



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت/2026

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER ACADÉMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option : **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

*Réalisation par simulation sur HYSYS d'une unité de
récupération et de liquéfaction du CO₂ au sein du
complexe GL3/Z*

Présenté par :

1- Mr. BENKADDOUR Mohamed Amine

2- Mr. BENZAZA Belkacem

Soutenu le 15/06/2026 devant le jury composé de :

Président :	ABSAR Belkacem	Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	MENAD Karima	MCA	Université de Mostaganem
Encadrant :	MEKHATRIA Djilali	MCB	Université de Mostaganem

Table des matières

<u>Dédicaces</u>	i
<u>Remerciements</u>	iii
<u>Liste des figures</u>	iv
<u>Liste des tableaux</u>	vi
<u>Liste des abréviations</u>	vii
<u>Résumés</u>	viii
<u>Introduction générale</u>	1
<u>Chapitre I : Présentation du complexe GL3/Z</u>	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Principales caractéristiques du complexe GL3/Z	4
I.2.1. Emplacement et disposition de l'usine	5
I.2.2. Installation de l'usine.....	6
I.3. Description globale du procédé et des installations	7
I.4. Section de décarbonatation du gaz naturel d'alimentation	8
I.5. Gaz naturel.....	10
I.5.1. Définition du gaz naturel	10
I.5.2. Composition du gaz naturel	11
<u>Chapitre II : Généralités sur le dioxyde de carbone (CO₂)</u>	12
II.1. Introduction	13
II.2. Propriétés du CO ₂	13
II.3. Utilisations et applications du CO ₂	16
II.3.1. Aéronautique	16
II.3.2. Automobile	16
II.3.3. Boissons.....	16
II.3.4. Chimie	16
II.3.5. Composants électroniques	16
II.3.6. Gestion des déchets et de l'eau.....	17
II.3.7. Alimentation	17
II.3.8. Santé à l'hôpital.....	17
II.3.9. Laboratoires et centres de recherche	17
II.3.10. Fonderie métallique	17
II.3.11. Pétrole et gaz	18

II.3.12. Pharmacie et biotechnologies	18
II.4. Sources d'émissions de CO ₂	18
II.4.1. Combustibles fossiles et industrie	18
II.4.2. Secteur de l'énergie	18
II.4.3. Utilisation, changement d'affectation des terres et foresterie (LULUCF)	18
II.5. Effets sur l'environnement	18
II.5.1. Réchauffement climatique	18
II.5.2. Intensification des événements météorologiques extrêmes.....	19
II.5.3. Impact sur les écosystèmes.....	19
II.5.4. Boucles de rétroaction	19

Chapitre III : Fondements théoriques, choix des équipements et simulation Aspen

Hysys 20

III.1. Introduction	21
III.2. Procédés de récupération proposés	21
III.3. Choix des équipements.....	22
III.3.1. Conduites.....	22
III.3.2. Échangeur.....	22
III.3.3. Ballon de séparation	23
III.3.4. Compresseur.....	25
III.3.5. Colonne de déshydratation	25
III.3.6. Aéroréfrigérant	28
III.4. Types des équipements sélectionnés dans ce procédé	28
III.4.1. Échangeurs à tubes et calandre.....	28
III.4.2. Séparateur vertical.....	29
III.4.3. Compresseurs centrifuges	29

Chapitre IV : Interprétation et discussion des résultats 32

IV.1. Introduction	33
IV.2. Section de décarbonatation	33
IV.3. Simulation du premier ballon séparateur	33
IV.3.1. Étude de la solubilité du CO ₂ dans l'eau séparée du premier ballon séparateur.....	35
IV.3.2. Simulation des trois autres ballons séparateurs.....	35
IV.4. Simulation de la colonne d'adsorption.....	37
IV.5. Simulation des compresseurs	38

IV.5.1. Configuration du cycle de compression.....	39
IV.6. Description du processus thermodynamique du 3 ^{ème} compresseur.....	41
IV.7. Simulation d'aéroréfrigérant	42
IV.8. Simulation d'échangeur thermique	45
IV.9. Calcul du rendement de procédé de récupération	47
<u><i>Conclusion générale</i></u>	48
<u><i>Recommandations</i></u>	50
<u><i>Références bibliographiques</i></u>	52

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

aucun mot ne saurait exprimer l'amour, le respect et la reconnaissance que je vous porte.

