Le cycle frigorifique commence par la compression du fluide frigorigène. Le compresseur comprime le fluide frigorigène gazeux, augmentant ainsi sa pression et sa température. Le compresseur est alimenté par un moteur fournissant l'énergie nécessaire pour effectuer la compression.

2. Condensation :

Après compression, le fluide frigorigène sous haute pression et haute température passe dans

le condenseur. Dans cette phase, le fluide frigorigène cède de la chaleur à l'environnement extérieur, conduisant à sa condensation en liquide. Pendant cette étape, le fluide frigorigène se refroidit et sa température diminue.

3. Détente :

Après la condensation, le fluide frigorigène liquide à haute pression passe à travers une vanne de détente, également appelée détendeur. Cette vanne permet de réduire la pression du fluide frigorigène de manière contrôlée, ce qui entraîne une diminution de sa température et de sa pression.

4. Évaporation :

Après la détente, le fluide frigorigène passe à travers l'évaporateur. Dans cette phase, le fluide frigorigène absorbe la chaleur de l'environnement à basse température, entraînant son évaporation en gaz. Pendant ce processus, le fluide frigorigène se réchauffe en absorbant la chaleur provenant de l'extérieur de l'appareil.

Ce processus de cycle se répète continuellement pour maintenir le transfert de chaleur du milieu à basse température vers le milieu à haute température. Le cycle frigorifique permet de créer un flux de chaleur contrôlé et de maintenir des températures désirées dans divers environnements.

Il est important de noter que le choix du fluide frigorigène ainsi que les caractéristiques du compresseur, du condenseur, du détendeur et de l'évaporateur peuvent varier en fonction de l'application spécifique du système de réfrigération ou de climatisation. Divers types de cycles frigorifiques existent, tels que :

- ✚ Les cycles à compression de vapeur.
- ✚ Les cycles à absorption.
- ✚ Les cycles à air.

Chacun présentant ses propres avantages et adapté à des applications spécifiques.

III.2.2 Les différents types des cycles frigorifiques :

III.2.2.1 Le cycle frigorifique à adsorption d'ammoniac :

C'est une méthode de production de froid qui repose sur l'utilisation de l'ammoniac (NH_3) comme fluide frigorigène et sur le principe de l'adsorption. Voici comment fonctionne ce cycle :

1. Évaporation de l'ammoniac : Au début du cycle, l'ammoniac s'évapore dans l'évaporateur en absorbant la chaleur de l'environnement à basse température. Cela permet de maintenir des températures basses.

2. Adsorption de l'ammoniac : Le gaz d'ammoniac est ensuite adsorbé par un matériau adsorbant solide, comme le charbon actif ou la silice gel, formant un mélange solide d'ammoniac.

3. Désorption de l'ammoniac : Lorsque le matériau adsorbant est chauffé, l'ammoniac est libéré sous forme de gaz. Ce processus de désorption permet de récupérer l'ammoniac.

4. Condensation de l'ammoniac : L'ammoniac résorbée passe ensuite dans le condenseur, où il est refroidi et condensé à haute pression. Pendant ce processus, l'ammoniac libère la chaleur absorbée précédemment, assurant ainsi un transfert de chaleur vers l'environnement à haute température.

5. Recyclage de l'ammoniac : L'ammoniac liquide à haute pression est ensuite détendu par un détendeur pour revenir à une pression basse, ce qui le prépare à être réutilisé dans l'évaporateur pour recommencer le cycle.

Ce cycle utilise principalement la chaleur résiduelle, comme la chaleur solaire ou industrielle, pour le processus de désorption, ce qui en fait une option intéressante pour les applications nécessitant une source de chaleur externe. De plus, l'utilisation de l'ammoniac comme fluide frigorigène présente des avantages environnementaux car il s'agit d'un gaz naturel avec un impact limité sur la couche d'ozone et le réchauffement climatique.

- **Les avantages :**

Le cycle frigorifique à adsorption d'ammoniac est largement utilisé dans diverses applications industrielles telles que la réfrigération, le conditionnement d'air et la production de froid pour des applications commerciales variées. Il offre une alternative efficace et respectueuse de l'environnement aux systèmes de réfrigération traditionnels basés sur des fluides frigorigènes synthétiques.

III.2.2.2 Le cycle frigorifique à air :

Le cycle frigorifique à air est une méthode de refroidissement qui utilise directement l'air comme fluide frigorigène. Voici comment fonctionne ce cycle :

1. Compression de l'air : L'air est comprimé par un compresseur pour augmenter sa pression et sa température, augmentant ainsi son potentiel énergétique. Ensuite, il est refroidi pour réduire sa température.

2. Condensation de l'air : L'air comprimé libère de la chaleur dans un condenseur, ce qui le refroidit et provoque la condensation de son humidité.

3. Expansion de l'air : L'air à haute pression et température réduite passe par une vanne de détente, abaissant davantage sa pression et sa température.

4. Évaporation de l'air : L'air à basse pression et basse température absorbe la chaleur de l'environnement dans un évaporateur, provoquant l'évaporation de son humidité et abaissant encore sa température.

- **Les avantages :**

Les avantages du cycle frigorifique à air résident dans sa simplicité, son coût réduit et sa facilité d'entretien. Étant donné que l'air est directement utilisé comme fluide frigorigène, il n'y a pas besoin de manipuler des fluides frigorigènes spécifiques ni de mettre en place des systèmes de récupération de chaleur complexes. Cependant, il est important de noter que ce cycle peut présenter des performances légèrement inférieures à celles des systèmes utilisant des fluides frigorigènes spécifiques, en raison de la capacité de refroidissement relativement limitée de l'air comparée à certains autres fluides frigorigènes.

III.3. La loi des gaz parfaits :

Appelée aussi équation des gaz parfaits, est un principe fondamental en thermodynamique qui explique le comportement des gaz dans des conditions standard. Elle est cruciale pour appréhender les caractéristiques thermodynamiques des gaz, comme leur pression, leur

volume et leur température. Cette loi peut être formulée mathématiquement par l'équation classique :

$$PV = nRT$$

- P représente la pression du gaz en pascals (Pa).
- V représente le volume occupé par le gaz en mètres cubes (m³).
- n représente la quantité de matière du gaz en moles (mol).
- R est la constante des gaz parfaits, qui est égale à 8,314 J/ (mol · K)
- T représente la température du gaz en kelvins (K).

Selon la loi des gaz parfaits, à température et quantité de matière constantes, le produit de la pression et du volume d'un gaz est proportionnel à sa température absolue. En d'autres termes, lorsque la température d'un gaz augmente, sa pression et son volume augmentent également, et vice versa à condition que la quantité de matière reste constante.

III.4. Le diagramme de Mollier :

Également appelé diagramme enthalpique, constitue un outil graphique fondamental en thermodynamique pour l'analyse et la représentation des transformations des fluides. Il tire son nom de Richard Mollier, un précurseur dans le domaine de l'ingénierie thermique. Ce diagramme représente l'enthalpie, qui mesure l'énergie totale d'un fluide, sur l'axe horizontal, tandis que l'entropie ou la pression est représentée sur l'axe vertical. Les diverses courbes dans ce diagramme reflètent des paramètres tels que la température, la pression, le volume spécifique, l'humidité relative et la qualité du fluide, qui correspond à la proportion de vapeur dans un mélange de vapeur et de liquide. L'un des principaux atouts du diagramme de Mollier réside dans sa capacité à offrir une représentation visuelle claire des processus thermodynamiques, tels que la compression, la détente, le chauffage et le refroidissement. Par exemple, dans le contexte de la réfrigération, le cycle frigorifique peut être aisément tracé sur le diagramme de Mollier, permettant ainsi d'observer de manière précise les variations de l'enthalpie et de la pression du fluide frigorigène à chaque étape du cycle.

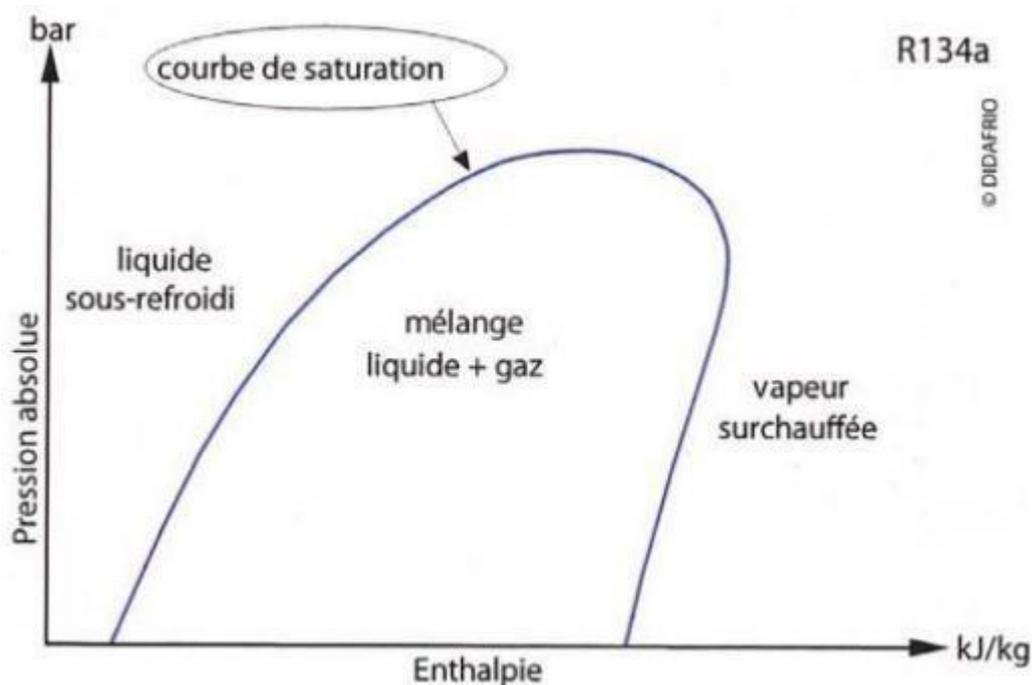


Figure III.2: diagramme de mollier.

III.5. Les composants du circuit frigorifique :

Les éléments fondamentaux du circuit frigorifique comprennent le compresseur, l'évaporateur, le condenseur et le détendeur. Il est essentiel que ces composants soient correctement connectés pour assurer le fonctionnement optimal du système de refroidissement, avec l'intégration adéquate du réfrigérant.

III.5.1. Le Compresseur :

Le compresseur joue un rôle crucial dans le fonctionnement du circuit. Il assure la circulation du fluide frigorigène en le comprimant. En effet, le compresseur aspire la vapeur à basse pression provenant de l'évaporateur, la comprime, puis la refoule sous forme de vapeur à haute pression vers le condenseur. Il existe divers types de compresseurs notamment :

III.5.1.1. Les compresseurs à piston :

Sont principalement utilisés dans les réfrigérateurs domestiques, mais on les retrouve également dans les applications de froid commercial, notamment de faible et moyenne puissance, ainsi que dans les groupes de production d'eau glacée utilisés dans les centrales de traitement d'air. Ils peuvent également être présents dans les installations de réfrigération industrielles plus anciennes.



Figure III.3: compresseur à piston

III.5.1.2. Les compresseurs à spirale :

Également connus sous le nom de compresseurs scroll, sont couramment utilisés dans les climatiseurs en raison de leur discrétion sonore. Leur forme allongée les rend reconnaissables. Ils sont principalement utilisés dans les systèmes de climatisation, tels que les systèmes split, multi-split, etc. De plus, ils peuvent être utilisés comme unité centrale pour alimenter le fonctionnement des centrales de traitement d'air à travers un fluide caloporteur, généralement de l'eau pure ou du glycol.



Figure III.4 : Le compresseur à spirale

III.5.1.3. Le compresseur à vis :

Également appelé hélico-compresseur, est classé parmi les machines volumétriques de type rotatif. Depuis 1976, les compresseurs à vis ont connu un développement significatif à l'échelle mondiale dans divers domaines du froid. Ces dernières années, une nouvelle génération de compresseurs à vis de petite et moyenne puissance a émergé, couvrant même le domaine des compresseurs à pistons de moyenne puissance en raison de leur efficacité et des progrès réalisés dans l'amélioration du rendement.

Les compresseurs à vis se divisent en deux sous-catégories : les birotors et les mono rotors.



Figure III.5 : Le compresseur à spirale

III.5.1.4. Le compresseur centrifuge :

Également connu sous le nom de turbocompresseur, est une turbomachine de type radial. Il se compose d'un rotor animé d'une vitesse de rotation uniforme, à travers lequel le fluide s'écoule de manière continue. Les caractéristiques fondamentales des turbomachines sont une vitesse de rotation uniforme et un écoulement constant. Ce compresseur tire parti de l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide, générée par la force centrifuge due à la grande vitesse périphérique à laquelle le fluide quitte les pales du rotor. À la sortie de la roue, le fluide entre dans un diffuseur où sa vitesse est convertie en pression.

En termes de composition, un compresseur centrifuge comprend un ensemble mobile composé d'un arbre et d'une roue à aubes, ainsi qu'un jeu d'aubes de pré-rotation situé à l'entrée du compresseur.

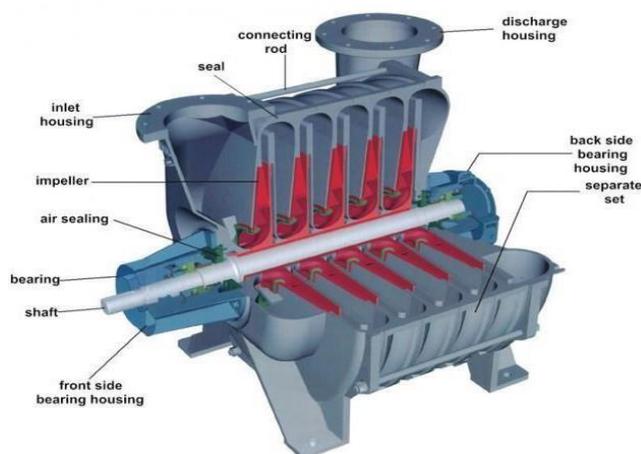


Figure III.6 : Le compresseur centrifuge

III.5.2. Echangeur de chaleur (Évaporateur et condenseur) :

Un échangeur de chaleur est un dispositif conçu pour transférer la chaleur entre deux fluides ayant des températures différentes. Ce transfert de chaleur s'effectue à travers une paroi solide, sans mélange direct des fluides. De nombreuses applications requièrent l'utilisation d'un échangeur de chaleur, telles que les radiateurs, les condenseurs et les évaporateurs.

III.5.2.1. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. Les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil.

III.5.2.2. Les types d'échangeurs

- Echangeurs à chaleur spiralés
- Echangeurs à tube et ailettes
- Aérothermes industriels (aéro-réfrigérants)
- Echangeurs thermiques à surfaces raclée
- Echangeurs rotatifs
- Echangeurs à changement de phase (caloduc)
- Echangeurs à blocs
- Echangeurs compact.
- Echangeur à plaque

1. Échangeur tubulaire :

C'est le type d'échangeur le plus répandu dans l'industrie, également appelé échangeur à tubes et calandre. Un échangeur tubulaire est un dispositif thermique où circulent deux fluides, généralement liquides, qui échangent de la chaleur. Dans certains cas, ils peuvent changer de phase (évaporation ou condensation). Il existe trois types principaux d'échangeurs tubulaires :

2. L'échangeur coaxial :

C'est le plus simple des échangeurs à deux fluides séparés. Il se compose de deux tubes coaxiaux. Le premier fluide circule dans le tube intérieur, tandis que le second circule dans l'espace annulaire formé par les deux tubes. Cependant, l'inconvénient majeur de ce type d'échangeur est qu'il peut devenir très encombrant.

3. Échangeurs à double tubes :

Les échangeurs de chaleur tubulaires à doubles tubes consistent généralement en deux tuyaux concentriques dont le tuyau interne peut être sans ou avec ailettes. Un fluide circule dans le tuyau intérieur et l'autre fluide dans l'espace entre les deux tuyaux dans la direction contraire

pour une plus haute performance par unité de surface de contact. C'est probablement le plus simple des échangeurs envisageables. La distribution des écoulements est simple et le nettoyage peut facilement être fait en désassemblant l'échangeur.

4. L'échangeur à calandre et tubes :

Il est constitué d'un ensemble de tubes agencés dans une structure en forme de calandre, facilitant ainsi le transfert de chaleur entre le fluide circulant à l'intérieur des tubes et celui se déplaçant dans la calandre. Ce type d'échangeur présente l'avantage de minimiser les problèmes d'encombrement, car sa surface d'échange peut atteindre jusqu'à 300 mètres carrés. De ce fait, il est largement adopté par l'industrie pour sa compacité et son efficacité.

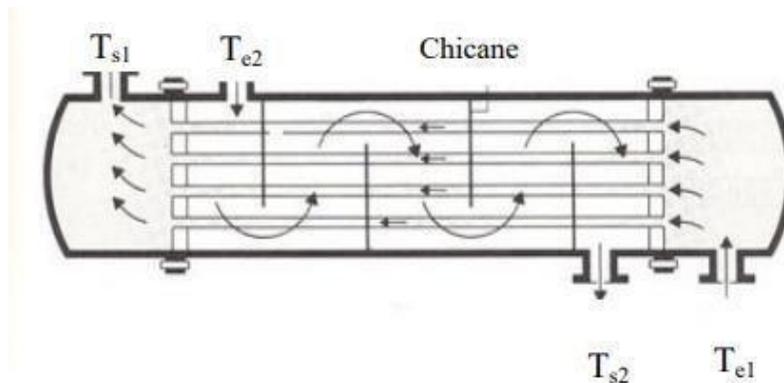


Figure III.7 : L'échangeur à calandre et tubes

III.5.3. Le détendeur :

III.5.3.1. La détente

C'est une étape cruciale du cycle frigorifique qui se produit après la compression du fluide frigorigène et avant son entrée dans l'évaporateur. Elle joue un rôle essentiel dans le processus de refroidissement et de transformation du fluide frigorigène.

III.5.3.2. Objectif de la détente :

Elle consiste à réduire la pression du fluide frigorigène après la compression. Cela permet de préparer le fluide frigorigène à entrer dans l'évaporateur où il va absorber la chaleur de l'environnement à basse température. En réduisant la pression du fluide frigorigène, on facilite son expansion et sa transformation de l'état de liquide vers l'état gazeux, ce qui est essentiel pour le processus de refroidissement.

III.5.3.2. Types de détendeurs :

Il existe plusieurs méthodes de détendeurs utilisées dans les systèmes de réfrigération et de climatisation, telles que

- ✚ Les détendeurs thermostatiques
- ✚ Les détendeurs électroniques
- ✚ Les détendeurs capillaires
- ✚ Les vannes d'expansion thermiques

III.5.3.3. Effets de la détente :

La détente induit une baisse de pression et, par conséquent, une diminution de température du fluide frigorigène. C'est ce qu'on appelle la détente adiabatique. La détente adiabatique provoque un refroidissement supplémentaire du fluide frigorigène, ce qui le prépare à absorber la chaleur de l'environnement à basse température dans l'évaporateur. La détente permet également de réguler le débit du fluide frigorigène, assurant ainsi un échange de chaleur efficace et un bon fonctionnement de l'évaporateur.

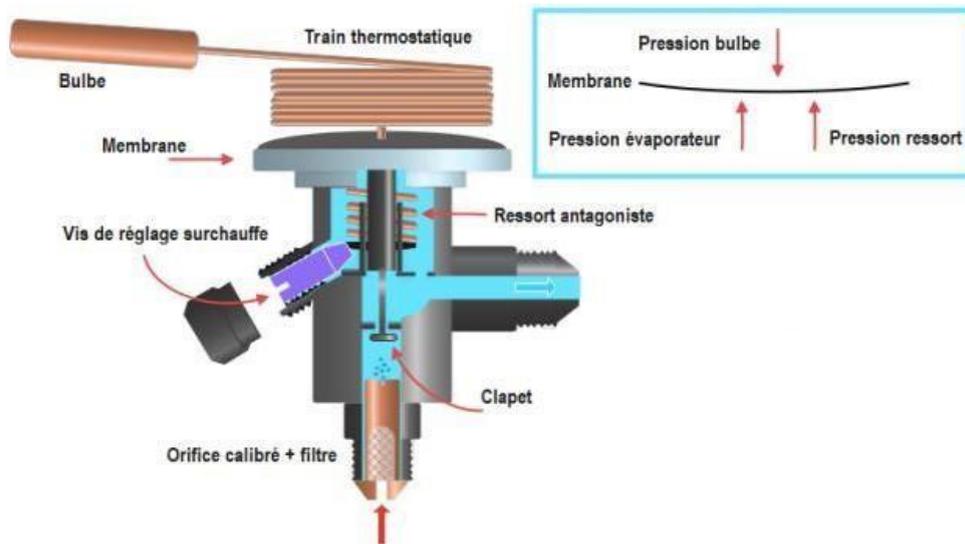


Figure III.8: Détendeur

III.6. Les fluides frigorigènes :

Les machines frigorifiques échangent de l'énergie avec leur environnement en utilisant un fluide frigorigène. Ce fluide, qui peut être une substance chimique ou un mélange de substances, possède la particularité d'avoir une température d'évaporation inférieure à celle de l'air ambiant. Il est choisi pour ses propriétés physiques qui permettent l'utilisation d'un cycle de compression et de détente pour transférer de la chaleur. Les réfrigérants, caractérisés par leur basse température d'évaporation sous pression atmosphérique, sont employés pour abaisser la température des appareils de réfrigération tels que les réfrigérateurs, les congélateurs et les climatiseurs. De plus, dans ces dispositifs, le réfrigérant est également utilisé pour le transport de l'huile du compresseur.

Tableau III.1 :les températures d'évaporation (ou d'ébullition) de certains fluides frigorigènes

Fluides réfrigérant		Température d'ébullition °C
Eau	R718	100
Le trichloro fluoro méthane	R11	24
Dichloro difluoro méthane	R12	-29.8
Chloro difluoro méthane	R22	-40
Propane	R290	-40
Ammoniac NH ₃	R717	-33.3

III.7. Description de la section de réfrigération :

II.7.1 Principe :

La réfrigération dans le système propane est produite par la détente isenthalpique du propane liquide, lorsque la pression du liquide diminue, une partie de celui-ci se vaporise, ce qui exerce un effet de refroidissement sur le liquide, puisque le propane circulant est de composition pur, la température de saturation du réfrigérant dépend directement de la pression opératoire, ainsi à chaque niveau de réfrigération de propane correspondent une température et une pression donnée.

La chaleur est transférée au réfrigérant propane par ébullition isotherme dans le côté calandre de l'échangeur de chaleur approprié. Lors de ce processus, le réfrigérant absorbe la chaleur pendant son évaporation. [12]

III.7.2. Capacité nominale de réfrigération :

- ✚ Cette section est conçue pour pouvoir réfrigérer un million de tonnes par an et par train, de butane et de propane commerciaux produits en continu par fractionnement d'une charge d'alimentation quelconque provenant des douze sources sélectionnées comme base de calcul pour l'usine.
- ✚ Le propane et le butane produits par la SECTION DE SEPRATION sont pré refroidis à 43°C par des aéro réfrigérants et envoyés dans la SECTION DE REFRIGERATION là, le propane produit est refroidi à -38°C et le butane produit est refroidi au maximum à -19°.

III.7.3. Les équipements principaux :

a. Les échangeurs de chaleur :

- ✚ a.1. Echangeur de chaleur à faisceau et calandre :
 - Refroidisseurs de propane :(E-1021, E-1022, E-1023).
 - Refroidisseurs de propane :(E-1024, E-1025, E-1026).

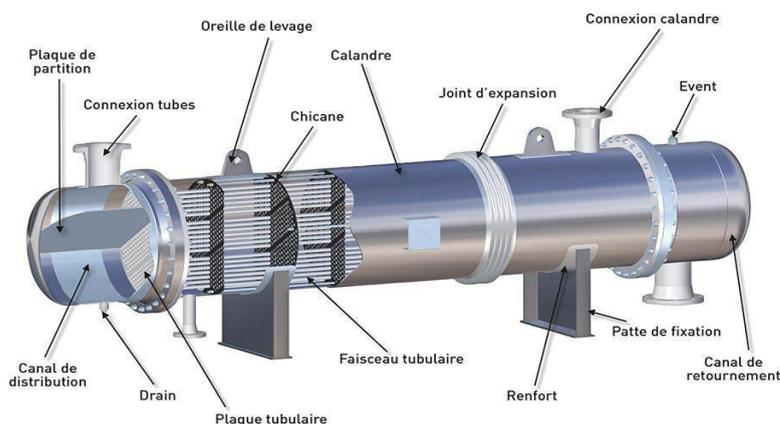


Figure III.9: Echangeur de chaleur à faisceau et calandre

✚ a.2. Aéro réfrigérants :

Condensateur de propane : (E-1027), assure la condensation des vapeurs du Propane réfrigérant provenant du compresseur.



Figure III.10: Une série des aéro-réfrigérants

b. Ballons :

- ✚ b.1. 3 Ballons d'aspiration du compresseur disposés verticalement :
 - 02-V-1006 : ballon haute pression HP avec une capacité de 63m³
 - 02-V-1007 : ballons moyenne pression MP avec une capacité de 17m³
 - 02-V-1008 : ballons basse pression BP avec une capacité de 11m³

Pendant le démarrage l'étage BP est sollicité par une charge de vapeur plus forte qu'en service normal. Le temps de rétention du liquide est de 10 min pour la charge liquide maximale.

✚ b.2. Accumulateur de propane 02-V-1009

Un ballon d'une capacité de 130.2 m³ disposé horizontalement. Le volume du récipient est calculé pour pouvoir contenir la totalité des inventaires liquides de la section réfrigération, le temps de rétention du liquide est de 17 min dans le cas de la charge de réfrigération max.

c. Compresseur

01 compresseur centrifuge (C-1001) à trois étages (haute, moyenne et basse) pression le compresseur aspire le propane évaporé provenant des trois ballons d'aspiration puis il le refoule pour être condensé. Le compresseur est entraîné par une turbine à gaz

Le compresseur C-5001 est accouplé directement au moteur électrique CM-5001. Les caractéristiques principales de leurs auxiliaires sont les suivantes :

- Le système commun de lubrification pour le compresseur, le moteur électrique et le système d'engrenage est prévu.
- Le Système d'étanchéité est conçu pour être compatible avec la pression maximale du corps du compresseur, soit 13 kg/cm²G. Dans le cas où les vannes de contre d'aspiration est laissée ouverte pendant un certain temps, sans perte de réfrigérant pour le corps du compresseur.



Figure III.11: Section de réfrigération aux niveaux du complexe GP1Z

III.7.4. Les avantages du propane réfrigérant :

- Haute efficacité énergétique :

Le R290, en tant que fluide frigorigène, se distingue par son efficacité énergétique élevée, ce qui implique qu'il nécessite moins d'énergie pour produire la même capacité de refroidissement que d'autres fluides similaires. Cette caractéristique se traduit par des économies d'énergie significatives et une réduction des coûts d'exploitation pour les utilisateurs.

- Fonctionnement à basse pression :

Les systèmes de réfrigération utilisant du gaz propane peuvent fonctionner à des pressions plus basses par rapport à ceux qui utilisent d'autres types de fluides frigorigènes. Cette particularité réduit la contrainte exercée sur les composants de l'installation et peut prolonger la durée de vie des équipements.

- Potentiel de réchauffement global (PRG) réduit :

Le propane présente un potentiel de réchauffement global (PRG) relativement bas, évalué à 3, ce qui le distingue des autres fluides frigorigènes plus courants tels que les hydrofluorocarbures (HFC). Cette caractéristique en fait une option plus respectueuse de l'environnement, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

- Compatibilité avec les équipements existants :

Dans de nombreux cas, il est possible de convertir les installations frigorifiques existantes pour les faire fonctionner avec du gaz propane, évitant ainsi le besoin de remplacer entièrement le système. Cette compatibilité permet de bénéficier des avantages du gaz propane sans engager des coûts considérables de remplacement.

- Stabilité thermique :
IL offre une stabilité thermique exceptionnelle, assurant ainsi le maintien d'une température constante et uniforme dans l'installation de réfrigération.

III.8. DESCRIPTION DU PROCEDE :

La section de réfrigération est alimentée en butane et propane, tels que produits par la section de séparation.

III.8.1. Circuit du butane commercial :

Le butane commercial sortant de la section de séparation est refroidi dans l'aéro réfrigérant E-1012 à une température de 43°C avant d'atteindre la section suivante. Initialement, le butane commercial est introduit du côté tubes du refroidisseur primaire E1024, associé à la partie haute pression (HP) du circuit. Il cède de la chaleur au propane réfrigérant circulant dans la calandre, ce qui entraîne une diminution de sa température jusqu'à environ 21°C. À partir de E-1024, le butane passe au refroidisseur secondaire E-1025, où il est refroidi à -4°C par le propane réfrigérant de l'étage moyenne pression de la boucle de froid. Ensuite, le butane s'écoule vers le refroidisseur final E-5026, associé à l'étage basse pression (BP) de la boucle froide. La température d'écoulement du butane est contrôlée au E-1026 en by passant plus ou moins le produit autour du refroidisseur L'expédition du butane commercial vers la section de stockage à basse température est contrôlée à la limite de batterie de la section de réfrigération par un contrôleur de la contre pression (PIC-5107) dans la ligne d'alimentation de butane de la section. Le débit en butane provenant des 4 trains est mélangé dans un collecteur commun afin de produire un mélange homogène du butane commercial dépentanisé et non dépentanisé.

III.8.2. Circuit du propane commercial :

Le propane commercial sortant de la section de séparation est refroidi dans l'aéro réfrigérants (E-1011) à une température de 43°C avant de parvenir dans la section de réfrigération. Le propane entrant dans la section est d'abord refroidi à 21°C par le refroidisseur primaire de propane E-1021 associé à l'étage HP, avant du circuit réfrigérant. Le propane pré refroidi entre alors dans l'unité de déshydratation de garde, pour assurer un séchage complet du produit à 1 ppm, avant de pénétrer dans la section froide de l'unité.

A.N : Le système ne dispose pas l'unité de déshydratation de garde pour le butane, parce qu'une petite quantité d'eau contenue dans la charge d'alimentation GPL qui a déjà passé l'unité de déshydratation de charge a une tendance de s'accumuler dans le ballon de reflux de la colonne de fractionnement, et n'entre pas dans le produit du fond (butane).

A la sortie de l'unité de déshydratation de garde, le débit de propane est mesuré par le contrôleur du débit du produit réfrigéré, asservi au niveau dans le fond du dé-éthaniseur avant d'entrer dans le refroidisseur secondaire E-1022. E-1022 est associé à l'étage Moyenne Pression de la boucle de froid, le propane produit est refroidit à -4°C. De E-1022, le propane passe dans le refroidisseur final E-1023, où il est refroidi à la température la plus basse de -38°C.

A la sortie de E-5023, le débit de propane commercial produit est étranglé par la vanne de contrôle de débit FV5201 du produit refroidi qui maintient une contre pression suffisante dans la ligne, afin d'éviter une détente prématurée du produit.

Le transfert du propane commercial vers la section de stockage sous pression, se fait aussi à la

sortie de l'unité de déshydratation de garde. Le propane est soutiré d'une manière intermittente sous contrôle de débit.

III.8.3. Circuit du propane réfrigérant :

Le fluide réfrigérant des six refroidisseurs est fourni par un circuit fermé de propane fonctionnant sous trois niveaux de pression distants.

L'étage BP fournit le niveau de température la plus basse, soit -41°C et fonctionne légèrement au-dessus de la pression atmosphérique à l'aspiration du compresseur

L'étage MP fournit un niveau de température intermédiaire de -8°C , et constitue la première alimentation latérale du compresseur C-1001.

L'étage HP fournit le niveau de température le plus élevé du fluide réfrigérant soit 18°C et constitue la deuxième alimentation latérale de C-1001.

1) La compression :

La vapeur froide de propane passe vers l'aspiration du compresseur C-1001, elle est aspirée du premier étage et passe dans les premiers impulseurs, sa pression atteindra celle du deuxième étage. Après le passage dans la première roue à diaphragmes, il se mélange au gaz aspiré du deuxième étage et passe dans les deuxièmes impulseurs. Cette opération se répète dans le troisième étage où les gaz cumulés afin d'atteindre la pression de refoulement (environ de 16 bars).

2) La condensation :

La compression entraîne une augmentation proportionnelle de la température jusqu'à 60°C . Les vapeurs à haute pression sont ensuite condensées dans l'aérocondenseur E-1027, avec le condensat recueilli dans l'accumulateur de propane V-1009 avant d'être recyclé dans la boucle de réfrigération.

3) La détente :

Le liquide de propane refroidi et sous haute pression traverse ensuite le détendeur, un dispositif qui réduit la pression du liquide en le faisant passer à travers une ouverture étroite. Lorsque la pression du liquide diminue, sa température diminue également. Ce processus de détente permet d'obtenir un fluide frigorigène à basse température, prêt à absorber la chaleur de l'environnement intérieur de l'installation frigorifique.

4) L'évaporation :

Ensuite le liquide réfrigérant propane est introduit dans le ballon d'aspiration de l'étage HP (V-1006) et les refroidisseurs primaires et secondaires du produit (E-1021 et E-1024), sous contrôle de niveau pour chaque équipement.

La vapeur produite dans les refroidisseurs est ajoutée au liquide réfrigérant évaporé et quitte les refroidisseurs pour le ballon d'aspiration de l'étage HP (V-1006). Cette vapeur se combine avec celle produite par le liquide d'appoint à V-1006 et sort du ballon d'aspiration de l'étage HP pour former la deuxième alimentation latérale du C-1001.

Le réfrigérant refroidi est extrait de V-1006 vers les refroidisseurs secondaires (E-1022 et E-1025), également sous contrôle de niveau. Ce réfrigérant est également extrait de V-1006

comme apport au ballon d'aspiration de l'étage MP (V-1007).

La vapeur froide produite dans les condenseurs (E-1006 A et B) est également renvoyée à V-1007. L'ensemble de la vapeur de V-1007 constitue la première alimentation latérale du compresseur C-1001.

Le liquide réfrigérant refroidi est extrait de V-1007 pour les refroidisseurs finals (E-1023 et E-1026), également sous contrôle de niveau. La vapeur réfrigérante sortant de ces refroidisseurs est combinée et rejoint le ballon d'aspiration de l'étage BP (V-1008).

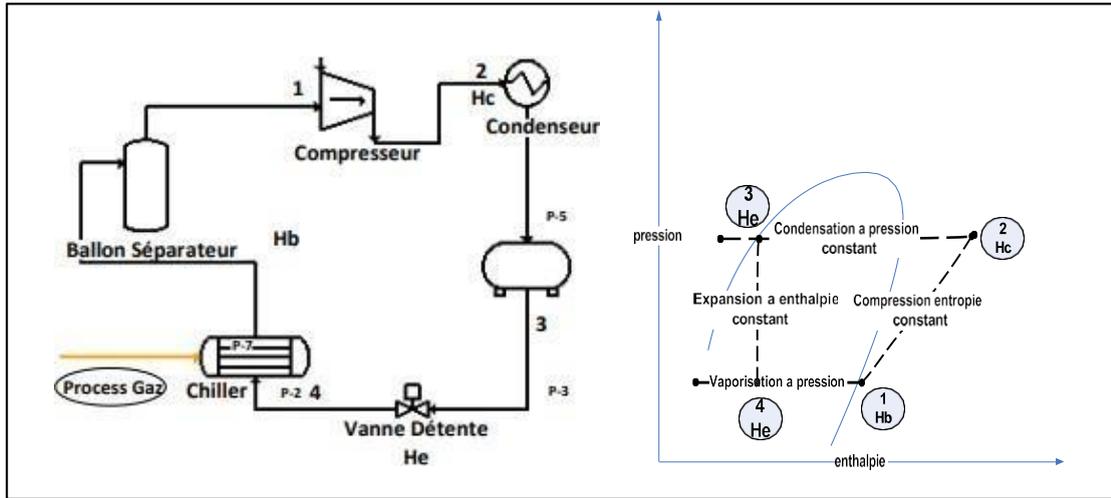


Figure III.12 : Un système de réfrigération typique et le cycle Thermodynamique.

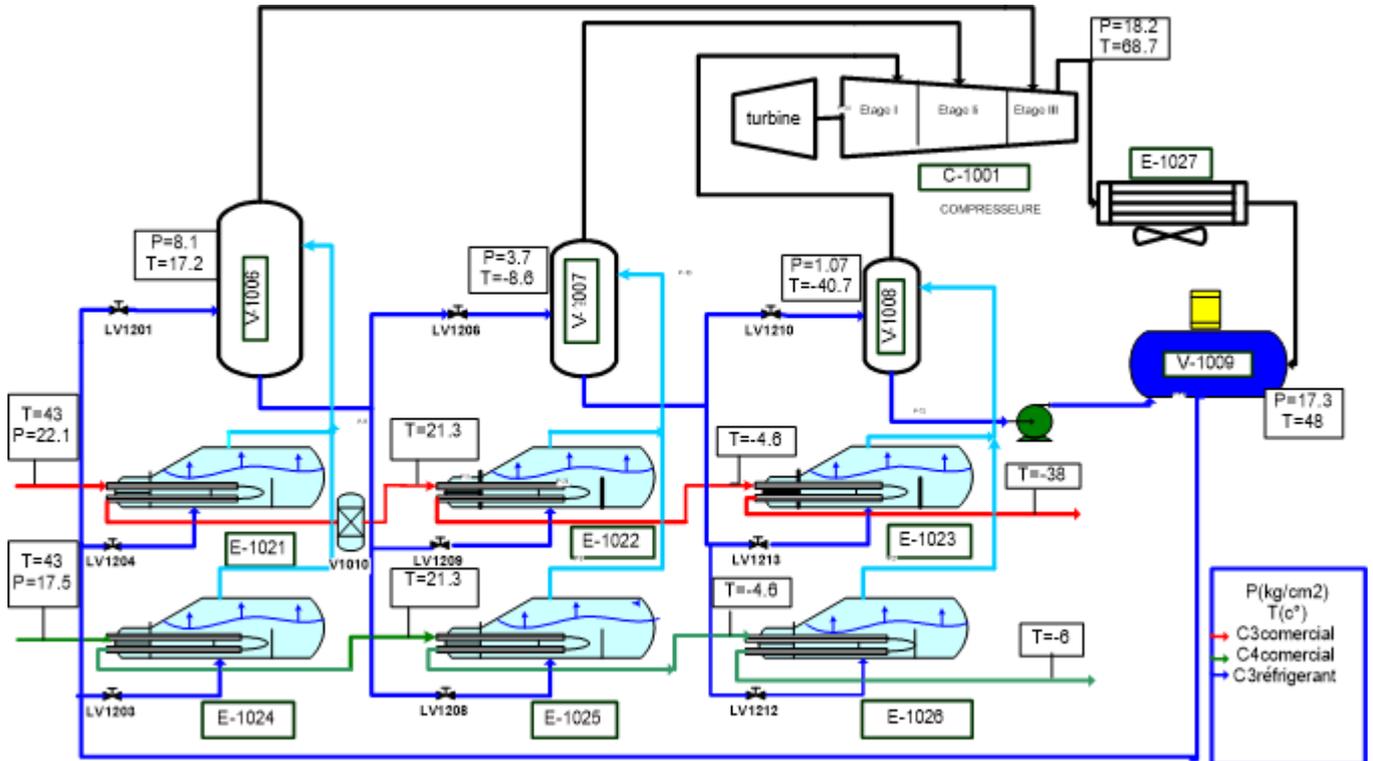


Figure III.13: schéma globale de la section de réfrigération.

III.9. Les déclenchements et les arrêts d'urgence du compresseur C-1001 :

Tableau III.2: les principales causes de déclenchement du compresseur C-1001 :

Causes	Exemples
Niveau de liquide très haut au ballon d'aspiration.	L'arrêt consiste à éviter l'entraînement du liquide vers compresseur
Condition anormales de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Pression très basse à l'aspiration. -Pression très haute au refoulement -Température très haute au refoulement - composition non adéquate
Pannes d'utilités	<ul style="list-style-type: none"> - Panne électrique -Panne d'air d'instrument
Position incorrecte des vannes de bloc du compresseur	L'une des vannes d'arrêt n'est pas ouverte ou fermée totalement.
Déclenchement de la turbine à gaz	<ul style="list-style-type: none"> -Sur vitesse -Vibration forte -Température haute du gaz d'échappement -Panne de la tension de commande de la turbine
Anomalies liées au compresseur	<ul style="list-style-type: none"> -Niveau bas d'huile d'étanchéité -Température haute du palier -Vibration et mouvement axial forts

III.10. Procédure de démarrage de la section de réfrigération :

Après un déclenchement du compresseur, entraînant l'arrêt total de la section de réfrigération, il est nécessaire de suivre la procédure de démarrage suivante :

III.10.1. Mise en marche initiale :

- 1) Toutes les installations d'utilité sont mises en service.
- 2) Le système est purgé, séché et pressurisé avec du gaz naturel.
- 3) Le compresseur et la turbine à gaz sont prêts à démarrer.
- 4) Le compresseur est isolé par les vannes de sectionnement associées.
- 5) La section de séparation est en circulation.
- 6) L'unité de déshydratation est opérationnelle.

III.10.2. Mise en marche normale :

- 1) Vérifier que les vannes nécessaires sont positionnées pour le démarrage.
- 2) Égaliser les pressions des ballons du côté aspiration à 3 kg/cm² absolu.
- 3) Mettre en service le condenseur de propane refroidi par air.
- 4) Ouvrir complètement les vannes de commande de recyclage et de démarrage.
- 5) Démarrer la turbine à gaz en suivant la séquence de mise en marche prévue.
- 6) Augmenter progressivement la vitesse du compresseur jusqu'à atteindre la vitesse nominale.
- 7) Fermer lentement la vanne de démarrage à l'aide du dispositif de réglage manuel.
- 8) Fermer progressivement la vanne de commande du recyclage et activer les systèmes de contrôle anti-pompage et de régulation de la vitesse du compresseur.
- 9) -Introduire le liquide produit dans les refroidisseurs et dans le ballon.

Chapitre IV : Le torchage.

IV.1. Introduction :

Le torchage est une pratique industrielle présente sur les sites de production pétrolière depuis 160 ans. Elle consiste à brûler des gaz naturels ou des gaz associés au pétrole dans des torches (gaz torchés). Non seulement elle contribue au changement climatique, mais elle constitue également un gaspillage de précieuses ressources qui pourraient fournir de l'énergie à des millions d'habitants dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Sa persistance jusqu'à aujourd'hui est due à un certain nombre de contraintes techniques, réglementaires et/ou économiques.

IV.2. Définition des gaz torchés :

Ce sont des gaz naturels ou des gaz associés au pétrole, qui ne peut être traité en vue de sa vente pour des raisons techniques, économiques, de sécurité ou qui ne répond pas aux spécifications requises, brûlés au niveau des torchères avant d'être envoyés vers l'atmosphère.

IV.3. Les raisons de torchage :

Le torchage consiste à brûler du gaz naturel ou associé au pétrole brut qui ne peut être traité en vue de sa vente pour des raisons techniques, économiques ou de sécurité. La disponibilité de torches ou d'évents de dégazage assure l'évacuation des gaz associés d'une manière sécurisée dans le cas des situations d'urgence ou d'arrêt des unités. Lorsqu'il n'y a pas de débouché pour le gaz, le torchage a été historiquement la solution la plus sûre et la plus courante pour l'éliminer.

Le torchage est généralement considéré comme une méthode à la fois sûre et efficace pour se débarrasser du gaz naturel qui ne répond pas aux spécifications requises, souvent associé à la production de gaz de pétrole liquéfié (GPL). Cette méthode est couramment utilisée pour éliminer les gaz inflammables inutilisables et pour dépressuriser l'équipement ou les sections de traitement des gaz lors des activités normales de maintenance ou en cas d'urgence ou de démarrage. [14]



Figure IV.1 : Brulage des gaz torchés au niveau de la torche

IV.4. Les sources des gaz torchés :

- Gaz associés au pétrole brut dans les champs pétroliers.
- Gaz des unités de traitement de gaz.
- Gaz des unités de GNL et des raffineries.

Les gaz torchés, issus de différentes unités de traitement, sont dirigés vers des torches spécifiques en fonction de leurs caractéristiques :

- Gaz torchés de la section de réfrigération : lors de la section de réfrigération le processus exige une pression inférieure à 3kg/cm^2 ce qui nécessite l'évacuation des gaz au niveau des séparateurs vers les torches.
- Gaz torchés de l'absorbeur : Le gaz naturel est acheminé vers la torche chaude si la teneur en CO_2 est supérieure à 70 ppm.
- Gaz torchés des sécheurs : Envoyés vers la torche chaude tant que la teneur en eau est supérieure à 0,5 ppm pendant la déshydratation.
- Gaz torchés de l'échangeur principal et des circuits cryogéniques : Avant stabilisation, tous les gaz froids de l'échangeur principal sont envoyés vers la torche froide, de même que les gaz utilisés lors des opérations de dégivrage, pré refroidissement et de refroidissement final.
- Gaz torchés de la section de fractionnement : Leur quantité est difficile à estimer, avec des pertes dues à des fuites aux soupapes de sécurité et vannes de décharge, et des problèmes de fermeture des vannes de purge et événements, accentués par la présence d'humidité. [15]

IV.5. Types de torchage

IV.5.1. Torchage continu :

L'extraction de pétrole s'accompagne toujours d'une émission de gaz. Ces gaz se forment dans les conduites de remontée du pétrole ainsi que dans les installations de traitement, qui permettent d'éliminer les impuretés du pétrole. Ces gaz sont généralement utilisés par les compagnies pétrolières pour produire l'énergie nécessaire au fonctionnement de la plateforme de traitement.

IV.5.2. Torchage opérationnel :

En cas de problème technique sur une installation pétrolière, il est nécessaire, pour des raisons de sécurité, de vider et de brûler le gaz présent dans les équipements. Ce processus, appelé torchage opérationnel, se produit de manière intermittente et le volume brûlé correspond au volume de gaz présent dans l'installation au moment de l'événement.

IV.5.3. Torchage d'arrêt et de démarrage des unités de production :

Le torchage est utilisé de manière continue mais temporaire lors du démarrage d'une nouvelle installation ou pendant l'arrêt programmé des unités. Il y a également des incidents de torchage dus aux déclenchements électriques des installations.

IV.5. 4. Torchage d'urgence :

Le brûlage du gaz se produit lors de difficultés d'exploitation ou de coupures d'électricité. Réduire les émissions de gaz torchés afin de préserver l'environnement et d'optimiser la production en trouvant des solutions techniques favorables reste l'une des principales préoccupations.

IV.6. Système torche et vide vite :

IV.6.1. Description de la Torche :

La torche se compose généralement des équipements suivants :

- Colonne montante : Il s'agit d'une conduite permettant d'acheminer les gaz à brûler vers la torche.
- Bec de torche : C'est le point d'origine des gaz provenant des ballons torchères, où les gaz sont libérés dans l'atmosphère avant d'être brûlés.
- Trois Pilotes brûleurs : Ce sont des dispositifs de brûleurs utilisés pour allumer les gaz à brûler et maintenir la flamme de la torche.
- Joint moléculaire : C'est une mesure de sécurité utilisée pour empêcher le retour de flamme et les eaux de pluie de pénétrer dans le système de torche.
- Ligne de 3" (Siphon) : Il s'agit d'une conduite de drainage, également appelée pied de torche, utilisée pour drainer le joint moléculaire et évacuer les liquides accumulés dans le système de torche.