Merci pour tous les sacrifices consentis, pour votre soutien inconditionnel, vos encouragements et vos prières qui m'ont toujours donné la force d'avancer.

Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À ma famille,

pour leur présence constante, leur affection et leur soutien moral tout au long de mon parcours universitaire.

À mon binôme BENAZA Belkacem,

avec qui j'ai partagé les efforts, les difficultés et les moments marquants de ce travail dans un esprit de respect, de compréhension et de collaboration.

Je lui souhaite beaucoup de réussite dans sa vie professionnelle et personnelle.

À notre encadrant Dr. MEKHATRIA Djilali,

pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement durant la réalisation de ce mémoire.

À tous mes enseignants,

qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition des connaissances nécessaires tout au long de mes années d'études.

À tous mes amis et collègues,

pour leur soutien, leurs encouragements et les agréables moments partagés.

À tout le personnel du complexe GL3/Z de Béthioua,

pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse durant notre stage pratique.

Enfin,

je dédie ce mémoire à toute personne ayant contribué de près ou de loin à ma réussite,

avec l'espoir que ce travail soit une modeste contribution dans le domaine du traitement du gaz naturel.

BENKADDOUR Mohamed Amine

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

*aucune expression ne saurait traduire toute la gratitude, l'amour et le respect que je vous porte.
Merci pour vos sacrifices, votre patience, votre confiance et vos prières qui ont toujours éclairé
mon chemin.*

Votre soutien a été ma force et votre présence mon plus grand encouragement.

Que Dieu vous protège et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À ma famille,

*pour son affection sincère, sa présence rassurante et son soutien indéfectible tout au long de mon
parcours.*

Vous avez été une source permanente de motivation et d'espérance.

À mon épouse bien-aimée,

*pour son amour sincère, sa tendresse, sa patience et son soutien inestimable tout au long de
cette aventure.*

*Merci d'avoir partagé avec moi les moments de doute comme les instants de joie, et d'avoir
toujours cru en mes capacités.*

Ta présence à mes côtés a été une source de réconfort, de force et d'inspiration.

*Que Dieu préserve notre amour, nous accorde une vie remplie de bonheur, de sérénité et de
réussite, et fasse de notre union une bénédiction durable.*

À mon binôme BENKADDOUR Mohamed Amine,

avec qui j'ai partagé les efforts, les responsabilités et les défis liés à la réalisation de ce mémoire.

Que cette expérience demeure un souvenir de collaboration, de respect et d'amitié.

*Je lui souhaite beaucoup de réussite et d'épanouissement dans sa vie professionnelle et
personnelle.*

À notre encadrant, Dr. MEKHATRIA Djilali,

*pour sa disponibilité, ses orientations précieuses et son accompagnement scientifique qui ont
largement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

À tous mes enseignants,

qui ont participé à ma formation et transmis avec générosité leur savoir et leur expérience.

À mes amis et collègues,

*pour leurs encouragements, leur soutien moral et les moments partagés durant ce parcours
universitaire.*

À tout le personnel du complexe GL3/Z de Béthioua,

BENZAZA Belkacem

Remerciements

*En premier lieu, nous remercions **ALLAH** le Tout-Puissant de nous avoir guidés, accordé la santé et la patience nécessaires pour accomplir ce travail et arriver là où nous en sommes aujourd'hui. Nous tenons à exprimer nos remerciements au **Dr. MEKHATRIA** Djilali qui a accepté de présider ce jury avant de prendre part à l'examen de ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à **Mme. MENAD** Karima pour avoir accepté d'examiner ce travail avant de le juger.*

*Notre gratitude s'adresse à notre encadrant, **Pr. ABSAR** Belkacem, pour la qualité de son encadrement, sa patience constante et son précieux soutien moral tout au long de la préparation de ce mémoire.*

*Que **Mme. BOUKHRIS** Mouniet trouve en ces termes l'expression d'une reconnaissance pour son suivi rigoureux, son aide précieuse et ses conseils judicieux durant notre stage pratique au sein du complexe GL3/Z.*