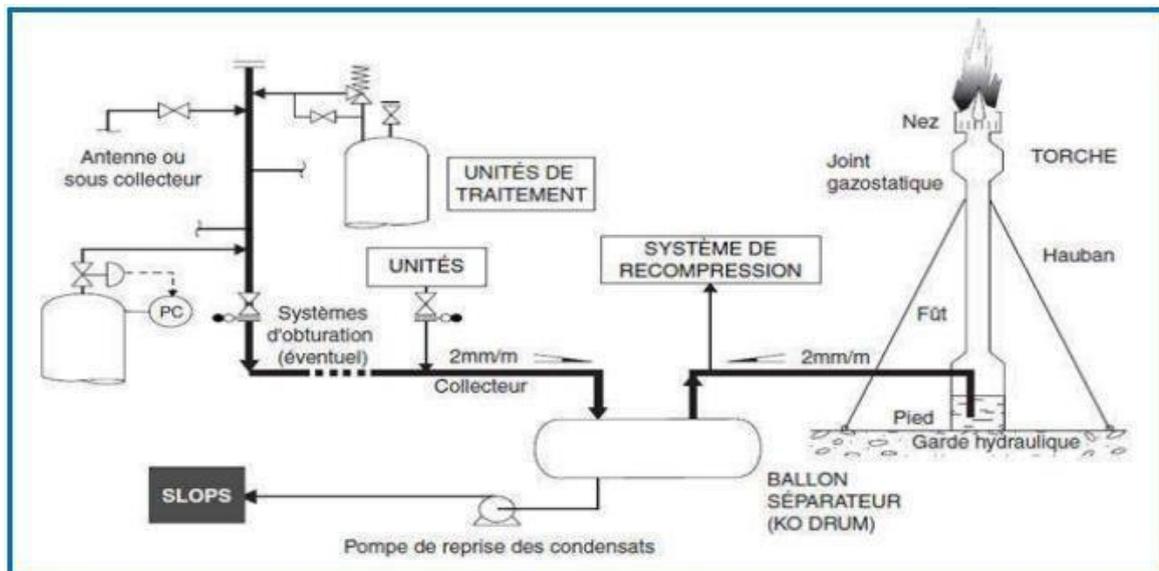


Figure IV.2 : Schéma représentatif d'un système de torchage

IV.6.2. Fonctionnement :

Les vapeurs d'hydrocarbures sont dirigées vers un collecteur qui se termine au ballon séparateur de la torche. Ensuite, ces vapeurs passent dans la torche où elles sont enflammées par une flamme pilote qui brûle en permanence après avoir traversé un joint moléculaire placé au sommet de la cheminée de la torche. Un générateur de front de flamme est prévu pour

enflammer individuellement les quatre (04) flammes pilotes situées au sommet de la cheminée de la torche.

Chaque récipient, colonne ou réservoir contenant des hydrocarbures sous pression est connecté au réseau de torche par le biais de soupapes et/ou de vannes de régulation de pression, telles que les vannes PCV et les vannes de décompression BDV.

En fonctionnement normal, seule une quantité minimale de gaz est dirigée vers la torche, représentant la fraction non condensable des hydrocarbures traités pour maintenir un débit constant. Un flux constant de gaz de balayage ou de purge est également utilisé pour maintenir la torche allumée et empêcher l'entrée d'air.

En cas de dysfonctionnement, comme une surpression dans un réservoir, la vanne de régulation de pression s'ouvre pour diriger davantage de gaz vers la torche. Si la surpression devient excessive, les soupapes de sécurité s'ouvrent pour protéger le réservoir.

En cas d'incident grave ou d'urgence, le système de sécurité déclenche l'ouverture des vannes de décompression (BDV). Pour assurer le bon fonctionnement continu du système de torche, plusieurs dispositifs de contrôle et de sécurité sont installés, notamment :

- ✓ Un réseau de gaz de balayage des collecteurs de torche.
- ✓ Un réseau de gaz pilote qui maintient une flamme au nez de torche dans le cas des torches allumées en permanence.
- ✓ Un système d'allumage à distance des pilotes.
- ✓ Un réseau d'azote connectable aux collecteurs de torche pour l'inertage du système lors de la mise à disposition pour travaux ou dans le cas des torches froides.
- ✓ Des caméras de surveillance pour contrôler la présence et l'état de la flamme. [16]

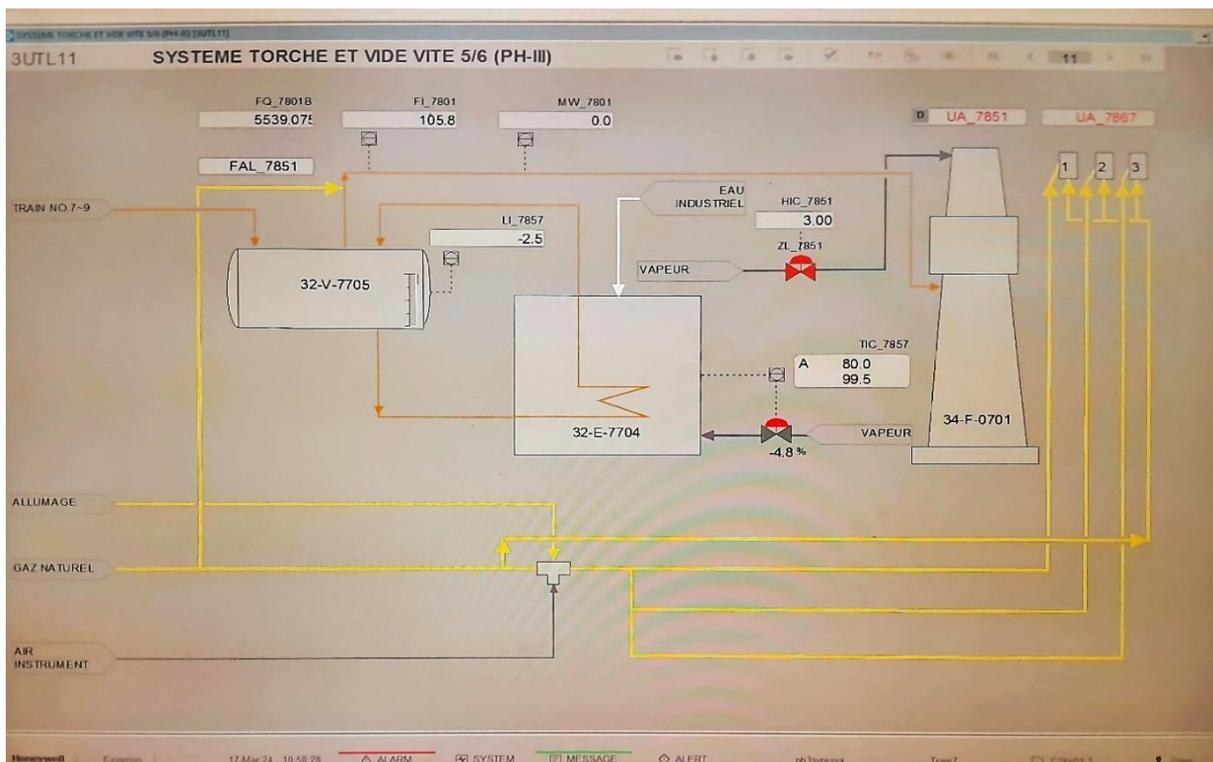


Figure IV.3: Système torche et vide vite

IV.7. Composition des gaz torchés :

Les gaz naturels extraits des puits de pétrole sont communément désignés sous le nom de "gaz associés". Ces gaz se trouvent dans la même formation que le pétrole, soit sous forme de gaz libres (gaz de couverture), soit dissous dans le pétrole brut.

Une fois séparés du pétrole brut, ces gaz naturels se présentent généralement sous forme de mélanges composés principalement de méthane, accompagné d'autres gaz tels que l'éthane, le propane, le butane et les pentanes.

De plus, ces gaz naturels non traités contiennent diverses impuretés telles que de l'eau, du sulfure d'hydrogène (H₂S), du dioxyde de carbone (CO₂), de l'azote (N₂) et d'autres composants. En raison de la présence de ces impuretés, les gaz associés ne peuvent pas être facilement transportés ni utilisés sans traitement, car ils sont extraits lors du processus de production pétrolière

IV.8. Les réactions de combustion :

En principe, la réaction de combustion intégrale des hydrocarbures purs engendre exclusivement de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'azote. Cependant, les torches présentant une faible efficacité ne parviennent pas à consommer l'intégralité du gaz, résultant en l'émission, conjointement avec le dioxyde de carbone, d'hydrocarbures incomplètement brûlés et de monoxyde de carbone.[17]

IV.8.1. Combustion complète :

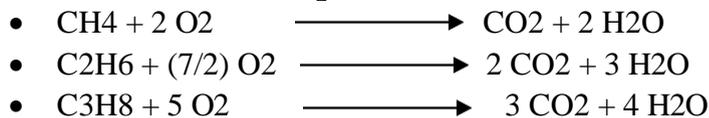


Figure IV.4: Combustion complète

IV.8.2. Combustion incomplète :

C'est le cas des torchage lors des d'arrêts et des démarrages ou pendant les déclenchements, la charge du gaz sera importante ; donc la combustion est incomplète ce qui donne le monoxyde de carbone (CO) et les vapeurs d'eau (H₂O) comme produits :

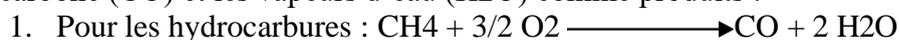
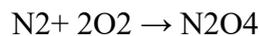
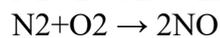




Figure IV.5: Combustion incomplète

2. Pour l'azote :



Des conséquences sanitaires sont possibles sur l'homme puisque les gaz torchés émettent du benzène, des composés organiques volatils (COV) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

IV.9. Impact des gaz torchés :

IV.9.1. Sur l'économie :

Le torchage est également un gaspillage de précieuses ressources qui pourraient fournir de l'énergie à des millions d'habitants dans les pays à revenu faible et intermédiaire.

Environ 140 milliards de mètres cubes de gaz naturel rejetés au cours de l'exploitation du pétrole sont brûlés (« torchés ») chaque année, et donc gaspillés, dans des millions de champs pétrolifères à travers la planète. Si ce gaz servait à produire de l'électricité, la quantité qu'il fournirait (750 milliards de kilowattheures) serait supérieure à la consommation actuelle de l'ensemble du continent africain. [14]

Le brûlage de gaz a également un impact considérable sur l'économie d'un pays, en termes de perte de fonds et de revenus qu'il aurait pu réaliser s'il avait conservé le gaz au lieu de le brûler. Le Nigeria fournit un exemple effroyable d'une telle perte. Les compagnies pétrolières du Nigeria brûlent environ 2,5 milliards de pieds cubes de gaz par jour, ce qui représente une perte de revenus estimée à 2,5 milliards de dollars US par an. D'un point de vue économique, le brûlage de ce gaz associé est un gaspillage colossal pour la communauté. Le coût économique du gaz total brûlé est tout à fait stupéfiant, ce qui implique de grandes opportunités d'investissement pour le secteur privé. Par conséquent, les modes de production à plus forte intensité de gaz, les investissements privés plus importants sont encouragés dans le secteur et les gouvernements devraient recycler et rechercher davantage d'opportunités commerciales pour le secteur du gaz.

IV.9.2. Sur l'Homme :

Les polluants issus du torchage une fois libérés dans l'air peuvent provoquer une gêne notable pour le confort de la population humaine notamment :

1. Pollution de l'air :

Les polluants émis par le torchage peuvent entraîner des problèmes respiratoires, des maladies pulmonaires, des irritations des voies respiratoires et exacerbations de conditions médicales préexistantes telles que l'asthme et les maladies cardiaques.

2. Risques pour la santé respiratoire :

L'inhalation des gaz torchés peut causer des symptômes tels que la toux, la congestion, la gêne respiratoire et les maux de tête. Les personnes exposées à des concentrations élevées de gaz torchés pendant de longues périodes peuvent être plus susceptibles de développer des maladies respiratoires chroniques.

3. Risques pour la santé cardiovasculaire :

Augmentant le risque de maladies cardiovasculaires telles que les crises cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux et l'hypertension artérielle.

4. Exposition aux substances toxiques :

Certains composés chimiques présents dans les gaz torchés, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés organiques volatils (COV), sont classés comme cancérigènes ou potentiellement cancérigènes pour l'homme. Une exposition prolongée à ces substances peut augmenter le risque de développer certains types de cancer.

IV.9.3. Sur l'environnement :

Le torchage présente des problèmes environnementaux significatifs, notamment en ce qui concerne la pollution atmosphérique, les nuisances sonores, olfactives et visuelles.

1. Formation des pluies acides

Pendant le torchage, le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x) sont libérés dans l'atmosphère. Ces gaz chimiques réagissent avec l'eau, l'oxygène et d'autres substances pour former des solutions légères d'acide sulfurique et nitrique. Ces solutions acides peuvent être dispersées dans l'atmosphère sur des centaines de kilomètres par les vents.

2. Acidification des eaux :

Lorsque la pluie acide atteint la Terre, elle s'écoule à la surface dans les eaux de ruissellement, pénètre ainsi dans les cours d'eau et s'infiltré dans le sol. Cette pluie (pluie acide) a de nombreux effets écologiques, mais aucun n'est considéré comme plus important que son impact sur les rivières, les zones humides, les lacs et autres milieux aquatiques. La pluie acide acidifie les eaux et les amène à absorber l'aluminium qui se retrouve du sol dans les cours d'eau tels que les lacs et les rivières.

3. Impact sur la biodiversité

Cet effet rend les milieux aquatiques toxiques pour la vie aquatique ; les organismes tels que les écrevisses, les palourdes, les poissons et autres animaux aquatiques sont fortement affectés. Il est à noter que certaines espèces peuvent mieux tolérer les eaux acides que d'autres. Cependant, dans un écosystème interconnecté, certaines espèces finissent par transférer de nombreux acides absorbés à d'autres organismes tout au long de la chaîne alimentaire, y compris des espèces non aquatiques telles que les oiseaux.

4. Intégrité de la roche

Les forêts exposées à une pluie acide plus importante peuvent être détruites, en particulier celles situées à des altitudes plus élevées. Cette pluie lessive les éléments nutritifs essentiels du sol et libère de l'aluminium dans le sol, ce qui rend difficile l'absorption de l'eau par les arbres.

IV.10. L'effet de serre et le réchauffement climatique

Le torchage entraîne l'émission d'environ 350 millions de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) chaque année dans l'atmosphère, soit l'équivalent de ce qu'émettent environ 77 millions de voitures. Sur de nombreux sites de torchage, une partie des hydrocarbures ne sont que partiellement brûlés et le carbone est rejeté dans l'air sous la forme de noir de fumée (suie). L'augmentation de la concentration du CO₂ qui est un gaz à effet de serre dans l'atmosphère affecte la qualité de vie des populations environnantes et aggrave le phénomène du réchauffement climatique à l'échelle mondiale.

IV.10.1. Définition de l'effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel et bénéfique car il permet de maintenir à la surface de la Terre une température positive, compatible avec le développement de la vie. Sans lui, la température moyenne de la surface du globe serait d'environ -18° C au lieu de +15°. Cependant, les activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles et la déforestation, ont augmenté la concentration de ces gaz dans l'atmosphère, renforçant ainsi l'effet de serre et entraînant un réchauffement climatique global.

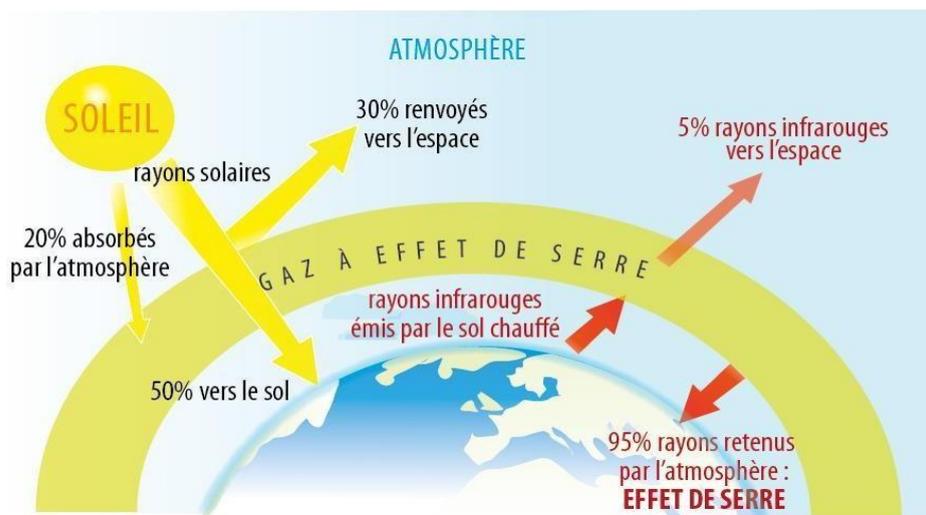


Figure IV.6: Mécanisme de l'effet de serre sur la terre.

La surface du globe absorbe environ la moitié de l'énergie reçue du soleil, et le sol réémet cette énergie sous forme de chaleur. A son tour, une partie de ce rayonnement est absorbée par les nuages et certains gaz. Ce sont les gaz à effet de serre (GES) qui ne constituent qu'1% de l'atmosphère.

IV.10.2. Les Gaz à Effet de Serre :

Les Gaz à Effet de Serre (GES) sont des gaz naturellement présents dans l'atmosphère. Ils absorbent une partie du rayonnement solaire et le renvoient ensuite vers la surface terrestre. Ils sont donc responsables de l'effet de serre.

En temps normal, la concentration de GES dans l'atmosphère est maintenue quasi-constante par les échanges de matière et de gaz entre l'atmosphère, la biosphère et les océans. Par exemple, le cycle de l'eau et la respiration des végétaux contribuent au maintien d'un équilibre entre gaz émis et absorbés. La concentration croissante de GES dans l'atmosphère, due aux activités humaines, est à l'origine du réchauffement climatique.

Les gaz responsables de l'effet de serre sont les suivants :

1. La vapeur d'eau (H₂O) :
2. Le dioxyde de carbone (CO₂)
3. Le méthane (CH₄)
4. Le protoxyde d'azote (N₂O)
5. L'ozone (O₃).

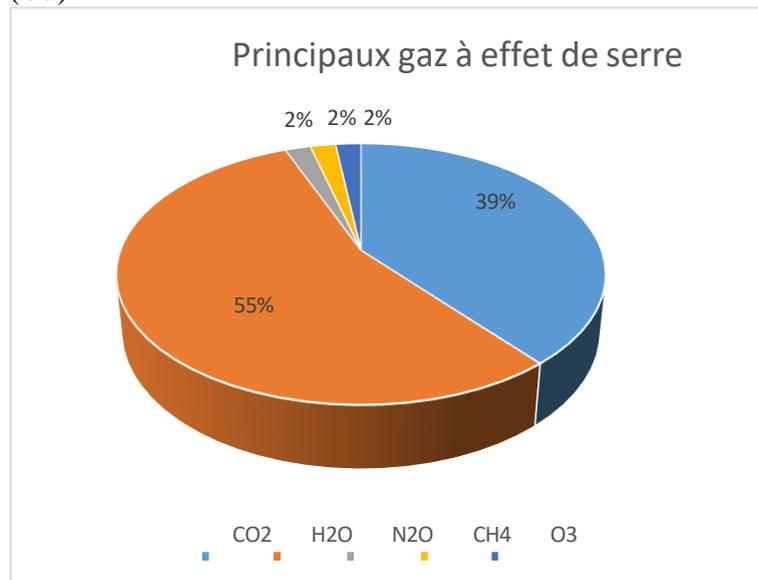


Figure IV.7: Concentration des principaux gaz à effet de serre

IV.10.3. L'effet de serre additionnel : [Effet de serre : définition et conséquences sur l'environnement \(selectra.com\)](http://selectra.com)

L'effet de serre additionnel désigne l'amplification de l'effet de serre provoquée par l'activité humaine. En effet, les activités humaines rejettent des GES plus rapidement que la planète ne peut les absorber. Face à ce déséquilibre, la concentration atmosphérique en GES augmente, et le phénomène d'effet de serre devient plus intense. Davantage de chaleur est donc absorbée et

réfléchi vers la Terre : c'est la cause principale du réchauffement climatique.

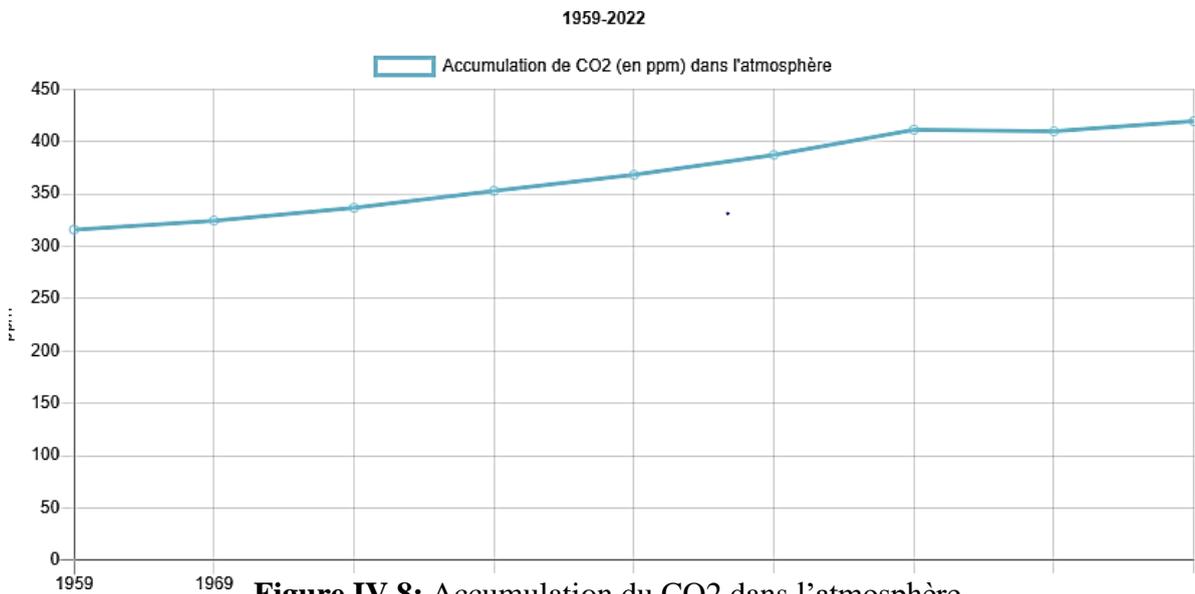


Figure IV.8: Accumulation du CO2 dans l'atmosphère

IV.10.4. Le réchauffement climatique :

Le réchauffement climatique est un phénomène global de transformation du climat caractérisé par une augmentation générale des températures moyennes.