Liste des figures

Fig I.01 :	<i>Emplacement du complexe GL3/Z.....</i>	<i>5</i>
Fig I.02 :	<i>Plan de zonage du complexe GL3/Z.....</i>	<i>6</i>
Fig I.03 :	<i>Schéma fonctionnel global.....</i>	<i>7</i>
Fig I.04 :	<i>Entrées et sorties de la colonne d'absorption</i>	<i>8</i>
Fig II.01 :	<i>Molécule de CO₂.....</i>	<i>13</i>
Fig II.02 :	<i>Diagramme enthalpique complet du CO₂ « R744 ».....</i>	<i>14</i>
Fig II.03 :	<i>Émissions entropiques totales nettes de GES « 1990-2024 »</i>	<i>19</i>
Fig III.01 :	<i>Procédé de récupération de CO₂ proposé et réalisé avec Aspen Hysys V10.....</i>	<i>22</i>
Fig III.02 :	<i>Schéma d'un échangeur à tubes et calandre.....</i>	<i>28</i>
Fig III.03 :	<i>Ballon séparateur vertical.....</i>	<i>29</i>
Fig III.04 :	<i>Schéma d'un compresseur</i>	<i>30</i>
Fig III.05 :	<i>Types de compresseurs.....</i>	<i>31</i>
Fig IV.01 :	<i>Configuration du premier ballon séparateur vertical</i>	<i>33</i>
Fig IV.02 :	<i>Propriétés thermodynamiques du premier ballon</i>	<i>34</i>
Fig IV.03 :	<i>Propriétés thermodynamiques du deuxième ballon.....</i>	<i>36</i>
Fig IV.04 :	<i>Propriétés thermodynamiques du troisième ballon</i>	<i>36</i>
Fig IV.05 :	<i>Propriétés thermodynamiques du quatrième ballon.....</i>	<i>36</i>
Fig IV.06 :	<i>Configuration de l'adsorbeur pour la séparation de la phase aqueuse</i>	<i>37</i>
Fig IV.07 :	<i>Fractions de séparation des composants dans le component splitter.....</i>	<i>37</i>
Fig IV.08 :	<i>Résultats de la simulation et propriétés des courants de sortie.....</i>	<i>38</i>
Fig IV.09 :	<i>Schéma de compression multi-étage avec refroidisseurs intermédiaires.....</i>	<i>39</i>
Fig IV.10 :	<i>Compression de 8,9 bars à 25 bars du 3^{ème} étage</i>	<i>40</i>

Fig IV.11 : Diagramme de Mollier de CO ₂ « R744 ».....	40
Fig IV.12 : Compression de 3,1 bars à 8,0 bars du 2 ^{ème} étage	42
Fig IV.13 : Compression de 1,145 bars à 3,2 bars de la 1 ^{ère} étage	42
Fig IV.14 : Schéma d'aéroréfrigérant de Aspen Hysys	42
Fig IV.15 : Résultats du 1 ^{er} aéroréfrigérant.....	43
Fig IV.16 : Résultats du 2 ^{ème} aéroréfrigérant.....	44
Fig IV.17 : Résultats du 3 ^{ème} aéroréfrigérant.....	44
Fig IV.18 : Schéma d'échangeur à tubes et calandre	45
Fig IV.19 : Propriétés thermodynamiques d'échangeur à tubes et calandre	45
Fig IV.20 : Diagramme de Mollier de propane « R290 »	46
Fig IV.21 : Résultats de la sortie d'échangeur thermique	47

Liste des tableaux

Tableau I.01 : Principales caractéristiques du complexe GL3/Z.....	4
Tableau I.02 : Composition chimique du rejet gaz riche en CO₂.....	10
Tableau I.03 : Composition chimique du gaz naturel	11
Tableau II.01 : Principales caractéristiques physico-chimiques du CO₂.....	15
Tableau III.01 : Spécifications techniques du tamis moléculaire de zéolithe 3A	26
Tableau III.02 : Plage de fonctionnement des compresseurs et des souffleurs	30
Tableau IV.01 : Données opérationnelles « fraction massique » du premier ballon	34
Tableau IV.02 : Résultats de la quantité de zéolithe	38
Tableau IV.03 : Résultats du 3^{ème} compresseur	41

Liste des abréviations

GN : *Gaz Naturel.*

GNL : *Gaz Naturel Liquéfié.*

MAP : *Modified Atmosphere Packaging.*

PSA : *Pressure Swing Adsorption.*

TSA : *Thermal Swing Adsorption.*

AMD : *Acid Mine Drainage.*

GES : *Gaz à Effet de Serre.*

aMDEA : *actif Méthyle Di Éthanol Amine.*

ملخص

يهدف هذا العمل بشكل أساسي إلى اقتراح عملية مبتكرة لتمميع غاز ثاني أكسيد الكربون المستخرج من مجمع GL3Z التابع لشركة سوناطراك في أرزيو. ومن خلال تحويل هذا الغاز الملوث إلى منتج صناعي ذي قيمة مضافة عالية، يسعى المشروع إلى تحقيق الاكتفاء الذاتي والحد من انبعاثاته الملوثة في الغلاف الجوي. ويسهم هذا الحل التقني في خفض حجم ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير، مما يحسّن العمليات اللوجستية، ويعزز سلامة النقل، ويضمن أمن عمليات التخزين والاستخدام المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: تمميع ثاني أكسيد الكربون؛ ثاني أكسيد الكربون؛ معالجة الغاز الطبيعي؛ ترمين غازات الاحتباس الحراري؛ ابتكار العملية؛ مجمع سوناطراك GL3/Z.

Abstract

The main objective of this work is to propose an innovative process for liquefying CO₂ extracted from SONATRACH's GL3/Z complex in Arzew. By transforming this greenhouse gas into a high-value-added industrial product, the project aims to achieve self-sufficiency and eliminate its polluting release into the atmosphere. This technical solution drastically reduces the specific volume of carbon dioxide, thereby optimizing logistics, improving transport safety, and ensuring the security of future storage and utilization operations.

Keywords : CO₂ liquefaction, carbon dioxide, natural gas treatment, greenhouse gas valorization, process innovation, SONATRACH GL3/Z.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de proposer un procédé innovant de liquéfaction du CO₂ extrait au sein du complexe GL3/Z de SONATRACH à Arzew. En transformant ce gaz à effet de serre en un produit industriel à forte valeur ajoutée, le projet vise à atteindre l'autosuffisance et à éliminer son rejet polluant dans l'atmosphère. Cette solution technique permet de réduire drastiquement le volume spécifique du dioxyde de carbone, ce qui optimise la logistique, améliore la sécurité du transport et sécurise les opérations de stockage ou de valorisation future.

Mots clés : Liquéfaction du CO₂, dioxyde de carbone, traitement du gaz naturel, valorisation des gaz à effet de serre, innovation de procédé, SONATRACH GL3/Z.

Introduction générale

L'industrie gazière mondiale fait face aujourd'hui à un double défi : répondre à une demande énergétique croissante tout en limitant l'empreinte environnementale de ses activités. Au cœur de cette problématique, la gestion du dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre, est devenue une priorité stratégique. Dans les unités de liquéfaction de gaz naturel, le CO₂ doit être extrait pour éviter sa congélation dans les circuits cryogéniques, mais sa simple évacuation dans l'atmosphère représente un coût écologique majeur, non seulement pour des raisons climatiques, mais aussi en raison de ses implications économiques, la taxation des émissions polluantes entraînant une hausse des coûts d'exploitation de Sonatrach. Par ailleurs, ce projet réside dans l'atteinte de l'autosuffisance en dioxyde de carbone. Au lieu d'être perçu comme un simple rejet gazeux, celui-ci est transformé en un produit industriel stratégique capable de répondre aux besoins du marché, ouvrant ainsi la voie à une vaste gamme d'applications.