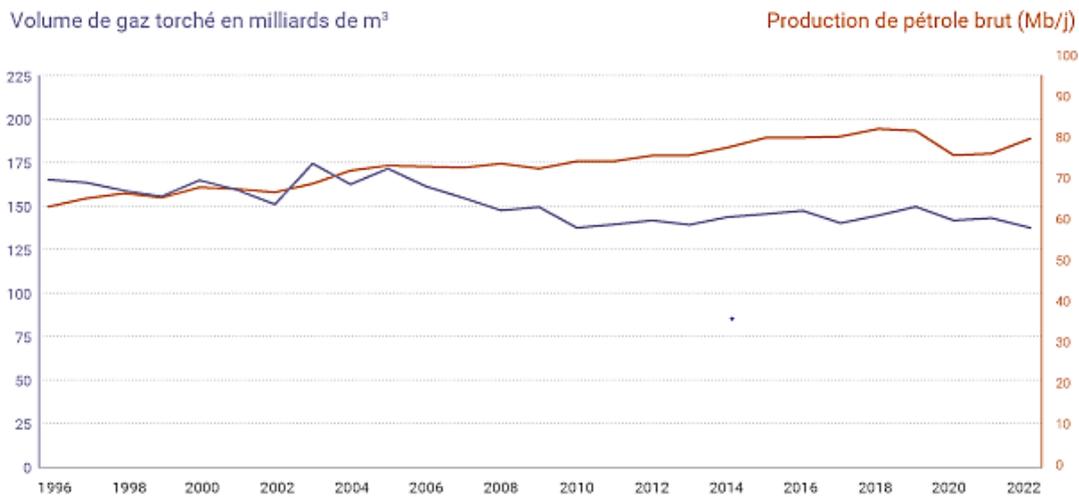
Les conséquences directes du changement climatique provoqué par l'activité humaine sont les suivantes :

- Hausse des températures maximales
- Hausse des températures minimales
- Hausse du niveau de la mer
- Hausse de la température des océans
- Intensification des précipitations (fortes pluies et grêle)
- Augmentation des cyclones tropicaux violents
- Augmentation des périodes d'aridité et de sécheresse
- Recul de la glace de la mer Arctique et de la couverture neigeuse
- Recul et fonte des glaciers
- Les incendies de forêt. [19]

IV.11. Le volume des gaz torchés a l'échelle mondiale :

En 2022, près de 139 milliards de m³ (Gm³) de gaz ont été torchés (contre 144 Gm³ en 2021), indique le *Global Gas Flaring Reduction Partnership* (GGFR), organisation sous l'égide de la Banque mondiale qui réunit gouvernements, groupes pétroliers et institutions luttant contre cette pratique. Le rapport précise que la production mondiale de pétrole brut a dans le même temps augmenté de près de 5% en 2022.

« *Ce découplage progressif du torchage du gaz et de la production de pétrole est notable* », souligne la Banque mondiale : la quantité de gaz torché par baril de pétrole produit s'est élevée en moyenne en 2022 à 4,7 m³ de gaz torché par baril, contre 5,1 m³/b en 2021. [20]



* Torchage sur la partie amont du secteur pétrolier et gazier et au niveau des installations de gaz naturel liquéfié
 Connaissance des Énergies | Sources : Banque mondiale, NOAA, Payne Institute and Colorado School of Mines, GGFR.

Figure IV.9: Evaluation des volumes des gaz torchés et la production de pétrole brute entre 1996 et 2022.

Neuf pays (Russie, Irak, Iran, Algérie, Venezuela, États-Unis, Mexique, Libye et Nigéria) sont à l'origine des trois quarts des volumes de gaz torché dans le monde, alors qu'ils comptent pour moins de la moitié de la production mondiale de pétrole.

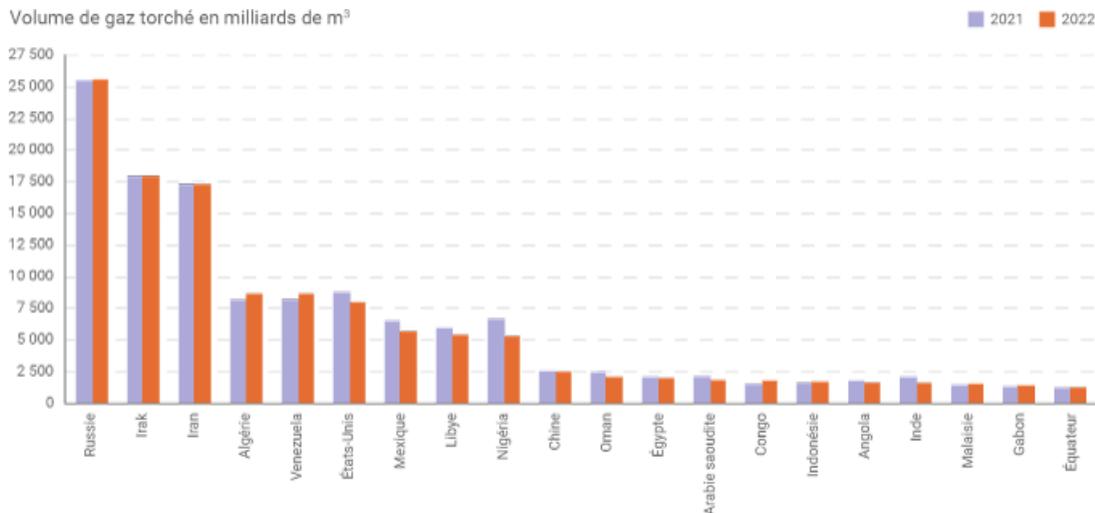


Figure IV.10: Les 20 pays ayant torchés le plus en 2022

IV.12. Le torchage en Algérie :

La Banque mondiale avait classé l'Algérie parmi les 7 pays (Russie, Irak, Iran, USA, Algérie, Venezuela, et Nigéria) qui totalisent les deux tiers (65%) des gaz torchés dans le monde.

Le volume de gaz torché en Algérie est passé de 7,6 milliards de mètres cubes (bcm) en 2012 à 8,6 bcm en 2022, et l'intensité du torchage en 2022 est restée élevée après avoir atteint son pic en 2020 (Figure 1). Sur la même période, la production de pétrole a diminué de près d'un

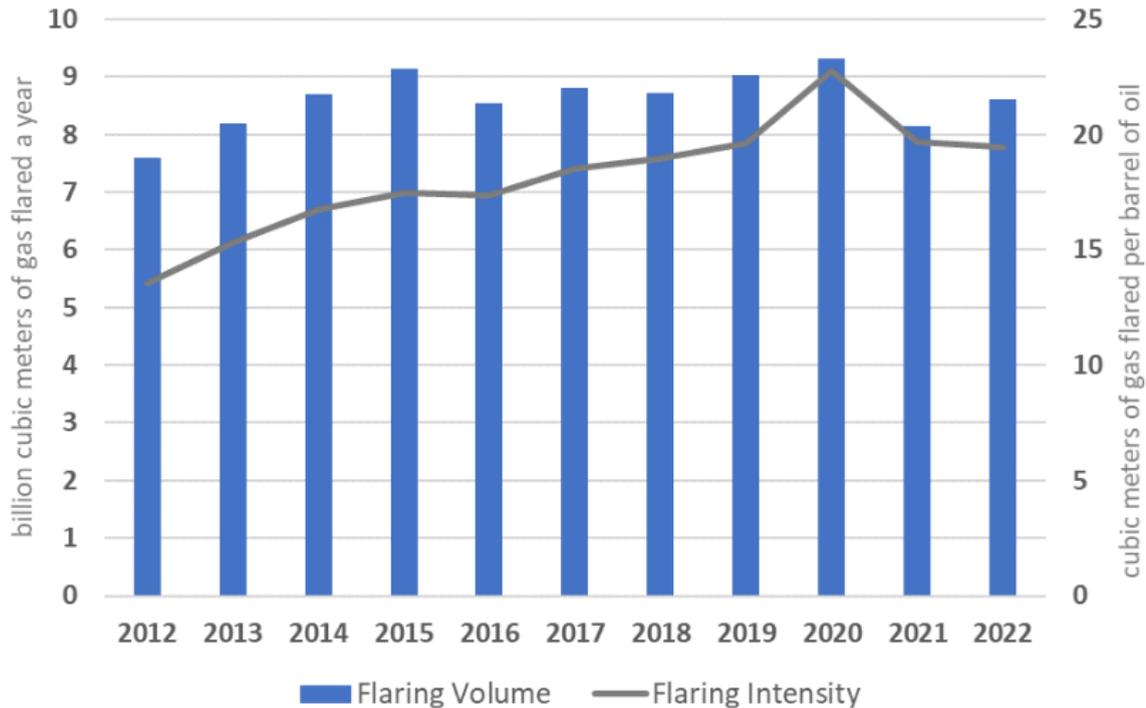


Figure IV.11: Volume et intensité du torchage du gaz en Algérie, 2012–22

quart. Parmi les pays couverts par l'analyse réalisée par la banque mondiale, l'intensité du torchage de l'Algérie en 2021 était la troisième plus élevée. Il y avait 209 sites de torchage dans le décompte de torchage le plus récent, réalisé en 2022.[22]

IV.13. Problématique

Au niveau du complexe de GP1/Z et au cours d'un arrêt programmé ou d'urgence de la section de réfrigération (déclenchement). La boucle de propane est brusquement interrompue étant donné que les trois ballons d'aspirations sont interconnectés entre eux leurs pressions respectives s'égalisent à une pression moyenne d'équilibre, le tout soumis à une température ambiante. Lors du redémarrage de la section de réfrigération la procédure exige une pression inférieure à **3kg/cm²** dans les ballons d'aspiration (voir procédure **chapitre II**), vu la différence des pressions à l'intérieur des ballons au moment du déclenchement d'où la nécessité de torcher un volume de vapeur des ballons afin de les dépressuriser, et lancer la démarche du redémarrage.

Chapitre V : Estimation du volume de propane torché :

V.1. Estimation du volume de propane torché :

Nous nous sommes rapprochés du service de planification afin de déterminer le nombre et les dates des arrêts dus aux déclenchements. Nous ne sommes pas en mesure de calculer directement le volume du gaz torché à partir du ballon V-1006. Tant que c'est un cycle fermé, l'accumulateur V-1009 alimente le ballon. La différence de niveau avant et après l'arrêt au niveau de l'accumulateur représente le volume de propane perdu et donc le volume de gaz torché à partir du ballon V-1006 durant la dépressurisation. Les informations sur le niveau de réfrigérant dans le ballon **V-1009** ont été tirées du **PHD** (process HistoryDatabase).

Le PHD :

Actuellement GP1Z gère l'usine de GPL à partir de plusieurs salles de contrôle grâce à ces dernières stations on peut accéder en temps réel aux données DCS, le PHD gère l'historisation et l'archivage des données process dont il fournit un ensemble d'application desktop : rapports Excel, courbes, Schématiques adaptés aux besoins du client (display) et des vues de tendances « process trend ».

Nombre d'arrêts de trains :

Les arrêts les plus fréquents qui sont la source de notre problème sont souvent issus de :

- Arrêt pompage **RTO**.
- Coupure électrique.
- Manque de charge.
- Arrêt pour travaux.
- Stock haut en **C3** ou en **C4**.
- Déclenchement par une fluctuation électrique.
- Problèmes ou défaillances techniques : transformateur, pompe, compresseur ...etc.

Tableau V.1 : Nombre d'arrêt par train.

Nombre d'arrêts	Trains
14	100
11	200
13	300
11	400
11	500

V.2.Méthode de calcul du niveau au V-1009 :

Le ballon horizontal : V1009, comme il est sur l'annexe n°02 le volume est 130,2m³ avec :

- D=4m
- L=9m

On procède selon la méthode montrée sur l'annexe n°03.

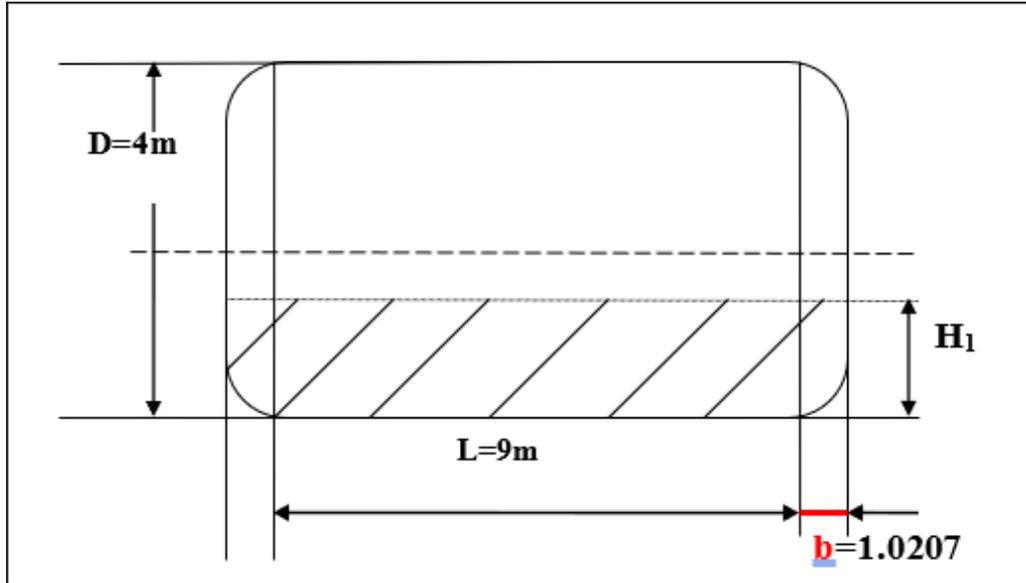


Figure V.1:Dimensions du ballon V-1009

V.2.1. Volume de cylindre horizontal :

Le volume est calculé selon la relation suivante :

$$V_t = (1/6) \times [\pi \cdot K_1 \cdot D^3] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L] \text{ [m}^3\text{]} \dots\dots\dots (IV.1)$$

Avec:

- $K_1 = 2b/D$.
- $Z_e = H_1/D$.
- $Z_c = H_1/D$.

$$V_{\text{partiel}} = (1/6) \times [\pi \cdot K_1 \cdot D^3] \times [f(Z_e)] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L] \times [f(Z_c)] \text{ [m}^3\text{]} \dots\dots\dots (IV.2)$$

Avec:

- $f(Z_e)$:coefficient d'un cylindre horizontal
- $f(Z_c)$:coefficient ellipsoïdal.

Calcul deb:

A partir de la relation(IV.1):

$$130,2 = (1/6) \times [\pi \cdot K_1 \cdot D^3] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L]$$

$$130,2 = (1/6) \times [\pi (2b/D) \cdot D^3] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L]$$

$$130,2 = (1/3) \times [\pi \cdot b \cdot D^2] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L]$$

$$130,2 = 0,3333 \times 3,1416 \times b \times 16 + 0,25 \times 3,1416 \times 16 \times 9$$

$$b = [130,2 - (0,25 \times 3,1416 \times 16 \times 9)] / (0,3333 \times 3,1416 \times 16)$$

$b = 1,02074$

V.2.2. Les Cas réel:

"On présente quelques cas de dépressurisation qui ont eu lieu au cours des années passées."

Tableau 0.I:Tableau V.2 :niveau du ballon V-1009 avant et après un arrêt des trains

Cas reel	Date et temps	Niveau du ballon (%)
Cas n=1	Arrêt le :05/06/2022 à 21h06	37.11%
	Démarrage le06/06/2022 à 2h21	25.46%
CAS n= 2	Arrêt le :25/05/2022à4h23	50.06%
	Démarrage le25/05/2022 à10h42	34.26%
CAS n=3	Arrêt le :15/04/2022 à8h6	43 .16%
	Démarrage le17/04/2022à 00H15	28.27%
CAS n=4	Arrêt le :21/04/2021 à 10h54	43.857%
	Démarrage le21/04/2021à14h52	24.487%
CAS n=5	Arrêt le :18/07/2021 à17h18	60 .65%
	Démarrage le:18/07/2021 à22h22	45.23%

Cas N°1 : Déclenchement TR100 le 05/06/2022 par vibration haute .

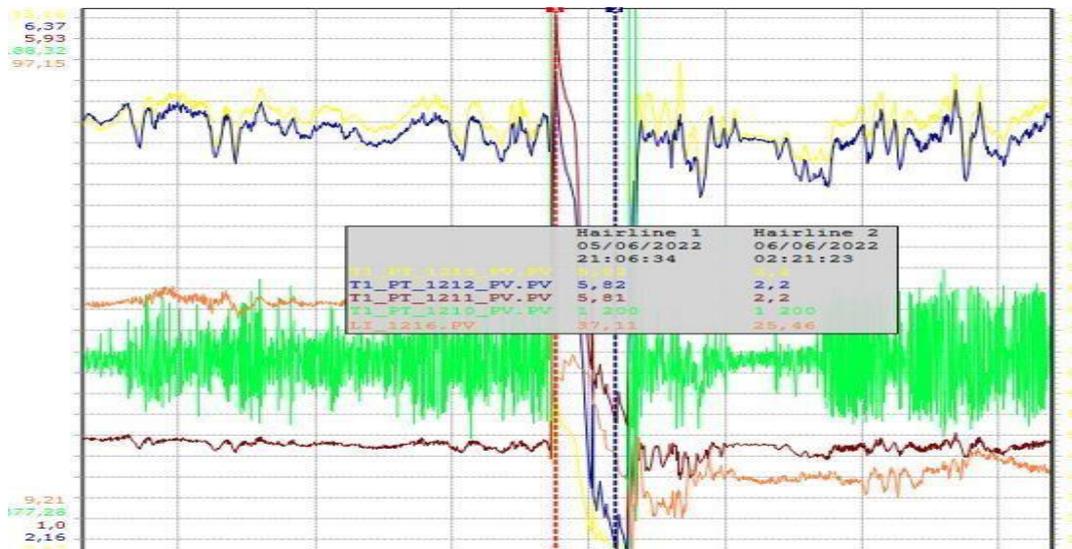


Figure V.2 : Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur avant l'arrêt.

PI_1210.PV : indicateur de la pression à l'aspiration du ballon basse pression en (kg/cm²G).
 PI_1211.PV : indicateur de la pression à l'aspiration du ballon moyenne pression (kg/cm²G).
 PI_1212.PV : indicateur de la pression à l'aspiration du ballon haute pression (kg/cm²G).
 PI_1213.PV : indicateur de la pression au refoulement du compresseur (kg/cm²G).
 LI_1216.PV : indicateur du niveau au ballon V-1009 en (%)

A- Calcul de la hauteur H1 :

100 % → D = 4m.

37,11 % → H = 1,48m.

25,46 % → H = 1,02m.

B- Calcul du volume partiel correspondant à 37,11% :

37,11 % → H = 1,48m.

$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$

$Z_e = Z_c = H1/D = 1,48 / 4 = 0,371$

$f(Z_e)$: 0,310793 (voir annexe 01).

$f(Z_c)$: 0,337593 (voir annexe 02).

Volume partiel = $(1/6) \times [\pi \cdot K1 \cdot D^3] \times [f(Z_e)] + (1/4) \times [\pi \cdot D^2 \cdot L] \times [f(Z_c)]$

A.N: $V_p = (1/6) \times [\pi \cdot 64 \cdot 0,51037] \times [f(Z_e)] + (1/4) \times [\pi \cdot 9 \cdot 16] \times [f(Z_c)]$

On met: $A = (1/6) \times [\pi \cdot 64 \cdot 0,51037] = 17.102$

$B = (1/4) \times [\pi \cdot 9 \cdot 16] = 113.04$

$V_p = 43,47 \text{ m}^3$

C- Calcul du volume partiel correspondant à 25,46% :

25,46 % → H = 1,02m.

$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$

$Z_e = Z_c = H1/D = 1,02 / 4 = 0,254$

f (Z_e): 0,160774 (voir annexe 01).

f (Z_c): 0,199922 (voir annexe 02).

$V_p = 17,102 \times f(Z_e) + 130,04 \times f(Z_c)$

V_p = 18,02m³

D- Volume torché/arrêt1 :

Vt. a.1 = 43,47 – 25,348

Vt. a.1 = 18,02m³

Cas N°2 : TR100/ démarrage le 25/05/2022 de la turbine du TR300 après des travaux :

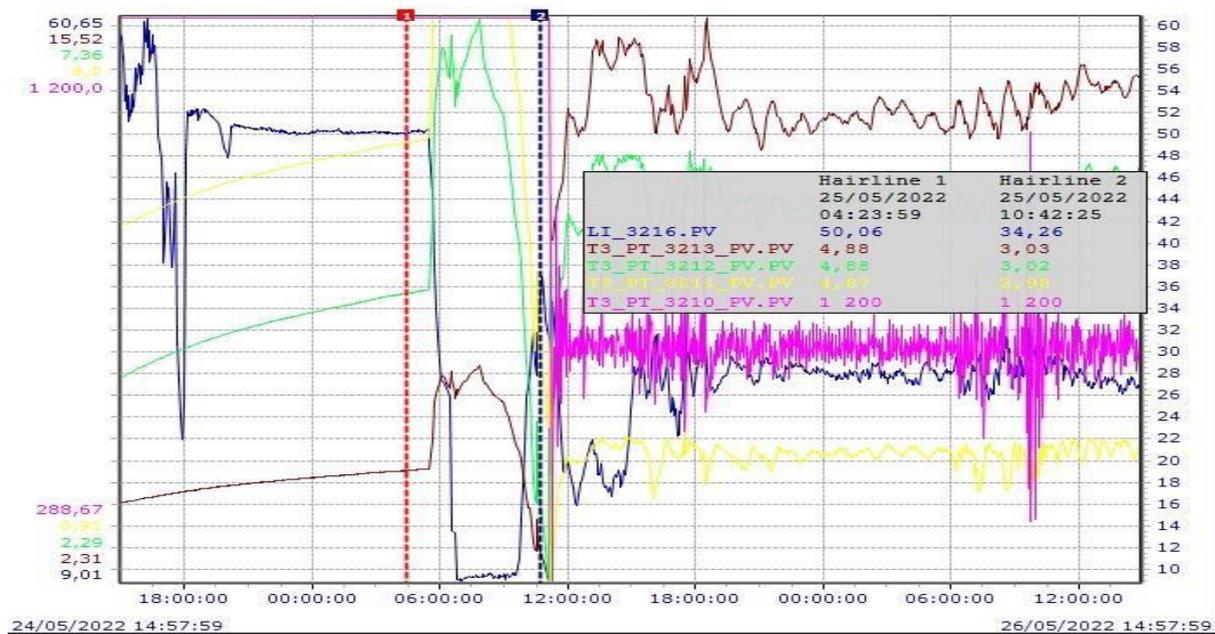


Figure V.3: Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur au démarrage

A- Calcul de la hauteur H1 :

100 % → D = 4m.

50,06 % → H = 2,002m.

34,26 % → H = 1,37m.

B- Calcul du volume partiel correspondant à 50,06% :

$50,06\% \rightarrow H = 2,002\text{m}$

$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$

$Z_e = Z_c = H1/D = 2,002 / 4 = 0,5$

$f(Z_e)$: 0,5 (voir annexe 01).

$f(Z_c)$: 0,5 (voir annexe 02).

$V_p = 17,102 \times f(Z_e) + 113,04 \times f(Z_c)$

$V_p = 65,07\text{m}^3$

C- Calcul du volume partiel correspondant à 34,26% :

$34,26\% \rightarrow H = 1,37\text{m}$.

$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$

$Z_e = Z_c = H1/D = 1,37/ 4 = 0,342$

$f(Z_e)$: 0,270889(voir annexe 01).

$f(Z_c)$: 0,302228(voir annexe 02).