Pilier stratégique de l'industrie du GNL en Algérie, le complexe GL3/Z de SONATRACH s'inscrit résolument dans une dynamique de transition énergétique via la gestion innovante des émissions de carbone. L'enjeu dépasse désormais la simple séparation du CO₂ pour porter sur son traitement efficace, en vue d'une valorisation ou d'un stockage sécurisé. Dans cette optique, on propose un procédé de liquéfaction du CO₂. Cette solution permet une réduction drastique du volume spécifique, optimisant ainsi la logistique et la sécurité du transport et du stockage.

Chapitre I

Présentation du complexe

$GL_3/\mathbb{Z}$

I.1. Introduction

Le complexe GL3/Z est une usine entièrement nouvelle qui se compose d'un train de GNL.

Des dispositions ont également été prévues pour l'installation d'un second train ainsi que toutes les infrastructures nécessaires, telles que les utilités, le stockage et le chargement sur les méthaniers peut-être....

La capacité productive annuelle du train de GNL est de 4,7 millions de tonnes (nettes dans les cargos de GNL), et cette capacité sera également celle du futur deuxième train de GNL. En plus de produire du GNL, l'usine GL3/Z génère de l'éthane, du propane, du butane, de la gazoline et un courant d'hélium brut. Le gaz naturel liquéfié produit dans l'usine de GNL est exporté vers les marchés internationaux, tandis que les composants plus lourds, tels que le GPL et la gazoline, qui ont une valeur ajoutée plus élevée, sont extraits et exportés séparément. [1]

I.2. Principales caractéristiques du complexe GL3/Z

Le complexe général GL3/Z est défini par des indicateurs de performance précis qui garantissent sa performance. Le tableau suivant en récapitule les caractéristiques essentielles :

Tableau I.01 : Principales caractéristiques du complexe GL3/Z

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Société de construction</i>	<i>Joint – venture, SAIPEM-CHYODA</i>
<i>Date de construction</i>	<i>Octobre 2009</i>
<i>Début de production de GNL</i>	<i>En démarrage (2014)</i>
<i>Provenance du GN</i>	<i>Plusieurs puits du sud-centre et sud-est</i>
<i>Nombre de train</i>	<i>01 méga-train</i>
<i>Capacité de production</i>	<i>4.7 millions de tonnes/an</i>
<i>Capacité de stockage</i>	<i>GNL (2*160.000 m³) Propane (56.000 m³) Butane (12.000 m³) Gazoline (1800 m³) Propane réfrigérant (3000 m³) Ethane réfrigérant (600 m³)</i>
<i>Fonctionnement de l'usine</i>	<i>330 j/an (90.4%)</i>
<i>Autonomie des utilités</i>	<i>Puissance électrique générée (4 GTG 33.9 MW chacune)</i>
<i>Technologie de liquéfaction</i>	<i>APCI</i>
<i>Système de refroidissement</i>	<i>Réfrigérant à air</i>

I.2.1. Emplacement et disposition de l'usine

Le site se situe le long de la côte méditerranéenne à Béthioua, à l'est d'Arzew, dans la zone du port Industriel de Arzew (El Djedid) et s'étend sur une superficie de 54,6 ha. Le complexe de GPL (GP1/Z) se trouve à la limite est du site, tandis que l'usine de désalinisation (KHARAMA) et le complexe GL2/Z existante se trouvent à la limite ouest. La mer méditerranée et la route du port se trouvent au nord du site, alors que la route principale de la zone industrielle se trouve au sud. Le site est accessible par une route de terre existante ; des installations marines existantes sont disponibles pour le complexe GL3/Z (voir fig I.01).

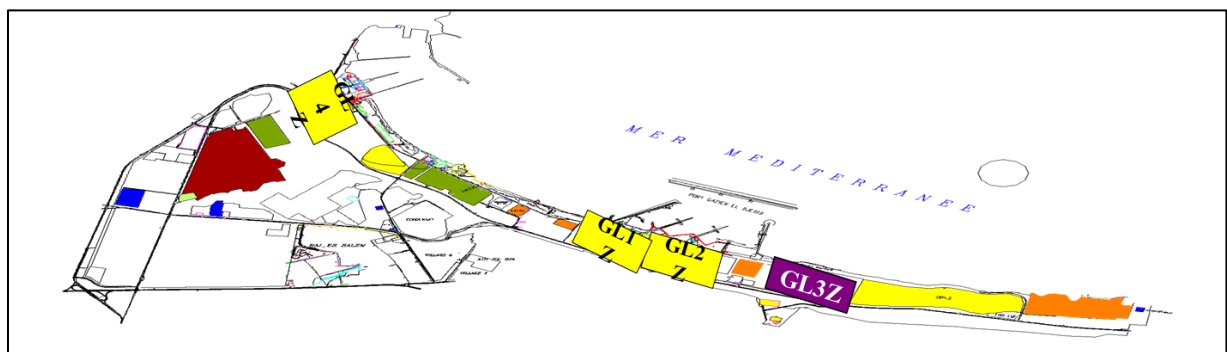


Figure I.01 : Emplacement du complexe GL3/Z

I.2.2. Installation de l'usine

Les installations de l'usine GL3/Z comprennent le train de procédé, toutes les utilités, les installations de stockage des produits finis, les installations off-site liées, une jetée de GNL avec une plateforme de chargement de GNL extensible, un brise-lame, la protection du bord de mer existant, tous les bâtiments et les infrastructures nécessaires. Les installations d'entrée de l'usine se trouvent dans le côté sud-ouest de la zone d'implantation. C'est là que le gaz d'alimentation entre dans l'usine GL3/Z, le côté ouest comprend la zone de génération d'énergie et les turbines à gaz la partie sud longe la mer et contient les installations pour le stockage des produits et des réfrigérants, la zone de la torche et la jetée, le train de procédé est situé au milieu de la zone d'implantation. Il est subdivisé en deux parties : la partie est comprend les unités de prétraitement et de liquéfaction, alors que la partie ouest comprend les équipements de fractionnement et de récupération du GNL (voir fig I.02). [2]