$V_p = 17,102 \times f(Z_e) + 113,04 \times f(Z_c)$

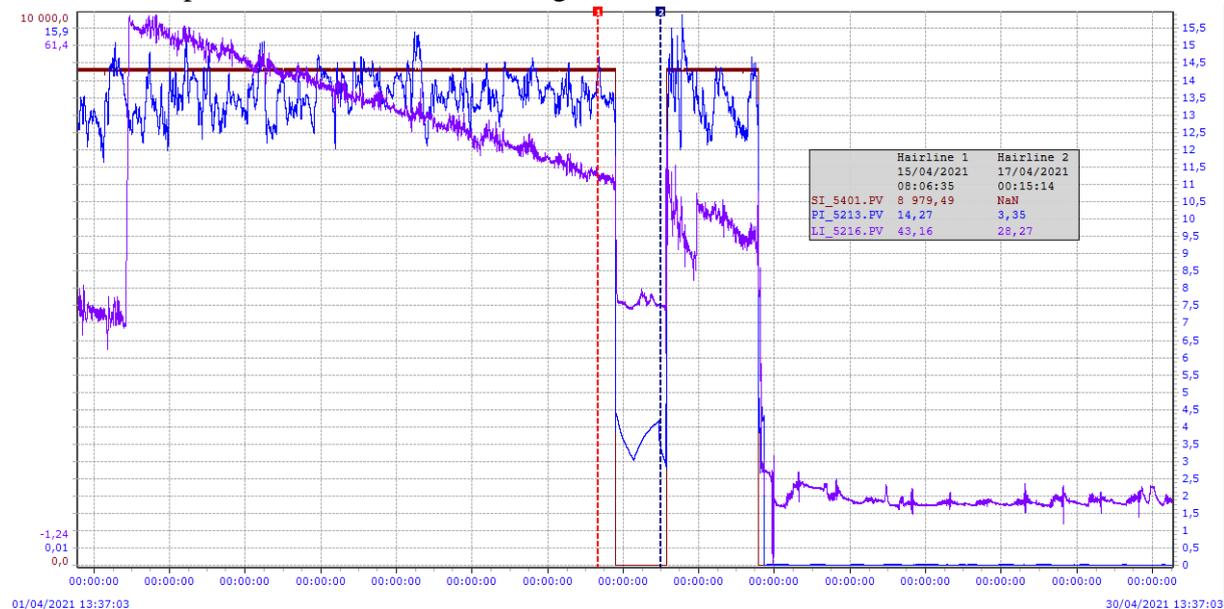
$V_p = 38,8\text{m}^3$

D- Volume torché/arrêt2 :

$V_{t.a2} = 65,07 - 38,8$

$V_{t.a2} = 26,27\text{m}^3$

Cas N°3 : Dépressurisation avant démarrage TR100.



FigureV.4: Dépressurisation avant démarrage TR100.

A- Calcul de la hauteur H1 :

$$100 \% \rightarrow D = 4\text{m.}$$

$$43,16\% \rightarrow H = 1,726\text{m.}$$

$$28,27\% \rightarrow H = 1,13\text{m.}$$

B- Calcul du volume partiel correspondant à 43,16%:

$$43,16\% \rightarrow H = 1,726\text{m}$$

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Ze = Zc = H1/D = 1,726/ 4 = 0,431$$

$$f(Ze): 0,397157 \text{ (voir annexe 01).}$$

$$f(Zc): 0,412426 \text{ (voir annexe 02).}$$

$$Vp=17,102 \times f(Ze) + 113,04 \times f(Zc)$$

$$\mathbf{Vp=53,41m^3}$$

C- Calcul du volume partiel correspondant à 28,27% :

$$28,27\% \rightarrow H = 1,13\text{m}$$

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Ze = Zc = H1/D = 1,13 / 4 = 0,282$$

$$f(Ze): 0,193720 \text{ (voir annexe 01).}$$

$$f(Zc): 0,231498 \text{ (voir annexe 02).}$$

$$Vp=17,102 \times f(Ze) + 130,04 \times f(Zc)$$

$$\mathbf{Vp=29,48m^3}$$

D- Volume torché/arrêt3 :

$$Vt.a3 = 53,41 - 29,48$$

$$Vt.a3 = 23,93\text{m}^3$$

Cas N°4 : DéPRESURISATION DU BALLON V-6006

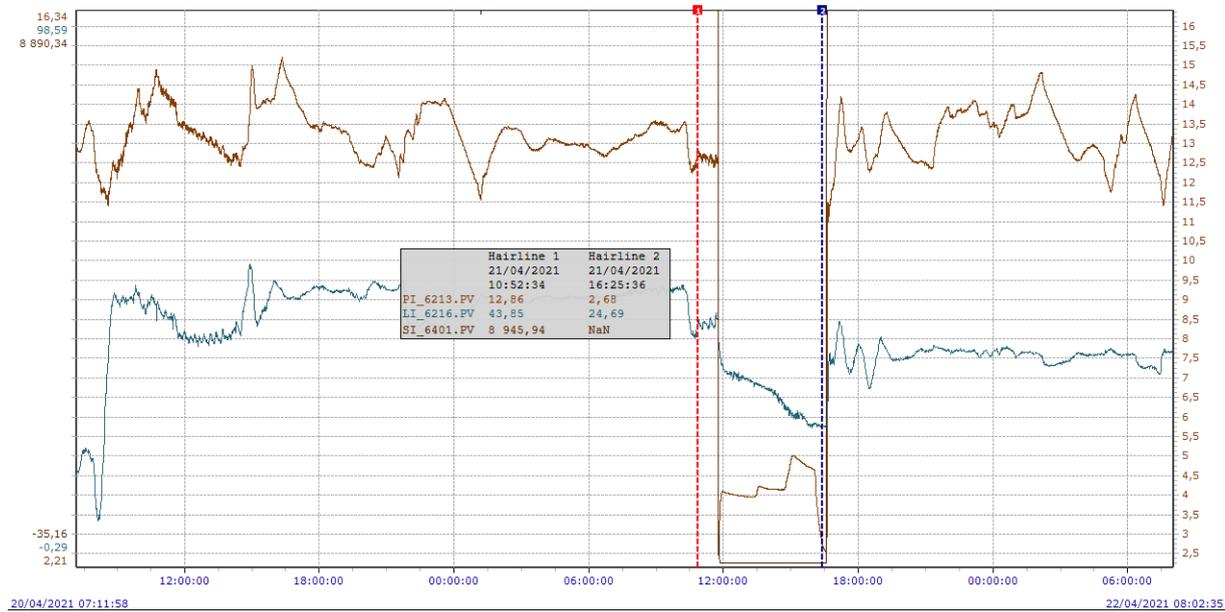


Figure V. 5: Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur avant l'arrêt du tain 6.

A- Calcul de la hauteur H1 :

100 % → D = 4m.

43,85% → H = 1,754m.

24,69% → H = 0,987m.

B- Calcul du volume partiel correspondant à 43,85%:

43,85% → H = 1,754m

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Ze = Zc = H1/D = 1,754/ 4 = 0,439$$

f (Ze): 0,408954 (voir annexe 01).

f (Zc): 0,422525 (voir annexe 02).

$$Vp = A \times f (Ze) + B \times f (Zc)$$

$$Vp = 17,102 \times f (Ze) + 113,04 \times f (Zc)$$

$$Vp = 54,75m^3$$

C- Calcul du volume partiel correspondant à 24,69% :

24,69% → H = 0,987m

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Ze = Zc = H1/D = 0,987/ 4 = 0,245$$

f (Ze): 0,150663(voir annexe 01).

f (Zc): 0,190007(voir annexe 02).

$$Vp = 17,102 \times f (Ze) + 113,04 \times f (Zc)$$

$$V_p = 24,05 \text{ m}^3$$

D- Volume torché/arrêt4 :

$$V_{t.a4} = 54,75 - 24,05$$

$$V_{t.a4} = 54,75 - 24,05 = 30,70 \text{ m}^3$$

Cas N°5

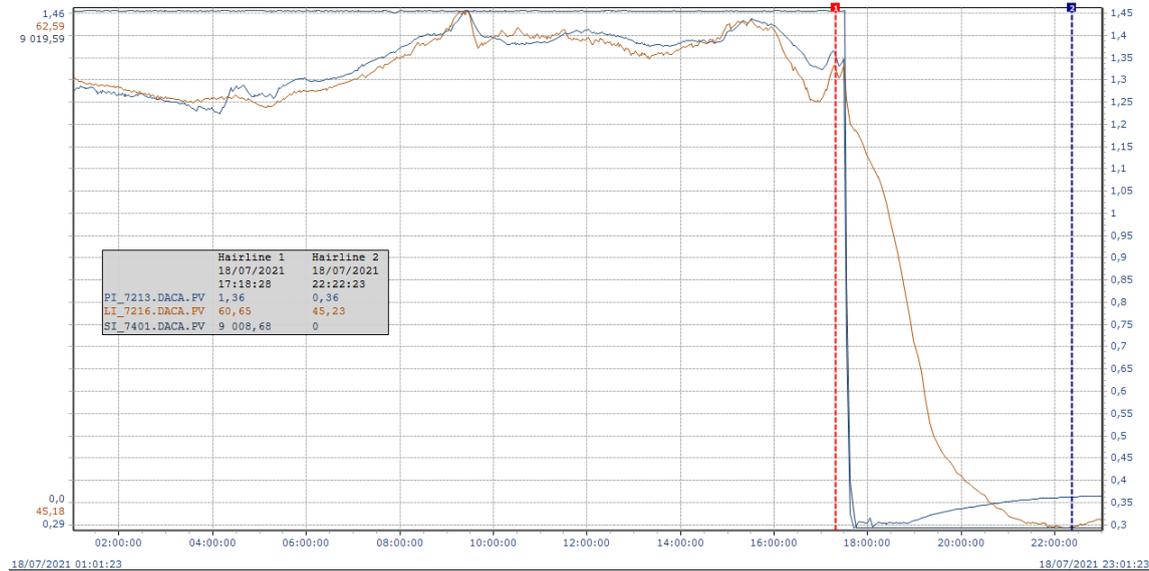


Figure V. 6 : Les pressions des trois ballons et le refoulement du compresseur avant l'arrêt du TR700

A- Calcul de la hauteur H1 :

$$100 \% \rightarrow D = 4\text{m.}$$

$$60,65\% \rightarrow H = 2,42\text{m.}$$

$$45,23\% \rightarrow H = 1,809\text{m.}$$

B- Calcul du volume partiel correspondant à 60,65% :

$$60,65\% \rightarrow H = 2,42\text{m}$$

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Z_e = Z_c = H1/D = 2,42/ 4 = 0,607$$

$$f(Z_e): 0,658050 \text{ (voir annexe 01).}$$

$$f(Z_c): 0,635189 \text{ (voir annexe 02).}$$

$$V_p = 17,102 \times f(Z_e) + 113,04 \times f(Z_c)$$

$$V_p = 83,055 \text{ m}^3$$

C- Calcul du volume partiel correspondant à 45,23% :

$$45,23\% \rightarrow H = 1,809\text{m}$$

$$K1 = 2b/D = b/2 = 0,51037$$

$$Ze = Zc = H1/D = 1,809/ 4 = 0,425$$

f (Ze): 0,428221(voir annexe 01).

f (Zc): 0,438979(voir annexe 02).

$$Vp=17,102 \times f (Ze)+113,04 \times f(Zc)$$

$$Vp=56,94m^3$$

D- Volume torché/arrêt,5 :

$$Vt.a5 = 83,055-56,94$$

$$Vt.a5 = 26,11m^3$$

V.3. La quantité annuelle de propane torché :

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} V_{tai}}{5} = \frac{18,02+26,27+23,93+30,07+26,11}{5} = 24,99 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ Avec } \rho = 476 \text{ kg/m}^3 \text{ aux conditions de stockage aux V-1009 P=14 bar,}$$

$$T=35^\circ c$$

$$\Rightarrow m = \rho \cdot v = 24,99 \times 476$$

Donc la quantité annuelle moyenne de propane torché durant l'année sera:

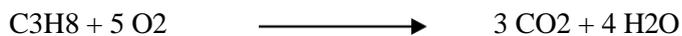
$$m = 1,18 \times 10^4 \text{ kg}$$

$$Q_m = 1,18 \times 10^4 \times 23 \text{ arrêts/an} = 271400 \text{ kg/an} = 271,4 \text{ Tonne/an.}$$

$$Q_m = 271,4 \text{ Tonne/an}$$

Remarque :

Pour une combustion complète dont une mole de propane brûlé produit **3 moles de CO₂**, la quantité massique émise sera **35400 kg** par arrêt.



Chapter VI: Solution proposée :

VI.1. L'objectif :

L'objectif de notre étude est de trouver une solution pour minimiser le débit de propane torché lors du démarrage de la section de réfrigération du train 100 de la phase I après un arrêt afin de réduire l'impact négatifs de ces gaz à long terme.

Dans le but de récupérer la quantité des gaz torchés nous proposons ce qui suit : La récupération des gaz torchés par une conduite et une vanne de détente les ramenant à la même pression que la ligne BOG; vue que le ballon HP V-1006 présente un volume quatre fois plus important que celle des autres ballons MP et BP et en plus sa position est plus proche à la ligne BOG. Alors le soulager conduit à diminuer les pressions des trois ballons à 3 kg/cm² de la boucle (condition recherchée pour le démarrage) ces vapeurs du propane contenus dans le ballon V-1006 au moment de l'arrêt sont maintenus à l'état gazeux aux conditions de pression d'arrêt généralement entre 5 et 7 kg/cm² et une température proche de la température de service mais tend vers l'ambient si l'arrêt dure très longtemps.

VI.2. La ligne BOG :

La ligne BOG reçoit les vapeurs des produits finis afin de les acheminer vers la section BOG (Boil off gaz) qui est conçu pour la ré liquéfaction des vapeurs de gaz de vaporisation afin de les Renvoyer dans les systèmes de stockage. Ces vapeurs proviennent de :

- ✚ Vapeur de C3 venant du ballon de flash V-1013 de la section de liquéfaction.
- ✚ Gaz évaporés des bacs de stockage.
- ✚ Gaz de retour de la jetée

VI.3. La section de BOG

La section de reliqufaction des vapeurs de propane BOG fonctionne de manière fiable et produit les températures désirées conformément aux normes de fonctionnement. Ainsi, elle est capable d'accepter une charge additionnelle et temporaire pendant le démarrage de la section réfrigération. Elle se compose de :

- 5 compresseurs de type alternatif à piston à 3 étages.
- Ballons d'aspiration.
- Une batterie d'aéro-réfrigérant.
- 1 ballon récupérateur de condensât.
- 3 économiseurs (HP, MP & BP).

Avec capacité nominale de récupération :

- ✓ Propane est de 43,52t/h.
- ✓ Butane est de 28,63t/h.

VI.3.1. Fonctionnement du procédé de réliquéfaction du butane dans la section BOG :

Les vapeurs de propane provenant des différentes capacités citées ultérieurement sont réexpédiés vers le ballon d'aspiration (V-0011) qui assure la décantation du liquide et l'évaporation nécessaire pour alimenter une batterie des compresseurs, après les vapeurs

comprimés sont condensées dans l'aéro-réfrigérant et s'accablent dans le ballon (V-0012), en suite elles pénètrent dans les trois économiseurs afin d'abaisser leurs températures à celle de stockage. Les économiseurs sont des échangeurs de chaleur alimentés par le même produit (propane liquide) coté calandre et propane gazeux du côté tube faisceaux, le propane liquide de côté calandre est obtenue à partir d'une détente de condensât, prélevé à l'entrée de l'échangeur, et sous contrôle de niveau de ce dernier à la pression d'aspiration de l'étage correspondant, comme indique. La pression au niveau du ballon d'aspiration est plus basse que celle de la ligne environ ($100 \text{ mmH}_2\text{O}_{\text{eff}} = 1.1 \text{ kg/cm}^2$) pour une gamme de température de (-20°C) à (-50°C) , incitant ainsi les vapeurs récupérées et les gaz évaporés de se déplacés par différence de pression jusqu'à la section BOG aidé par l'aspiration des compresseurs alternatifs.

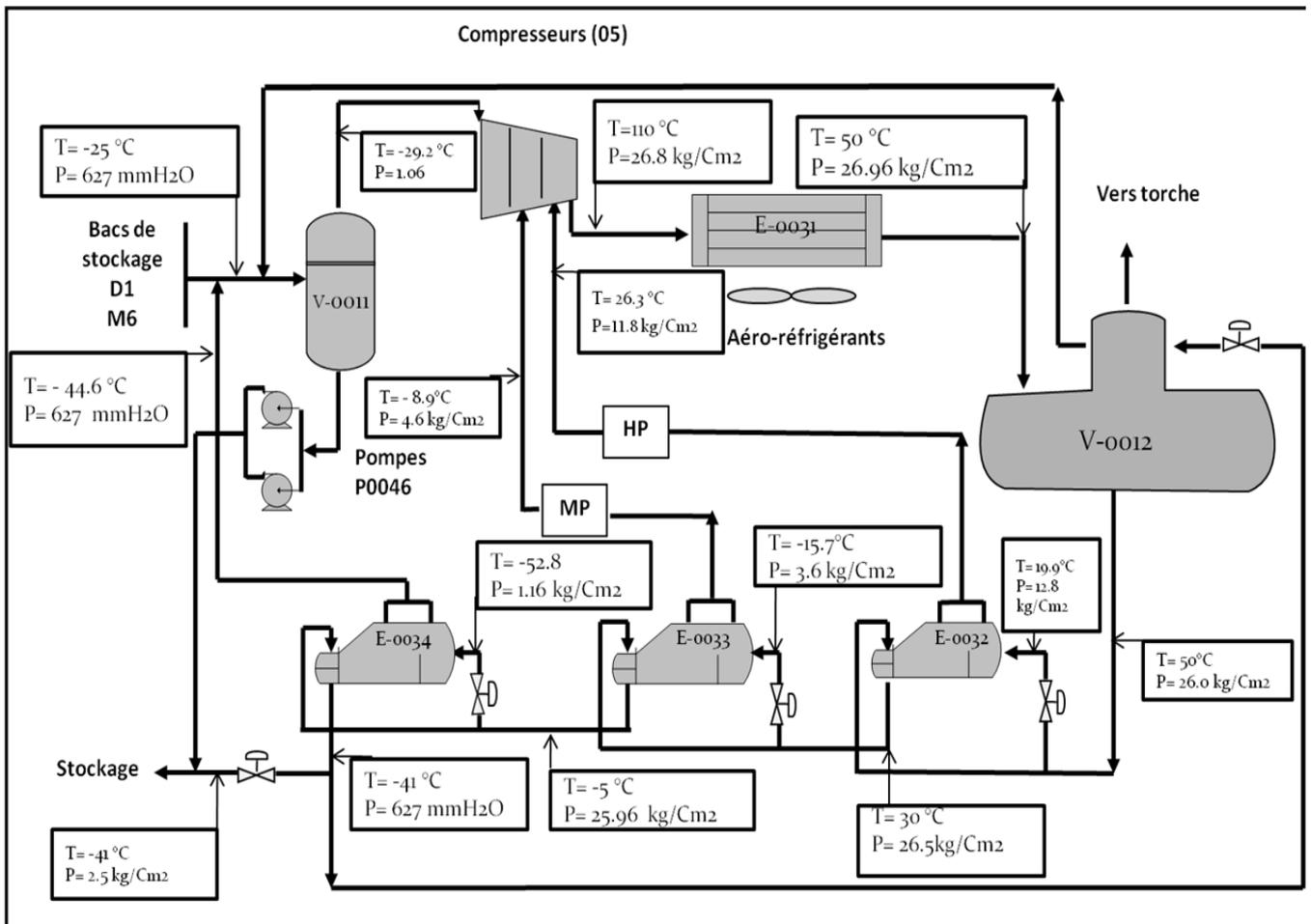


Figure VI.1:Section BOG

VI.4. Dimensionnement de la ligne de récupération de propane :

Afin de dimensionner la ligne de récupération, les facteurs suivant doivent être pris en considération :

1. Le diamètre et l'épaisseur du tube.
2. La vitesse d'écoulement.
3. Les pertes de charge.

Des facteurs économiques et opérationnels influencent le choix du diamètre du tuyau. Notre diamètre doit correspondre exactement à celui de la torche qui est de 6 pouces.

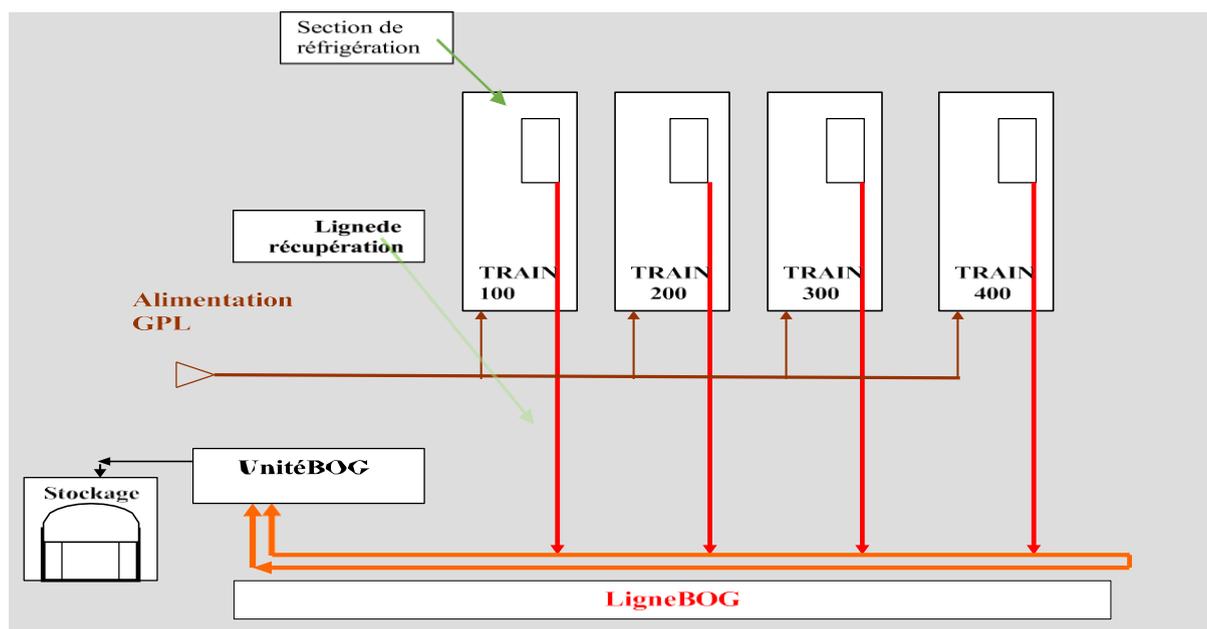


Figure VI.2: localisation de la ligne de récupération.

VI.4.1. Equipements :

- Conduite : la longueur de la ligne est mesurée sur site est de 130m, son diamètre est de 6 pouces, la modification est faite en gardant le même type de matériau A53
- 8 coudes.
- Vanne de garde.
- Vanne de détente : détend les vapeurs à une pression de 900 mm H₂O.

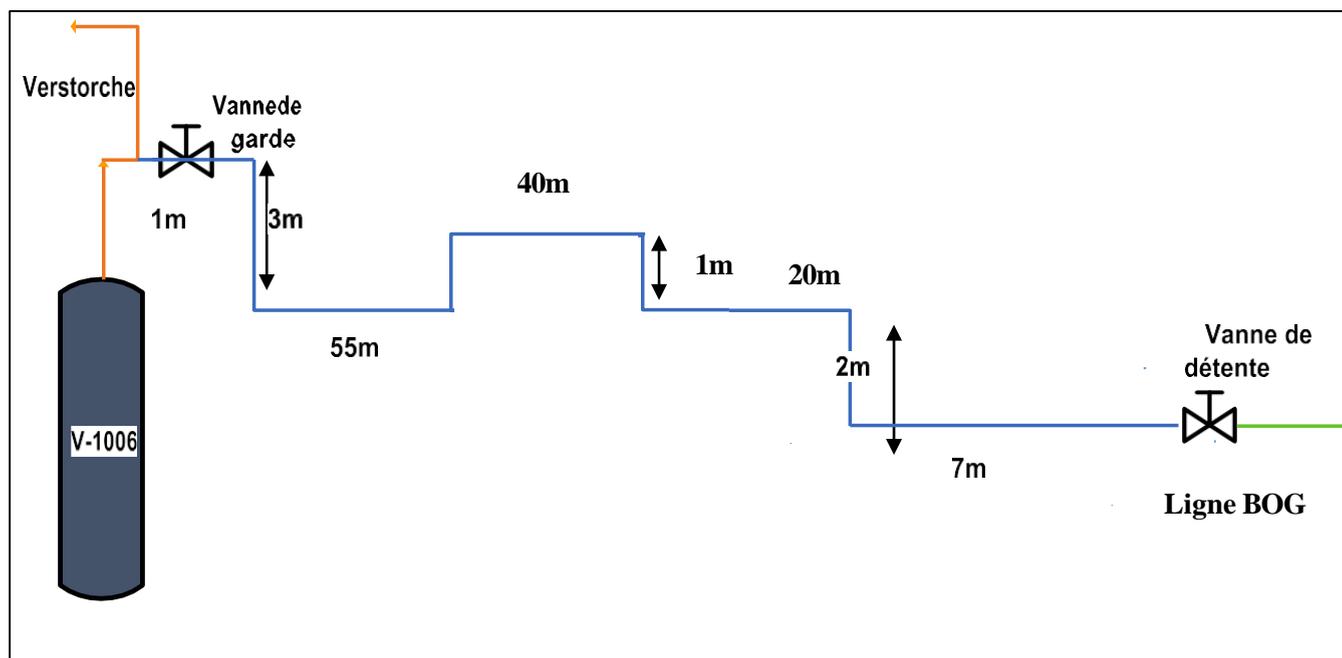


Figure VI.3: Schéma de la ligne de récupération.

VI.5. Généralités sur la Simulation :

La simulation est un outil utilisé dans différents domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, permettant d'analyser le comportement d'un système avant de l'implémenter et d'optimiser son fonctionnement en testant différentes solutions et différentes conditions opératoires.

Les simulateurs de procédés chimiques, couramment utilisés dans l'industrie chimique ou para-chimique, sont considérés comme des modèles de connaissances. Ils reposent sur la résolution de bilans de masse et d'énergie, ainsi que sur les équations d'équilibre thermodynamique, entre autres. Ces outils fournissent des informations essentielles pour la conception, en particulier pour les nouveaux procédés (dimensionnement des équipements, analyse du fonctionnement sous différentes conditions opérationnelles, optimisation), l'optimisation des procédés existants et l'évaluation des modifications apportées aux conditions opérationnelles.

VI.5.1. L'Utilisation de la simulation :

Les différentes tâches qu'un simulateur de procédé devrait effectuer sont :

1). Dans la conception (engineering) :

- La résolution des bilans de matières et d'énergie.
- Le dimensionnement des équipements.
- L'évaluation économique du procédé.
- L'optimisation du procédé.

2). Dans le suivi des procédés :

- Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas des changements de composition de l'alimentation.
- Détermination de la performance des équipements.

Parmi les logiciels de simulation les plus populaires tels qu'Aspen Plus, ChemCAD, Hysim, Hysys et Pro-II, certains se démarquent par leur large utilisation et leur importance croissante dans la conception de nouvelles unités et l'optimisation des procédés industriels. Parmi ces simulateurs, HYSYS se distingue comme l'un des logiciels de simulation les plus performants

VI.5.2. Présentation du logiciel « HYSYS » :

Le HYSYS est un logiciel de simulation des procédés de génie chimie, développé par la société canadienne HYPROTECH. Il a été conçu pour permettre le traitement d'une vaste gamme de problèmes allant de la séparation jusqu'à la distillation et la transformation chimique. HYSYS est une plateforme de modélisation avancée qui simplifie la représentation des installations existantes. Elle assure la conformité des équipements aux spécifications nécessaires et permet l'évaluation ainsi que l'amélioration des processus en cours.

Les professionnels de la conception industrielle utilisent le logiciel HYSYS pour effectuer des calculs rapides grâce à des modèles efficaces et des techniques optimisées. Cette simulation permet de réduire les coûts d'ingénierie de plusieurs façons :

- En effectuant rapidement des calculs pour différents designs afin de garantir que les équipements du procédé sont correctement dimensionnés pour produire les caractéristiques souhaitées du produit avec les rendements de production visés.
- En créant des modèles applicables tout au long du fonctionnement de l'unité, depuis la conception initiale jusqu'aux détails opérationnels.

VI.5.3. Choix de l'équation d'état

Le choix de l'équation d'état est déterminant dans la simulation, que ce soit en mode statique (steady state) ou dynamique. L'équation de Peng-Robinson est particulièrement recommandée pour les systèmes impliquant des hydrocarbures en raison de sa capacité à résoudre avec précision les problèmes d'équilibre liquide-vapeur, minimisant ainsi les erreurs. Son utilisation est répandue en raison de sa capacité à reproduire fidèlement les comportements des mélanges d'hydrocarbures complexes.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)}$$

Avec :

- P : Pression en (Kg/cm²).
- R : Constant des gaz parfait [8,314 KJ/ (k mol. K)].
- T : Température en (K).
- V : Volume (m³).

VI.5.4. Mode de simulation :

Il existe deux modes de fonctionnement dans un simulateur : statique (ou stationnaire) et dynamique. Les simulateurs statiques résolvent des équations qui décrivent le fonctionnement en régime permanent (à l'équilibre), tandis que les simulateurs dynamiques permettent de suivre l'évolution des variables dans le temps en résolvant des systèmes d'équations différentielles.

VI.6. Simulation de la ligne de récupération :

Données :

Pour simuler la ligne dans le logiciel HYSYS, il faut d'abord préparer l'environnement de simulation. Cela implique la détermination de la composition du propane réfrigérant, la sélection du package de fluide tel que le Peng-Robinson, ainsi que la spécification des conditions opératoires du flux.

Tableau V.1: Composition du réfrigérant

Composition	Fractions (%)
Méthane	0.17
Ethane	0.56
Propane	99.01
n-butane	0.13
i-butane	0.1

Tableau V.2: conditions opératoires

Paramètres	Données
Pression (kg/cm ²)	6.8
Température (°C)	12.4
Température ambiante (°C)	25
Débit (kg/h)	1,18×10 ⁴

VI.6.1. Simulation en mode dynamique :

La dépressurisation dynamique est effectuée de manière contrôlée. Elle permet d'avoir un profil réel sur le déroulement de la dépressurisation du ballon V-1006 tout en récupérant les vapeurs du propane et fournit des courbes de pression, de température et de débit pour évaluer l'impact de la dépressurisation sur le système.

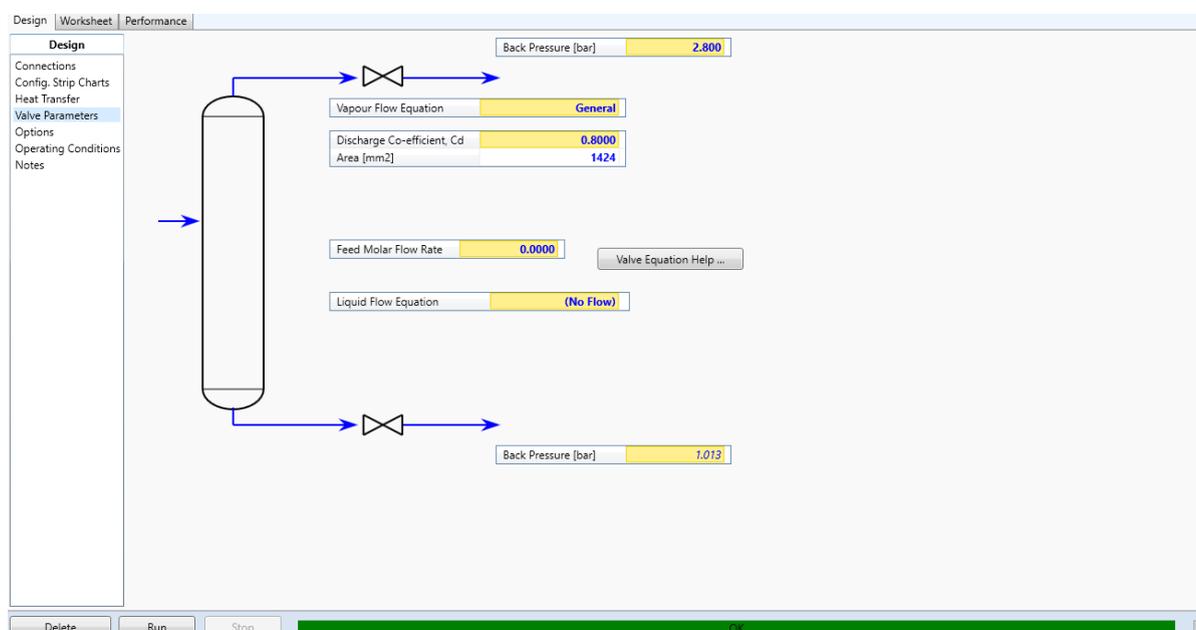


Figure V.4: Dépressurisation en mode dynamique

VI.6.1.1 Interprétation des résultats obtenus :

Les 2 paramètres qui nous intéressent lors le déroulement de la dépressurisation sont la pression et la température du ballon V-1006.

Le graphe représente la variation de la température et de la pression du ballon V1006 au cours du temps, ou en remarque la pression au sein du séparateur à diminué progressivement de 6,8 jusque 2,7 kg/cm² en raison de l'évacuation du volume de propane réfrigérant.

De manière similaire, la diminution de la température au sein du V-1006 de 12.4 jusqu'à -1.48 °C au fil du temps montre que le gaz à l'intérieur du ballon séparateur se refroidit pendant le processus de dépressurisation.

Ce refroidissement peut être dû à la détente adiabatique qui se produit lorsque la pression diminue, entraînant une baisse de température et un effet de refroidissement.

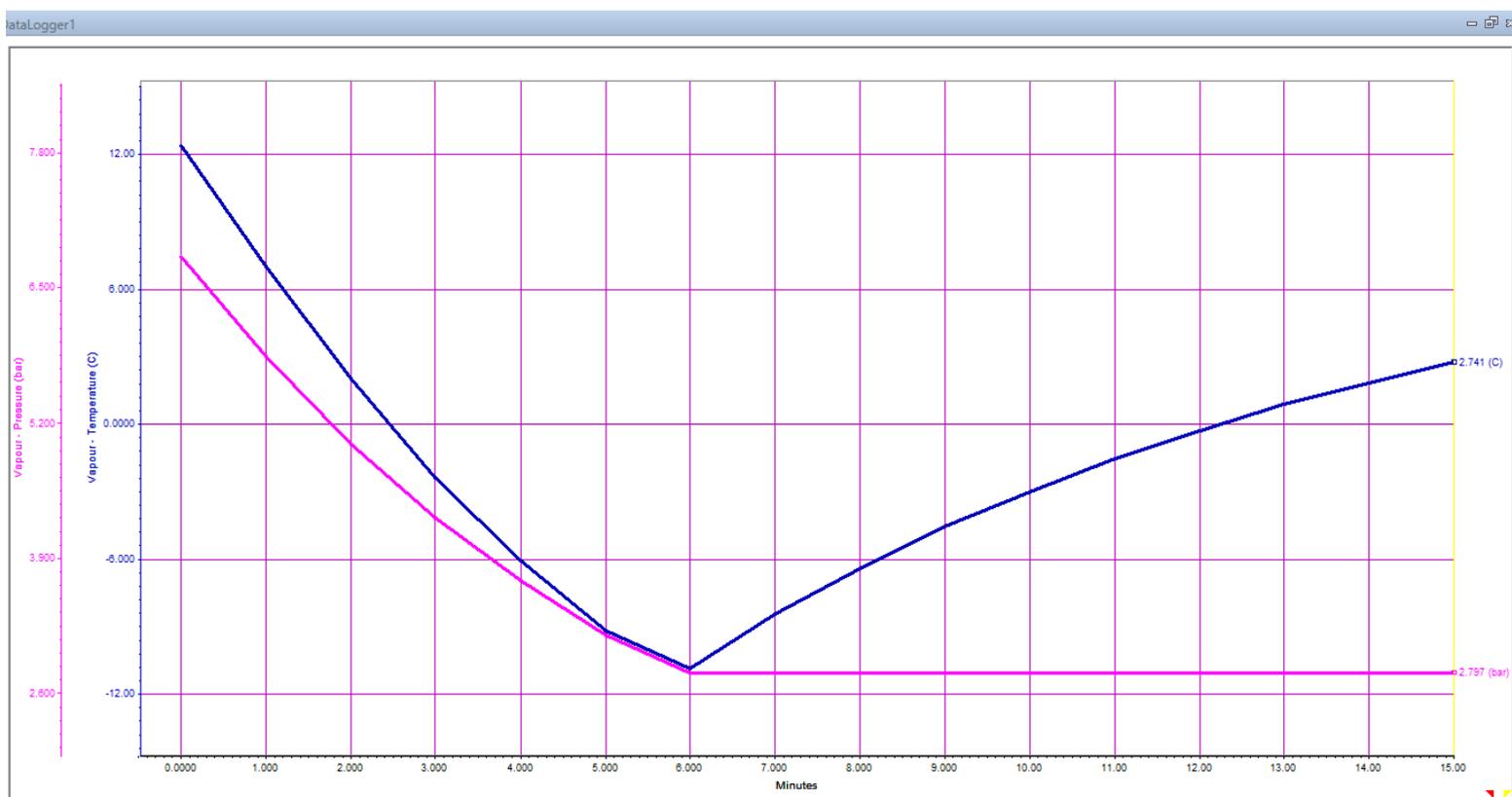


Figure V.5: Profil de la dépressurisation.

VI.6.2. Simulation en mode statique :

En simulation statique on utilise le segment pipe qui fournit une estimation rigoureuse de pertes de charges et des transferts de chaleur.

Une fois le modèle thermodynamique approprié sélectionné, le simulateur demande la création du schéma de la section d'étude qui sera simulée. La figure ci-dessous illustre le schéma généré par le logiciel HYSYS.

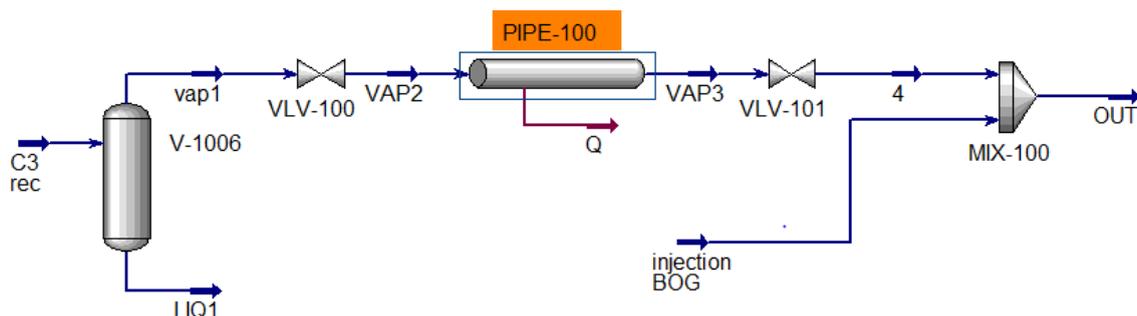


Figure V.6: Schéma représentatif de la simulation de la ligne de récupération

La vanne VLV-100 est ouverte à 50%, $\Delta P = 0.9$ bar.

La vanne VLV-101 est ouverte à 50%, $\Delta P = 4.4$ bar. Permet d'atteindre la pression d'admission requise (1.1 kg/cm^2)

Les données de simulation du pipe-100 sont rétablit dans le tableau suivant :

Tableau V.3: donnée de simulation du pipe-100

Segment	Fittinf/pipe	longuer	Dext	Dint	Elévation
1	Pipe	1	168.3	152.4	0
2				152.4	
3	Pipe	3	168.3	152.4	-3
4				152.4	
5	Pipe	55	168.3	152.4	0
6				152.4	
7	Pipe	1	168.3	152.4	1
8				152.4	
9	Pipe	40	168.3	152.4	0
10				152.4	
11	Pipe	1	168.3	152.4	-1
12				152.4	
13	Pipe	20	168.3	152.4	0
14				152.4	
15	Pipe	2	168.3	152.4	-2
16				152.4	
17	Pipe	7	168.3	152.4	0

Le profil d'élévation de la ligne est représenté sur la figure qui suit :

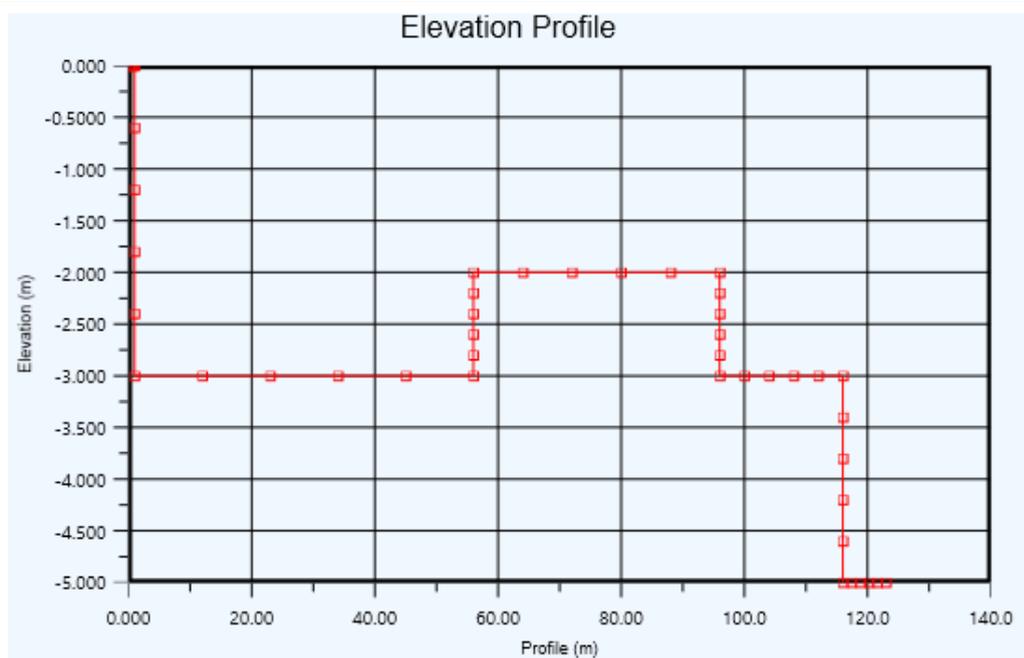


Figure V.7:profil d'élévation de la ligne

Les résultats obtenus :

On a obtenu deux graphs essentielles à partir de la simulation statique du pipe segment.

1^{er} graphe :

Le graphe représente la variation de la pression du propane réfrigérant récupéré lors de son écoulement le long du tuyau où la pression de ce dernier subit une perte de charge de 0,12 bar qui se manifeste par la diminution de pression de 5.77 à 5.65 bar

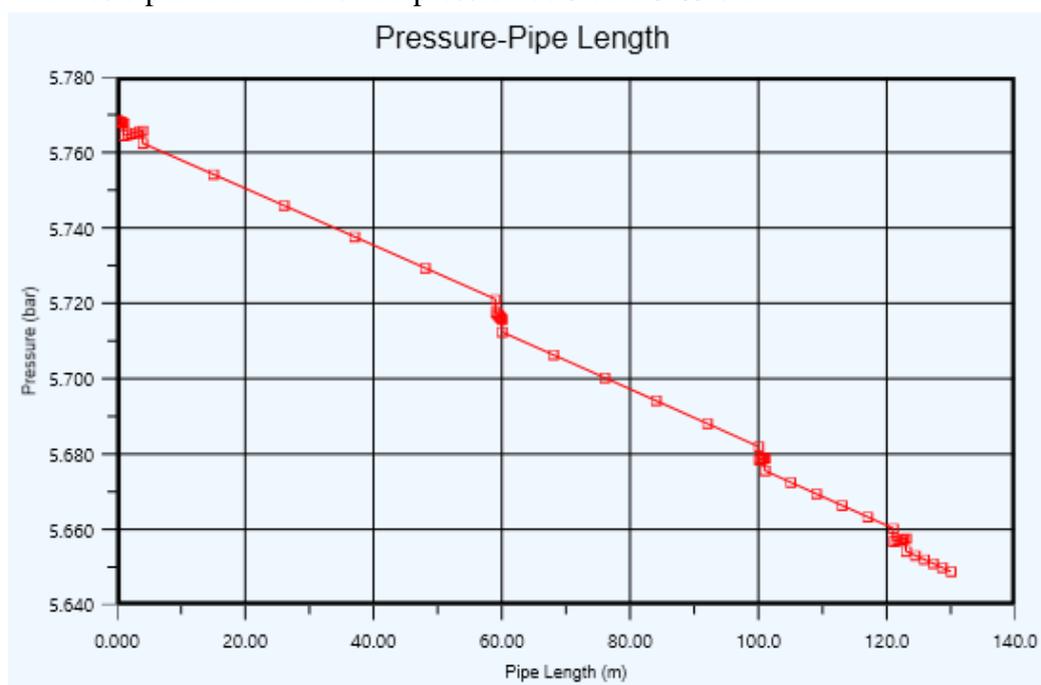


Figure V.8:profil de pression

2^{ème} graphe :

Le graphe représente la variation de la température du propane réfrigérant récupéré lors de son écoulement le long du tuyau, ou la température a passé de 10.7 à 11.58°C cette augmentation est peut-être due à la chaleur générée par les frottements entre le gaz et les parois du tuyau, ou aux échanges de chaleur avec le milieu extérieur sachant que la température ambiante est 25°C.

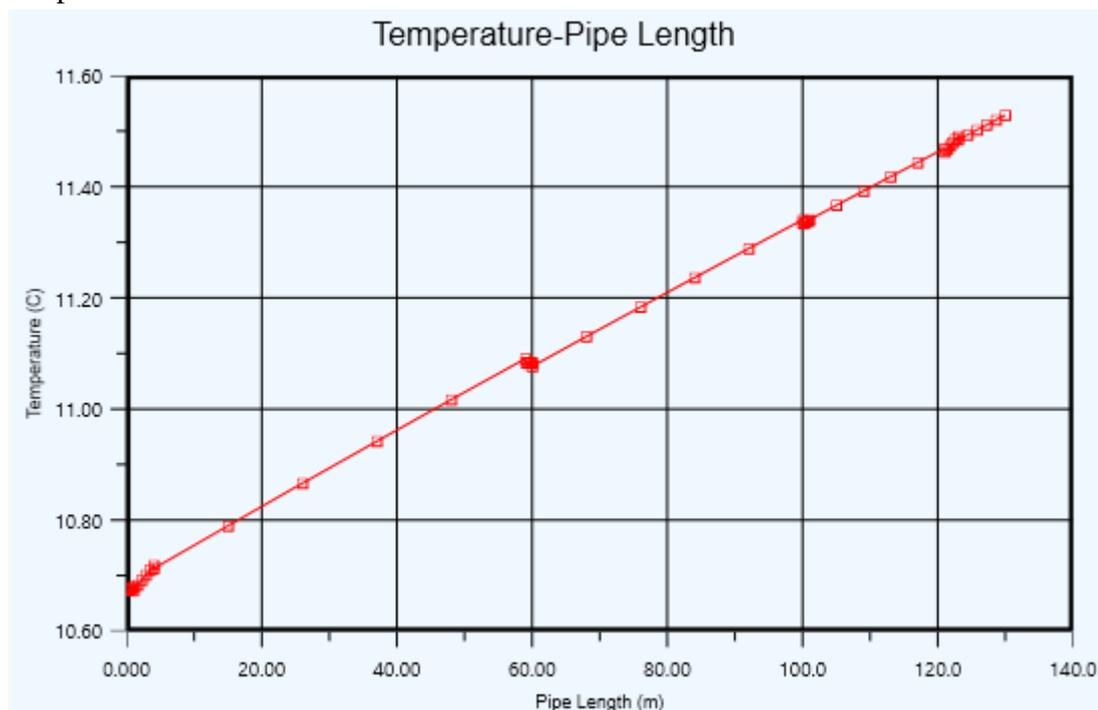


Figure V.9:profile de température

À la sortie de la pipe les vapeurs (VAP3) sont détendues à travers la vanne VLV-101 à la pression d'admission de la ligne BOG 1.1 bar environ 900 mmH₂O_{eff} (cas extrême), dont leurs températures se baissent jusqu'à 3°C.

Les vapeurs (VAP4) sont injectées dans la ligne BOG où elles se mélangent avec les vapeurs de propane à basse température (-33°C) selon la simulation la température des vapeurs après le mélange est -14.46 °C.

Tableau V.4 : les résultats obtenus par la simulation

Nom	C3	VAP1	VAP2	VAP3	VAP4	INJECTION BOG	VAP OUT
Température c	12.4	12.4	12.4	10.67	11.53	-33	-14.46
Pression (bar)	6.66	6.65	5.769	5.649	1.1	1.1	1.1

Conclusion :

D'après la simulation les résultats nous montrent que les températures obtenues sous une pression de 900 mmH₂O_{eff} sont conformes aux exigences pour l'acheminement vers la section BOG, de faite que l'injection momentanée des vapeurs récupérés se fera dans la même pression de la ligne et la différence de température est admissible

Donc nous avons pu déduire en se référant aux résultats cités que :

1. le propane habituellement torché lors du démarrage de la section réfrigération peut être récupéré en créant une ligne de 130 m reliant le ballon V-1006 à la ligne BOG.
2. le propane peut être transporté par différence de pression à partir du ballon V-1006 jusqu'à son injection tout en respectant les conditions requises de liquéfaction.
3. la modification est matériellement réalisable sans arrêter la production.
4. la modification permettra au complexe de réaliser des économies significatives et de contribuer ainsi aux efforts de Sonatrach visant à réduire le taux de gaz

Chapitre VII : partie calcul

VII.1. Vitesse d'écoulement du gaz :

Selon la loi de la continuité nous avons :

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot s \dots\dots\dots (V.2)$$

Avec :

- Q_m : Débit massique en (Kg/h).
- v : Vitesse d'écoulement du gaz en (m/s).
- ρ : Masse volumique en (Kg/m³).
- S : Surface d'écoulement en (m²).

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \dots\dots\dots (V.3)$$

Diamètre :

Selon la relation suivante :

$$D_{int} = D_{ext} - 2e \dots\dots\dots (V.4)$$

Avec :

- D : Diamètre de pipe en (m).
- D_{int} : Diamètre intérieure de pipe en (m).
- D_{ext} : Diamètre extérieur de pipe en (m).
- e : Epaisseur de pipe en (m).

La masse volumique :

$$\rho = \frac{P \cdot M_{moy}}{ZRT} \dots\dots\dots (V.5)$$

Tels que :

- P : Pression de gaz en (Atm).
- R : Constante de gaz parfait en (atm/mol.k), avec $R=0,082$ atm/mol.k.
- T : Température du gaz en (K).
- M_{moy} : Masse moyenne de gaz en (g/mol).

$$M_{moy} = \sum M_i \cdot x_i \dots\dots\dots (V.6)$$

Tels que :

- M_i : Masse molaire du constituant.
- x_i : Fraction molaire du constituant.

Donc :

$$v = \frac{Q_m}{S \times \rho} \Rightarrow v = 4 \frac{Q_m}{(\rho \times \pi \times D^2)} \dots\dots\dots (V.7)$$

VII.2. Nature de l'écoulement :

VII.2.1. Nombre de Reynolds :

Le **nombre de Reynolds** (noté Re) est un nombre sans dimension qui décrit le régime d'écoulement d'un fluide. Le nombre de Reynolds est applicable à tout écoulement de fluide visqueux et permet de prédire son régime.

Le nombre de Reynolds se calcule par le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses des équations de Navier-Stokes selon la formule suivante :

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \dots\dots\dots (V.8)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (V.9)$$

Avec :

- Re : Nombre de Reynolds.
- ρ : Masse volumique en (Kg/m³)
- μ : Viscosité dynamique en (Kg/m.s).
- D : Diamètre du collecteur en (m).
- V : Vitesse d'écoulement en (m/s).
- m : Masse en (Kg).
- V : Volume en (m³).

L'expression montre que :

- ✓ Si ($Re < 2300$), l'écoulement est **laminaire**. Dans ce cas, le fluide se déplace en couches parallèles sans turbulences.
- ✓ Si ($2300 \ll Re < 4000$), l'écoulement est en **transition**. Cela signifie que le régime peut basculer entre laminaire et turbulent.
- ✓ Si ($Re > 4000$), l'écoulement est **turbulent**.

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeurs, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

VII.3. Pertes de charges :

Les équations relatives à la chute de pression sont fondées sur le théorème de BERNOULLI.

$$\Delta PT = \Delta PL + \Delta PS \dots\dots\dots (V.10)$$

Avec :

- ✓ ΔPT : Pertes de charge totale en (Kg/cm²).
- ✓ ΔPS : Chute de pression singulière en (Kg/cm²).
- ✓ ΔPL : Chute de pression linéaire en (Kg/cm²).

a. Pertes de charges Systématiques (Linéaire) :

La perte de charge linéaire est déterminée par l'équation de DARCY :

$$\Delta P_l = \lambda \rho \frac{L V^2}{D 2g} \quad (V.11)$$

Avec :

- ΔP_l : Pertes de charge linéaire en (Kg/cm²).
- ρ : Masse volumique en (Kg/m³).
- λ : Coefficient de perte de charge, On le détermine en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative (ϵ/D). Avec $\epsilon=0.0006$ pour l'acier au carbone (Voir Annexe 03).
- D : Diamètre interne du collecteur en (m).
- V : Vitesse d'écoulement en (m/s).
- g : Accélération de la pesanteur en (m/s²), [$g=9,91 \text{ m/s}^2$].
- L : Longueur du collecteur en (m).

b. Pertes de charges locale (Singulière) :

Les pertes de charge à travers les coudes, les, vannes, les robinets et les rétrécissements sont déterminées selon la formule suivante :

$$\Delta P_s = \rho K \frac{V^2}{2g} \quad (V.12)$$

Avec :

- ΔP_s : Chute de pression singulière en (Kg/cm²).
- ρ : Masse volumique en (Kg/m³).
- K : Coefficient de perte de charge locale [Coude 90°, $K = (0,50 \div 0,75)$], (Voir Annexe 04).
- V : Vitesse d'écoulement en (m/s).
- g : Accélération de la pesanteur en (m/s²).

Données :

Paramètres	Données
Pression (kg/cm ²)	6.8
Température (°C)	12.4
Température ambiante(°C)	25
Débit (kg/h)	$1,18 \times 10^4$
Volume m ³	24.99
Longeur de la ligne (m)	130
Matériau	A53
N° coude	8

VII.4. Les résultats :

La masse molaire :

On a :

$$M_{moy} = \sum M_i \cdot x_i$$

$$\Rightarrow M_{moy} = (16 \times 0,17) + (30 \times 0,56) + (44 \times 99,01) + (58 \times 0,13) + (58 \times 0,1)$$

$$M_{moy} = 43,89 \text{ g/mol}$$

La masse volumique :

La loi des gaz parfait est donnée par la formule :

$$pv = nRT \dots\dots\dots (V.13)$$

Avec :

- n : Nombre de mole

$$n = \frac{m}{M} \dots\dots\dots (V.14)$$

- R = 0,082 Atm.l/mol.K

En remplaçant les formules (V.9) et (V.14) dans la formule (V.13), on obtient :

$$\Rightarrow \rho = \frac{(P \times M)}{(R \times T)}$$

Avec 6,8bar = 6,711 atm

$$\Rightarrow \rho = (6,711 \times 43,89) / (0,082 \times 285,5)$$

$$\rho = 12,58 \text{ Kg/m}^3$$

La vitesse d'écoulement :

Selon la loi de la continuité :

$$V = \frac{Q_m}{\rho V}$$

$$\Rightarrow V = (4 \times Q_m) / (\rho \times \pi \times D^2)$$

$$V = (4 \times 1,18.10^4) / (12,58 \times 3,14 \times 0,154^2 \times 3600)7$$

$$V = 13,99 \text{ m/s}$$

Nombre de Reynolds :

On a :

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta}$$

On a :

- $\mu = 8,091 \cdot 10^{-3}$
- $\rho = 8,091 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m.s}$

$$\Rightarrow \text{Re} = (12,54 \times 13,99 \times 0,154) / (8,091 \cdot 10^{-5})$$

$$\text{Re} = 3,35 \cdot 10^5$$

Cette valeur est supérieure à 3000, donc l'écoulement du gaz est turbulent.

Les pertes de charges :

La dépressurisation du ballon V-1006 de 6.8 jusqu'à 2.8 kg/cm² se déroule de manière Dynamique, ce qui entraîne une diminution progressive du profil de pression initial. Cela induit un changement dans le profil des pertes de charge avant que le système ne soit connecté à la vanne de détente.

Calcul des pertes de charge pour une pression de départ de 6,8 sous les conditions du ballon V-1006 à l'arrêt.

La perte de charge totale ΔPT :

On distingue deux types de perte de charge :

$$\Delta PT = \Delta PI + \Delta PS \quad \text{Avec :} \quad \Delta PS = \Delta PS1 + \Delta PS2 + \Delta PS3$$

a. La perte de charge linéaire :

Correspond à l'écoulement général dans une conduite rectiligne. Elles sont calculées selon

l'équation de DARCY :

$$\Delta PI = \lambda \rho \frac{L V^2}{D 2g}$$

Le coefficient de perte de charge (λ) est déterminé en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative (ε/D), $\varepsilon=0,006$ cm pour l'acier au carbone. (Voir le diagramme de Moody Annexe 03).

On a :

- $\text{Re} = 3,35 \cdot 10^5$
- $(\varepsilon/D) = 3,90 \cdot 10^{-4}$

À partir le diagramme de MOODY $\Rightarrow \lambda = 0,018$

$$\Rightarrow \Delta P_L = 0,018 \times 12,58 \times (130 / 0,154) \times [(13,99)^2 / (2 \times 9,81)]$$

$$\Delta P_L = 1906,8 \text{ Kg/m}^2 = 0,19 \text{ Kg/cm}^2$$

b. La perte de charge singulière :

On a :

$$\Delta P_s = \rho K \frac{v^2}{2g}$$

Pour le coefficient de perte de charge dans les accessoires (K). (Voir Annexe 04)

b.1. Les Coudes :

Nous avons 08 coudes de 90°C, D'après l'annexe N°04 on a K=0.50.

$$\Rightarrow \Delta P_{s1} = 8 \times [12,58 \times 0,50 \times [(13,99)^2 / (2 \times 9,81)]$$

$$\Delta P_{s1} = 500,981 \text{ Kg/m}^2 = 0,05 \text{ Kg/cm}^2$$

b.2. Vanne manuelle :

Nous avons une vanne manuelle avec K=0,25.

$$\Rightarrow \Delta P_s = [12,58 \times 0,25 \times [(13,99)^2 / (2 \times 9,81)]$$

$$\Delta P_{s2} = 31,37 \text{ Kg/m}^2 = 0,0031 \text{ Kg/cm}^2$$

b.3. Vanne de détente (Pv) :

Sur cette phase nous avons une vanne Pv de K=3,0.

$$\Rightarrow \Delta P_{s3} = [12,758 \times 3 \times [(13,99)^2 / (2 \times 9,81)]$$

$$\Delta P_{s3} = 376,74 \text{ Kg/m}^2 = 0,037 \text{ Kg/cm}^2$$

D'autre part, on a : $\Delta P_S = \Delta P_{S1} + \Delta P_{S2} + \Delta P_{S3}$

$$\Rightarrow \Delta P_T = 0,19 + 0,05 + 0,0031 + 0,037$$

$$\Delta P_T = 0,308 \text{ Kg/cm}^2$$

Calcul de la pression d'entrée da la vanne de détente P2 :

D'après la loi fondamentale de l'hydrostatique on aura :

$$P2 = P1 + \rho \times g \times H - \Delta PT$$

Avec :

- P1 : la pression d'équilibre dans le ballon V-1006, P1 = 6 Kg/cm2 .
- H : La déférence de la hauteur entre le haut du ballon V-1006 et la vanne de détente, (H = 5m).
- ρ : La masse volumique en (Kg/m3).
- g : L'accélération de la pesanteur (m/s2), on prend g = 9,81 m/s2

$$P2 = 6 + [12,58 \times 9,81 \times 5]. 10^{-4} - 0,308$$

$P2 = 5,63 \text{ Kg/cm}2$

Comparaison entre les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus par calcul théorique :

Pour considérer notre solution comme satisfaisante, il est essentiel que les résultats obtenus par la simulation se rapprochent de ceux obtenu par calcul théorique. Cela permettra d'évaluer la précision et la fiabilité de notre solution simulée.

L'erreur relative est calculée selon la relation suivante :

$$Erreur = \frac{V(calcul) - V(simulation) \times 100}{V(calcul)}$$

- V calcul : valeurs obtenus par calcul.
- V simulation : Valeur obtenus par simulation.

Tableau :

Paramètre	Résultats des calcul	Résultats de HYSYS	Erreur%
Vitesse d'écoulement m/s	13,99	14,7	-5,07
Perte de charge totale kg/cm ²	0,308	0,241	2,1
Pression d'entrée P1 kg/cm ²	5,9	5,769	2 ,27
Pression d'arrivée P2 kg/cm ²	5,63	5,555	1,33

Les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus par calcul sont très proche cela signifie que le

logiciel de simulation est capable de reproduire de manière précise le comportement du système étudié ce qui renforce la confiance dans l'exactitude de la simulation et confirme sa validité pour évaluer et optimiser le processus en vue de sa réalisation.

ETUDE TECHNICO- ECONOMIQUE

VIII.1. Introduction :

Avant de considérer la mise en œuvre de notre solution proposée il est impératif de réaliser une étude technico-économie afin d'évaluer sa faisabilité, le coût d'investissement et son impact global.

VIII.2. L'évaluation de la rentabilité :

L'étude de la rentabilité sera basée sur un train de la phase (I) en prenant comme critère d'évaluation le coût de revient économique.

VIII.3. L'évaluation du manque à gagner :

La quantité de propane récupéré (en tonne) pendant un arrêt d'un seul train est calculée de la manière suivante :

$$m = \text{Volume de Propane récupéré} \times \text{Masse Volumique}$$

$$m = 1,18 \times 10^4 \text{ kg}$$

$$m = 1,18 \times 10^4 \times 23 \text{ arrêts/an} = 271400 \text{ kg/an}$$

$$m = 271,4 \text{ Tonne/an.}$$

On se basant sur le prix actuel du propane 2100\$/T, le gain annuel réalisé sera :

$$\text{Le gain Annuel} = 2100 \times 217,4$$

$$\text{Le gain Annuel} = 456540 \$$$

Tableau VIII.1: Tableau récapitulatif de l'évaluation du manque à gagner.

Volume de Propane récupère Pendant un arrêt (m ³)	La quantité de Propane récupère Pendant un arrêt (t)	La quantité de propane récupère Pendant une Année (t)	Manque à gagner annuel \$
24,99	11,8	271,4	456540

VIII.4. Estimation du coût de l'investissement de la ligne de récupération :

L'investissement désigne d'allouer des ressources financières dans le but de générer des bénéfices futurs ou avantages économiques à long termes.

Le capital investi représente le montant total des ressources financières engagées par une entreprise dans la concrétisation d'un projet d'investissement

- Le coût de tuyauterie.
- Le coût des accessoires de la ligne.
- Le coût de réalisation

VIII.4.1. Le coût de Tuyauterie :

le tableau suivant résume le cout totale de la tuyauterie :

Tableau VIII.2: Le coût de tuyauterie

Type de l'acier	Diamètre en (pouces)	Longueur en (m)	Coût total en (\$)
A53.GrA	6	130	2160

VIII.4.2. Le coût des accessoires :

Le coût total des accessoires sera résumé dans le tableau suivant :

Tab.VI.3 : Le coût des accessoires. Type Diamètre (pouces) Nombre Coût total (\$) Coude 90°A420 6 4 60 Vanne manuelle-A350 6 1 950 Vanne de détente 6 1 38000

Tableau VIII.3:Le coût des accessoires

Type	Diamètre (pouces)	Nombre	Coût total (\$)
Coude 90°A420	6	8	160
Vanne manuelle-A350	6	1	1000
Vanne de détente	6	1	38000

VIII.4.3. Estimation des coûts de réalisation :

Les coûts des différentes étapes de réalisation sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau VIII.3 : Les coûts des différentes étapes de réalisation

Type	Opération	Coût (\$)
Tube-A53	Soudage	794,7
	Radiographie	227
	soufflage	10,4
	Préparation et remplissage des sections	609
	Vidange et séchage	120
	Total	1761
Coude 90°-A420		150
Vannes		100

Le coût total (le coût d'achat + le coût de réalisation) :

Le coût total=C_t tube + C_t coudes+ C_t vannes

Le coût total= 3921 + 310 + 38000

Le coût total= 42231 \$

Le capital à investir pour un seul train est de **42231 \$**.

Puisque la modification concerne les quatre trains de la phase (I), le coût total de la modification sera alors : Coût Total = $42231 \times 4 = 168924$ \$.

VIII.5. Le bénéfice :

Le bénéfice d'un projet représente la différence entre les revenus générés par ce projet et les coûts associés à sa réalisation. En d'autres termes, c'est le montant qui reste après avoir soustrait tous les coûts (y compris les coûts d'investissement, les coûts de production, les frais généraux, etc.) des revenus obtenus grâce au projet.

Le bénéfice= rentabilité – cout d'investissement

Le bénéfice= 456540 - 168924

Le bénéfice=287616 \$

La marge bénéficiaire :

La marge bénéficiaire est un indicateur financier qui mesure la proportion des ventes ou des revenus totaux d'une entreprise qui se transforme en bénéfice net. Elle est souvent exprimée en pourcentage et indique la rentabilité globale de l'entreprise.

$$\text{Marge bénéficiaire} = \left(\frac{\text{Bénéfice net}}{\text{Revenu total}} \right) \times 100$$

$$\text{Marge bénéficiaire} = \frac{287616}{456540}$$

Marge bénéficiaire = 62.9 %

Conclusion générale

Conclusion générale :

La récupération des gaz torchés au niveau du complexe GP1Z est non seulement une nécessité environnementale mais aussi une opportunité économique.

Nous avons tenté, au cours des différentes étapes de cette étude, de trouver une solution appropriée afin de minimiser les quantités de propane réfrigérant torchées lors du démarrage de la section de réfrigération au niveau du complexe GP1Z. Cela nous a conduit à réaliser une étude sur la mise en place d'une ligne de récupération des gaz torchés. Nous avons simulé cette ligne à l'aide du simulateur HYSYS et, d'après cette étude, nous concluons que :

- ✓ Une quantité de 271,4 tonne peut être récupérée par an à partir des 4 trains de la phase 1 lors son démarrage.
- ✓ La faisabilité de la ligne proposée de récupération est simulée avec le logiciel HYSYS, les conditions d'injections simulées sont compatibles à l'envoi à la ligne BOG.
- ✓ La réalisation de cette opération permettra de récupérer les 271,4 Tonne par un investissement de 168924 \$.
- ✓ il permettra d'éliminer le CO₂ qui se brûlait à l'atmosphère, et contribuera à la réduction des gaz à effet de serre. Aussi réduire et maîtriser la consommation énergétique au niveau du Complexe GP1Z. Un gain en énergie engendre un gain dans la facture payée par le complexe.

Nous recommandons qu'une telle étude soit prise en considération par les responsables de ce complexe pour d'une part vue économie et d'autre part pour préserver l'environnement et la santé

Bibliographie :

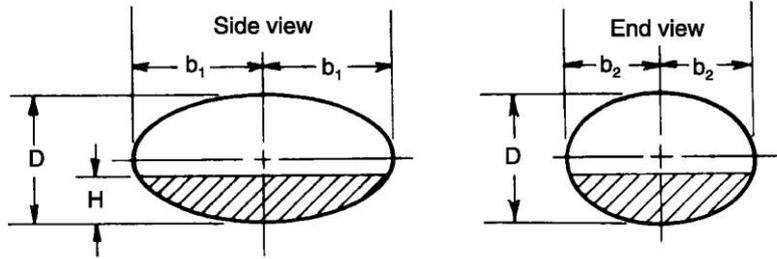
- [1]. Kaabouche, Boumedien. Description de la section de stockage de l'unité GPL-1 HASSI MESSAOUD. Novembre 2017 ; 38P
- [2]. J. P. Wauquier, procedes de separation, Tome II, Edition Technip, 1998
- [3]. ROBERT, C. REID, J. M. PRAUSNITZ et THOMAS K. SHERWOOD, The Properties of Gases and Liquids, Third Edition.
- [4]. Boumaza, A. Introduction à la chaine pétrolière et gazière. 2015; 197P
- [5]. Abbaci, Youcef. Calcul des paramètres de fonctionnement du dépropaniseur (Unité 38, Traitement du GPL) à HASSI-R'MEL. Juin 2012 ; 60P.
- [6]. Rapport annuelle de SONATRACH 2021-2022
- [7]. Manuel Opérateur GP1/Z, Généralités sur le complexe
- [8]. <https://www.naftal.dz/fr/>
- [9]. 2022 LPG Statistical Review.pdf (argusmedia.com)
- [10]. IHI ENGINEERING REVIEW Vol. 44 No. 2 2011
- [11]. Hajd, Ali Djamel. Etude de la section de déshydratation de l'unité GPL-2 HASSIMESSAOUD. Aout
- [12]. Manuel opératoire de GP1Z section de réfrigération .
- [13]. Le cycle frigorifique (cdc-gtb.lu) chapitre V.2017
- [14]. HOCEINI, A. (2007). Etude de l'impact des gaz torchés de l'industrie pétrolière sur l'environnement. Thèse de magister, Université de Science et Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Oran.
- [15]. MW. Pullman Kellogg company « process unit book », volume44, USA 1994 Réf. N°178269 & n°1613
- [16]. Fatima Zohra selini «l'impact du projet RGA sur le torchage et la production 2018
- [17]. : PHILLIIPPE ARQUES, La pollution de l'air, causes, conséquences, Edition Edisud, France 1998, 207 pages
- [18]. ANITA MARANGOLY GEORGE, Mettre fin aux gaz torchés pour parer au changement climatique, DÉCEMBRE 2015.
- [19]. Rapport de synthèse du GIEC : Changements climatiques 2023
- [20]. COMMUNIQUÉS DE PRESSE Le volume mondial de gaz torchés atteint son niveau le plus bas depuis 2010, MARS 2023.
- [21]. Réduction du torchage dans le monde : une décennie de progrès au point mort (banquemondiale.org)

ANNEXES

Annexe 01

Coefficients and Formulas for Determining Partial Volumes in Ellipsoids and Spheres

GENERAL ELLIPSOID



Total volume of ellipsoid = $1/6 \pi K_1 K_2 D^3$

Partial Volume = $1/6 \pi K_1 K_2 D^3 [f(Ze)]$

$K_1 = 2b_1/D$ $K_2 = 2b_2/D$

$Ze = H/D$ $f(Ze) = \text{ellipsoidal coefficient (see below) or } = -\left(\frac{H_1}{D}\right)^2 \times \left(-3 + \frac{2H_1}{D}\right)$

Coefficients for Partial Volumes of Ellipsoids or Spheres, f(Ze)

Ze	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
.00	.000000	.000003	.000012	.000027	.000048	.000075	.000108	.000146	.000191	.000242
.01	.000298	.000360	.000429	.000503	.000583	.000668	.000760	.000857	.000960	.001069
.02	.001184	.001304	.001431	.001563	.001700	.001844	.001993	.002148	.002308	.002474
.03	.002646	.002823	.003006	.003195	.003389	.003589	.003795	.004006	.004222	.004444
.04	.004672	.004905	.005144	.005388	.005638	.005893	.006153	.006419	.006691	.006968
.05	.007250	.007538	.007831	.008129	.008433	.008742	.009057	.009377	.009702	.010032
.06	.010368	.010709	.011055	.011407	.011764	.012126	.012493	.012865	.013243	.013626
.07	.014014	.014407	.014806	.015209	.015618	.016031	.016450	.016874	.017303	.017737
.08	.018176	.018620	.019069	.019523	.019983	.020447	.020916	.021390	.021869	.022353
.09	.022842	.023336	.023835	.024338	.024847	.025360	.025879	.026402	.026930	.027462
.10	.028000	.028542	.029090	.029642	.030198	.030760	.031326	.031897	.032473	.033053
.11	.033638	.034228	.034822	.035421	.036025	.036633	.037246	.037864	.038486	.039113
.12	.039744	.040380	.041020	.041665	.042315	.042969	.043627	.044290	.044958	.045630
.13	.046306	.046987	.047672	.048362	.049056	.049754	.050457	.051164	.051876	.052592
.14	.053312	.054037	.054765	.055499	.056236	.056978	.057724	.058474	.059228	.059987
.15	.060750	.061517	.062288	.063064	.063843	.064627	.065415	.066207	.067003	.067804
.16	.068608	.069416	.070229	.071046	.071866	.072691	.073519	.074352	.075189	.076029
.17	.076874	.077723	.078575	.079432	.080292	.081156	.082024	.082897	.083772	.084652
.18	.085536	.086424	.087315	.088210	.089109	.090012	.090918	.091829	.092743	.093660
.19	.094582	.095507	.096436	.097369	.098305	.099245	.100189	.101136	.102087	.103042
.20	.104000	.104962	.105927	.106896	.107869	.108845	.109824	.110808	.111794	.112784
.21	.113778	.114775	.115776	.116780	.117787	.118798	.119813	.120830	.121852	.122876
.22	.123904	.124935	.125970	.127008	.128049	.129094	.130142	.131193	.132247	.133305
.23	.134366	.135430	.136498	.137568	.138642	.139719	.140799	.141883	.142969	.144059
.24	.145152	.146248	.147347	.148449	.149554	.150663	.151774	.152889	.154006	.155127
.25	.156250	.157376	.158506	.159638	.160774	.161912	.163054	.164198	.165345	.166495
.26	.167648	.168804	.169963	.171124	.172289	.173456	.174626	.175799	.176974	.178153
.27	.179334	.180518	.181705	.182894	.184086	.185281	.186479	.187679	.188882	.190088
.28	.191296	.192507	.193720	.194937	.196155	.197377	.198601	.199827	.201056	.202288
.29	.203522	.204759	.205998	.207239	.208484	.209730	.210979	.212231	.213485	.214741
.30	.216000	.217261	.218526	.219792	.221060	.222331	.223604	.224879	.226157	.227437
.31	.228718	.230003	.231289	.232578	.233870	.235163	.236459	.237757	.239057	.240359
.32	.241664	.242971	.244280	.245590	.246904	.248219	.249536	.250855	.252177	.253500
.33	.254826	.256154	.257483	.258815	.260149	.261484	.262822	.264161	.265503	.266847
.34	.268192	.269539	.270889	.272240	.273593	.274948	.276305	.277663	.279024	.280386
.35	.281750	.283116	.284484	.285853	.287224	.288597	.289972	.291348	.292727	.294106
.36	.295488	.296871	.298256	.299643	.301031	.302421	.303812	.305205	.306600	.307996
.37	.309394	.310793	.312194	.313597	.315001	.316406	.317813	.319222	.320632	.322043
.38	.323456	.324870	.326286	.327703	.329122	.330542	.331963	.333386	.334810	.336235
.39	.337662	.339090	.340519	.341950	.343382	.344815	.346250	.347685	.349122	.350561

Note: Coefficients apply for the volume of 2 ellipsoidal or hemispherical heads not the volume for 1 head.

Coefficients and Formulas for Determining Partial Volumes in Ellipsoids and Spheres

Coefficients for Partial Volumes of Ellipsoids or Spheres, $f(Ze)$										
Ze	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
.40	.352000	.353441	.354882	.356325	.357769	.359215	.360661	.362109	.363557	.365007
.41	.366458	.367910	.369363	.370817	.372272	.373728	.375185	.376644	.378103	.379563
.42	.381024	.382486	.383949	.385413	.386878	.388344	.389810	.391278	.392746	.394216
.43	.395686	.397157	.398629	.400102	.401575	.403049	.404524	.406000	.407477	.408954
.44	.410432	.411911	.413390	.414870	.416351	.417833	.419315	.420798	.422281	.423765
.45	.425250	.426735	.428221	.429708	.431195	.432682	.434170	.435659	.437148	.438638
.46	.440128	.441619	.443110	.444601	.446093	.447586	.449079	.450572	.452066	.453560
.47	.455054	.456549	.458044	.459539	.461035	.462531	.464028	.465524	.467021	.468519
.48	.470016	.471514	.473012	.474510	.476008	.477507	.479005	.480504	.482003	.483593
.49	.485002	.486501	.488001	.489501	.491000	.492500	.494000	.495500	.497000	.498500
.50	.500000	.500000	.503000	.504500	.506000	.507500	.509000	.510499	.511999	.513499
.51	.514998	.516497	.517997	.519496	.520995	.522493	.523992	.525490	.526988	.528486
.52	.529984	.531481	.532979	.534476	.535972	.537469	.538965	.540461	.541956	.543451
.53	.544946	.546440	.547934	.549428	.550921	.552414	.553907	.555399	.556890	.558381
.54	.559872	.561362	.562852	.564341	.565830	.567318	.568805	.570292	.571779	.573265
.55	.574750	.576235	.577719	.579202	.580685	.582167	.583649	.585130	.586610	.588089
.56	.589568	.591046	.592523	.594000	.595476	.596951	.598425	.599898	.601371	.602843
.57	.604314	.605784	.607254	.608722	.610190	.611656	.613122	.614587	.616051	.617514
.58	.618976	.620437	.621897	.623356	.624815	.626272	.627728	.629183	.630637	.632090
.59	.633542	.634993	.636443	.637891	.639339	.640785	.642231	.643675	.645118	.646559
.60	.648000	.649439	.650878	.652315	.653750	.655185	.656618	.658050	.659481	.660910
.61	.662338	.663765	.665190	.666614	.668037	.669458	.670878	.672297	.673714	.675130
.62	.676544	.677957	.679368	.680778	.682187	.683594	.684999	.686403	.687806	.689207
.63	.690606	.692004	.693400	.694795	.696188	.697579	.698969	.700357	.701744	.703129
.64	.704512	.705894	.707273	.708652	.710028	.711403	.712776	.714147	.715516	.716884
.65	.718250	.719614	.720976	.722337	.723695	.725052	.726407	.727760	.729111	.730461
.66	.731808	.733153	.734497	.735839	.737178	.738516	.739851	.741185	.742517	.743846
.67	.745174	.746500	.747823	.749145	.750464	.751781	.753096	.754410	.755720	.757029
.68	.758336	.759641	.760943	.762243	.763541	.764837	.766130	.767422	.768711	.769997
.69	.771282	.772563	.773843	.775121	.776396	.777669	.778940	.780208	.781474	.782739
.70	.784000	.785259	.786515	.787769	.789021	.790270	.791516	.792761	.794002	.795241
.71	.796478	.797712	.798944	.800173	.801399	.802623	.803845	.805063	.806280	.807493
.72	.808704	.809912	.811118	.812321	.813521	.814719	.815914	.817106	.818295	.819482
.73	.820666	.821847	.823026	.824201	.825374	.826544	.827711	.828876	.830037	.831196
.74	.832352	.833505	.834655	.835802	.836946	.838088	.839226	.840362	.841494	.842624
.75	.843750	.844873	.845994	.847111	.848226	.849337	.850446	.851551	.852653	.853752
.76	.854848	.855941	.857031	.858117	.859201	.860281	.861358	.862432	.863502	.864570
.77	.865634	.866695	.867753	.868807	.869858	.870906	.871951	.872992	.874030	.875065
.78	.876096	.877124	.878148	.879170	.880187	.881202	.882213	.883220	.884224	.885225
.79	.886222	.887216	.888206	.889192	.890176	.891155	.892131	.893104	.894073	.895038
.80	.896000	.896958	.897913	.898864	.899811	.900755	.901695	.902631	.903564	.904493
.81	.905418	.906340	.907257	.908171	.909082	.909988	.910891	.911790	.912685	.913577
.82	.914464	.915348	.916228	.917103	.917976	.918844	.919708	.920568	.921425	.922277
.83	.923126	.923971	.924811	.925648	.926481	.927309	.928134	.928954	.929771	.930584
.84	.931392	.932196	.932997	.933793	.934585	.935373	.936157	.936936	.937712	.938483
.85	.939250	.940013	.940772	.941526	.942276	.943022	.943764	.944501	.945235	.945963
.86	.946688	.947408	.948124	.948836	.949543	.950246	.950944	.951638	.952328	.953013
.87	.953694	.954370	.955042	.955710	.956373	.957031	.957685	.958335	.958980	.959620
.88	.960256	.960887	.961514	.962136	.962754	.963367	.963975	.964579	.965178	.965772
.89	.966362	.966947	.967527	.968103	.968674	.969240	.969802	.970358	.970910	.971458
.90	.972000	.972538	.973070	.973598	.974121	.974640	.975153	.975662	.976165	.976664
.91	.977158	.977647	.978131	.978610	.979084	.979553	.980017	.980477	.980931	.981380
.92	.981824	.982263	.982697	.983126	.983550	.983969	.984382	.984791	.985194	.985593
.93	.985986	.986374	.986757	.987135	.987507	.987874	.988236	.988593	.988945	.989291
.94	.989632	.989968	.990298	.990623	.990943	.991258	.991567	.991871	.992169	.992462
.95	.992750	.993032	.993309	.993581	.993847	.994107	.994362	.994612	.994856	.995095
.96	.995328	.995556	.995778	.995994	.996205	.996411	.996611	.996805	.996994	.997177
.97	.997354	.997526	.997692	.997852	.998007	.998156	.998300	.998437	.998569	.998696
.98	.998816	.998931	.999040	.999143	.999240	.999332	.999417	.999497	.999571	.999640
.99	.999702	.999758	.999809	.999854	.999892	.999925	.999952	.999973	.999988	.999997
1.00	1.000000									

Note: Coefficients apply for the volume of 2 ellipsoidal or hemispherical heads not the volume for 1 head.

Annexe 02

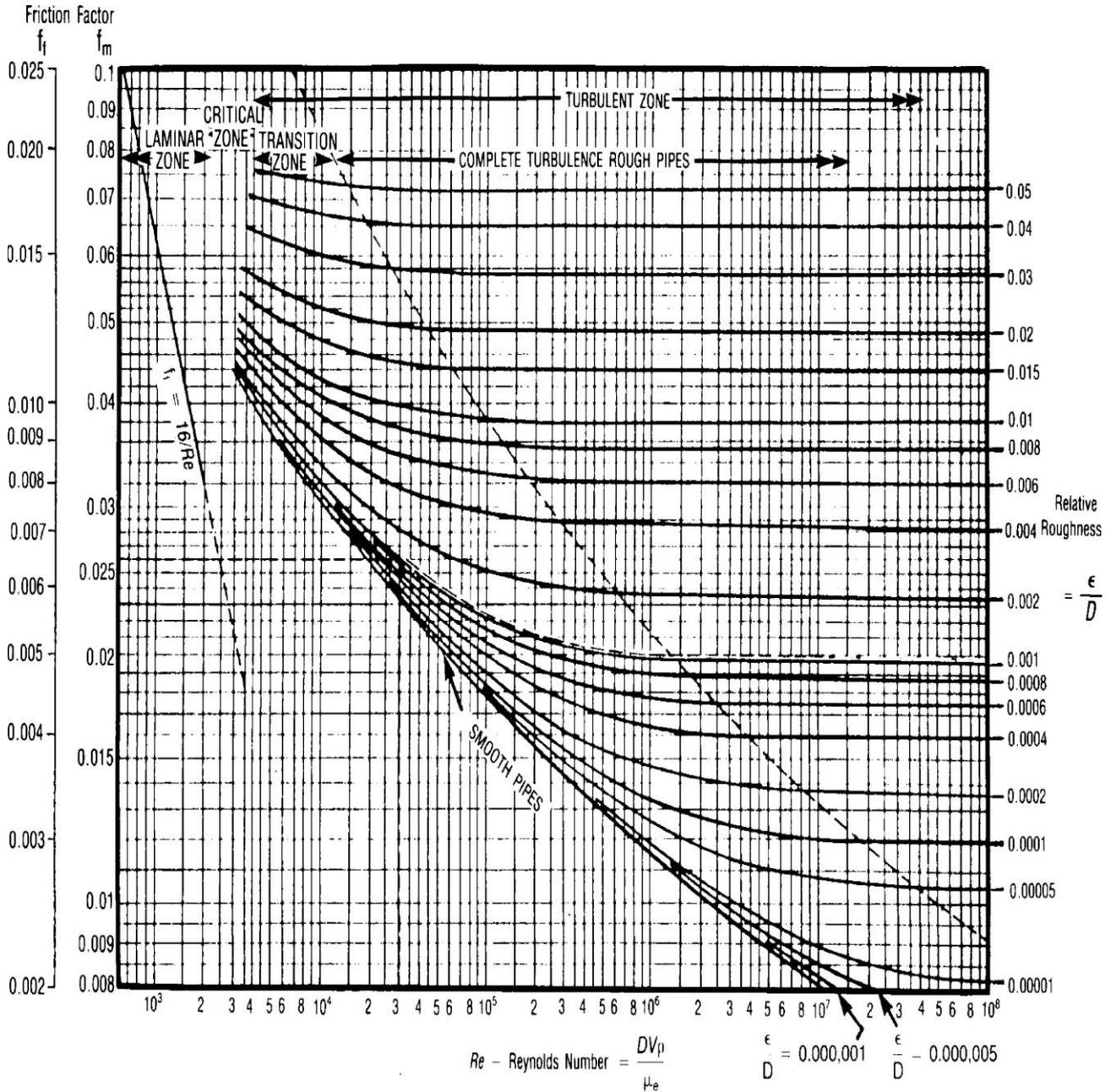
Coefficients for Partial Volumes of Horizontal Cylinders, $f(Z_c)$

Zc	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
.00	.000000	.000053	.000151	.000279	.000429	.000600	.000788	.000992	.001212	.001445
.01	.001692	.001952	.002223	.002507	.002800	.003104	.003419	.003743	.004077	.004421
.02	.004773	.005134	.005503	.005881	.006267	.006660	.007061	.007470	.007886	.008310
.03	.008742	.009179	.009625	.010076	.010534	.010999	.011470	.011947	.012432	.012920
.04	.013417	.013919	.014427	.014940	.015459	.015985	.016515	.017052	.017593	.018141
.05	.018692	.019250	.019813	.020382	.020955	.021533	.022115	.022703	.023296	.023894
.06	.024496	.025103	.025715	.026331	.026952	.027578	.028208	.028842	.029481	.030124
.07	.030772	.031424	.032081	.032740	.033405	.034073	.034747	.035423	.036104	.036789
.08	.037478	.038171	.038867	.039569	.040273	.040981	.041694	.042410	.043129	.043852
.09	.044579	.045310	.046043	.046782	.047523	.048268	.049017	.049768	.050524	.051283
.10	.052044	.052810	.053579	.054351	.055126	.055905	.056688	.057474	.058262	.059054
.11	.059850	.060648	.061449	.062253	.063062	.063872	.064687	.065503	.066323	.067147
.12	.067972	.068802	.069633	.070469	.071307	.072147	.072991	.073836	.074686	.075539
.13	.076393	.077251	.078112	.078975	.079841	.080709	.081581	.082456	.083332	.084212
.14	.085094	.085979	.086866	.087756	.088650	.089545	.090443	.091343	.092246	.093153
.15	.094061	.094971	.095884	.096799	.097717	.098638	.099560	.100486	.101414	.102343
.16	.103275	.104211	.105147	.106087	.107029	.107973	.108920	.109869	.110820	.111773
.17	.112728	.113686	.114646	.115607	.116572	.117538	.118506	.119477	.120450	.121425
.18	.122403	.123382	.124364	.125347	.126333	.127321	.128310	.129302	.130296	.131292
.19	.132290	.133291	.134292	.135296	.136302	.137310	.138320	.139332	.140345	.141361
.20	.142378	.143398	.144419	.145443	.146468	.147494	.148524	.149554	.150587	.151622
.21	.152659	.153697	.154737	.155779	.156822	.157867	.158915	.159963	.161013	.162066
.22	.163120	.164176	.165233	.166292	.167353	.168416	.169480	.170546	.171613	.172682
.23	.173753	.174825	.175900	.176976	.178053	.179131	.180212	.181294	.182378	.183463
.24	.184550	.185639	.186729	.187820	.188912	.190007	.191102	.192200	.193299	.194400
.25	.195501	.196604	.197709	.198814	.199922	.201031	.202141	.203253	.204368	.205483
.26	.206600	.207718	.208837	.209957	.211079	.212202	.213326	.214453	.215580	.216708
.27	.217839	.218970	.220102	.221235	.222371	.223507	.224645	.225783	.226924	.228065
.28	.229209	.230352	.231498	.232644	.233791	.234941	.236091	.237242	.238395	.239548
.29	.240703	.241859	.243016	.244173	.245333	.246494	.247655	.248819	.249983	.251148
.30	.252315	.253483	.254652	.255822	.256992	.258165	.259338	.260512	.261687	.262863
.31	.264039	.265218	.266397	.267578	.268760	.269942	.271126	.272310	.273495	.274682
.32	.275869	.277058	.278247	.279437	.280627	.281820	.283013	.284207	.285401	.286598
.33	.287795	.288992	.290191	.291390	.292591	.293793	.294995	.296198	.297403	.298608
.34	.299814	.301021	.302228	.303438	.304646	.305857	.307068	.308280	.309492	.310705
.35	.311918	.313134	.314350	.315566	.316783	.318001	.319219	.320439	.321660	.322881
.36	.324104	.325326	.326550	.327774	.328999	.330225	.331451	.332678	.333905	.335134
.37	.336363	.337593	.338823	.340054	.341286	.342519	.343751	.344985	.346220	.347455
.38	.348690	.349926	.351164	.352402	.353640	.354879	.356119	.357359	.358599	.359840
.39	.361082	.362325	.363568	.364811	.366056	.367300	.368545	.369790	.371036	.372282
.40	.373530	.374778	.376026	.377275	.378524	.379774	.381024	.382274	.383526	.384778
.41	.386030	.387283	.388537	.389790	.391044	.392298	.393553	.394808	.396063	.397320
.42	.398577	.399834	.401092	.402350	.403608	.404866	.406125	.407384	.408645	.409904
.43	.411165	.412426	.413687	.414949	.416211	.417473	.418736	.419998	.421261	.422525
.44	.423788	.425052	.426316	.427582	.428846	.430112	.431378	.432645	.433911	.435178
.45	.436445	.437712	.438979	.440246	.441514	.442782	.444050	.445318	.446587	.447857
.46	.449125	.450394	.451663	.452932	.454201	.455472	.456741	.458012	.459283	.460554
.47	.461825	.463096	.464367	.465638	.466910	.468182	.469453	.470725	.471997	.473269
.48	.474541	.475814	.477086	.478358	.479631	.480903	.482176	.483449	.484722	.485995
.49	.487269	.488542	.489814	.491087	.492360	.493633	.494906	.496179	.497452	.498726

Annexe 03

Diagramme de MOODY

Coefficient de frottement f pour n'importe quelle espèce ou taille de tuyau « Courbes pour la rugosité relative $\frac{\epsilon}{D}$ de 0,000001 à 0,05 »



Annexe 04

Pertes de charges dans les accessoires

Accessoires	Pertes de charge moyenne
Réservoir à conduite – connexion au ras de la paroi (perte à l'entrée)	$0.50 \frac{V_2^2}{2g}$
-tuyau entrant	$1.00 \frac{V_2^2}{2g}$
-connexion arrondie	$0.05 \frac{V_2^2}{2g}$
Conduite à réservoir (perte à la sortie)	$1.00 \frac{V_1^2}{2g}$
Divergent brusque	$\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
Divergent progressif	$k \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
Venturis, buses et orifices	$\left(\frac{1}{C_v^2} - 1\right) \frac{V_2^2}{2g}$
Convergent brusque	$k_c \frac{V_2^2}{2g}$
Coudes, accessoires, vannes, clapets Quelques valeurs courantes de K sont : 45°, coude0.35 à 0.45 90°, coude.....0.50 à 0.75 Té,.....1.5 à 2.00 Vannes de portes (ouvertes).....aprox.0.25 Vannes de contrôle (ouvertes).....aprox.3.0 Clapet anti- retour à disque levable (4'').....0.68	$k = \frac{V^2}{2g}$

ASTM acier au carbone

ASTM carbon steel

ASTM A 53 / A 53M-99b

Cette spécification couvre les tubes sans soudure et soudés en acier, noir et galvanisé de NPS 1/8" à 26" inclus et d'épaisseur conforme au tableau (voir la spécification).
Les tubes pourront être fournis suivant les types et les grades :

Type F : FBW Soudure bord à bord après passage de la tôle dans un four - Nuance A
Type E : ERW Soudure par résistance électrique - Nuances A et B
Type S : Sans soudure - Nuances A et B

COMPOSITION CHIMIQUE MAXI EN %

Type	Nuance	C	Mn	S	P	Cr (a)	Cu (a)	Mo (a)	Ni (a)	V (a)
S	A	0,25	0,95	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
	B	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
E	A	0,25	0,95	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
	B	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
F	A	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08

(a) La teneur de ces cinq éléments combinés ne doit pas dépasser 1 %

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Type	Nuance	Fabrication	Résistance rupture minimum		Limite élastique minimum		Allongement minimum en %, sur 2"
			ksi	MPa	ksi	MPa	
F	A	Aciers Martin ou four électrique ou oxygène basique	48,0	330	30,0	205	$\sigma = 625.000 A^{0,22} / U^{0,9}$ (Voir ASTM)
E & S	A		48,0	330	30,0	205	
	B		60,0	415	35,0	240	

TOLÉRANCES

Sur diamètre extérieur	Diamètre nominal $\leq 1 1/2$ (1,900" OD)	$\pm 1/64"$ (0,40 mm)
	Diamètre nominal ≥ 2 (2,375" OD)	$\pm 1 \%$
Sur épaisseur		- 12,5 %
Sur masse		$\pm 10 \%$

PRESSION D'ESSAI HYDRAULIQUE : voir spécification détaillée de la norme.

DIMENSIONS : voir pages 40 et suivantes

ASTM A 53 / A 53M-99b

This specification covers seamless and welded black and hot-dipped galvanized steel pipe in NPS 1/8 to 26 inclusive with nominal wall thickness as given in tables (see the standard).
Pipe may be furnished in the following types and grades :

Type F : Furnace-butt welded (FBW) - Grade A
Type E : Electric-resistance welded (ERW) - Grades A and B
Type S : Seamless - Grades A and B

CHEMICAL REQUIREMENTS MAXI IN %

Type	Grade	C	Mn	S	P	Cr (a)	Cu (a)	Mo (a)	Ni (a)	V (a)
S	A	0,25	0,95	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
	B	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
E	A	0,25	0,95	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
	B	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
F	A	0,30	1,20	0,045	0,05	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08

(a) These five elements combined shall not exceed 1 %

TENSILE REQUIREMENTS

Type	Grade	Manufacture	Minimum tensile strength		Minimum yield strength		Minimum elongation in 2", per cent
			ksi	MPa	ksi	MPa	
F	A	Open hearth or electric furnace or basic oxygen	48.0	330	30.0	205	$\sigma = 625.000 A^{0,22} / U^{0,9}$ (See ASTM standard)
E & S	A		48.0	330	30.0	205	
	B		60.0	415	35.0	240	

TOLERANCES

Outside diameter (pipe body)	NPS 1 1/2 (1,900" OD) and under	$\pm 1/64"$ (0,40 mm)
	NPS 2 (2,375" OD) and over	$\pm 1 \%$
On thickness		- 12,5 %
On weight		$\pm 10 \%$

HYDROSTATIC TEST PRESSURE : see standard detailed specification.

DIMENSIONS : see pages 40 and following