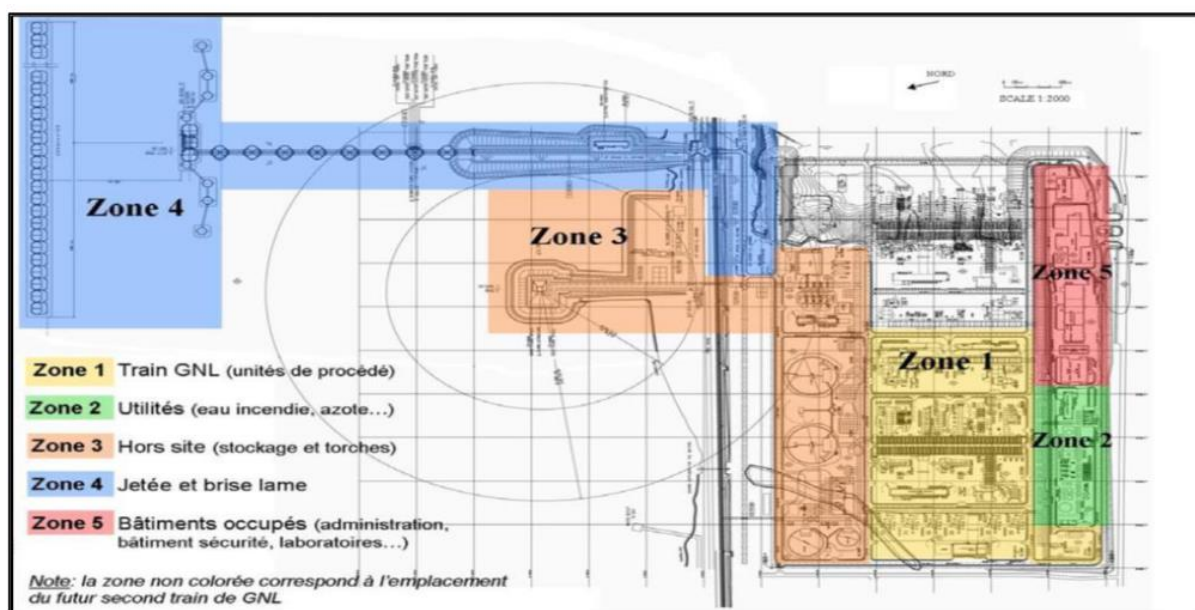


Figure I.02 : Plan de zonage du complexe GL3/Z

I.3. Description globale du procédé et des installations

Les unités de procédé principal de l'usine GL3/Z sont représentées dans le schéma fonctionnel global. L'usine comprend un train de procédé, les utilités associées et les installations off-site. Le train de procédé comprend un compresseur de gaz d'alimentation, une section d'élimination du mercure, une unité d'élimination du CO₂ un système de déshydratation, une unité de récupération et de fractionnement des GNL et un cycle de réfrigération au propane dédié, une section de liquéfaction et de réfrigération. Les utilités et les installations off-sites comprennent le système de génération d'énergie, le stockage et le chargement sur les cargos du GNL et du GPL, l'huile chaude, l'eau de refroidissement, l'air service/instrument, l'azote, le gaz combustible, les torches, le traitement des eaux usées, l'eau de service/potable, le diesel, le stockage du réfrigérant et de la gazoline (voir fig I.03).

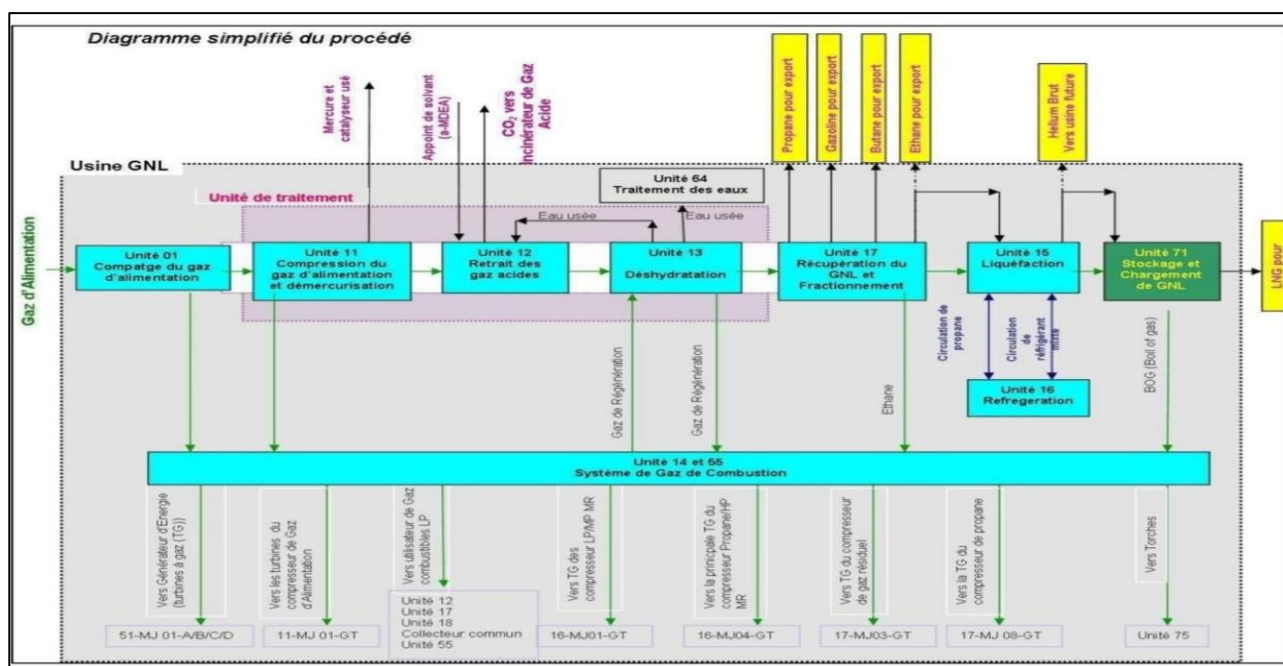


Figure I.03 : Schéma fonctionnel global

I.4. Section de décarbonatation du gaz naturel d'alimentation

La section de décarbonatation constitue une étape essentielle du traitement du gaz naturel. Elle a pour objectif d'éliminer le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans le gaz d'alimentation afin de prévenir les problèmes de corrosion, d'éviter la formation de glace dans les unités cryogéniques et de garantir la qualité du gaz destiné à la production du GNL.

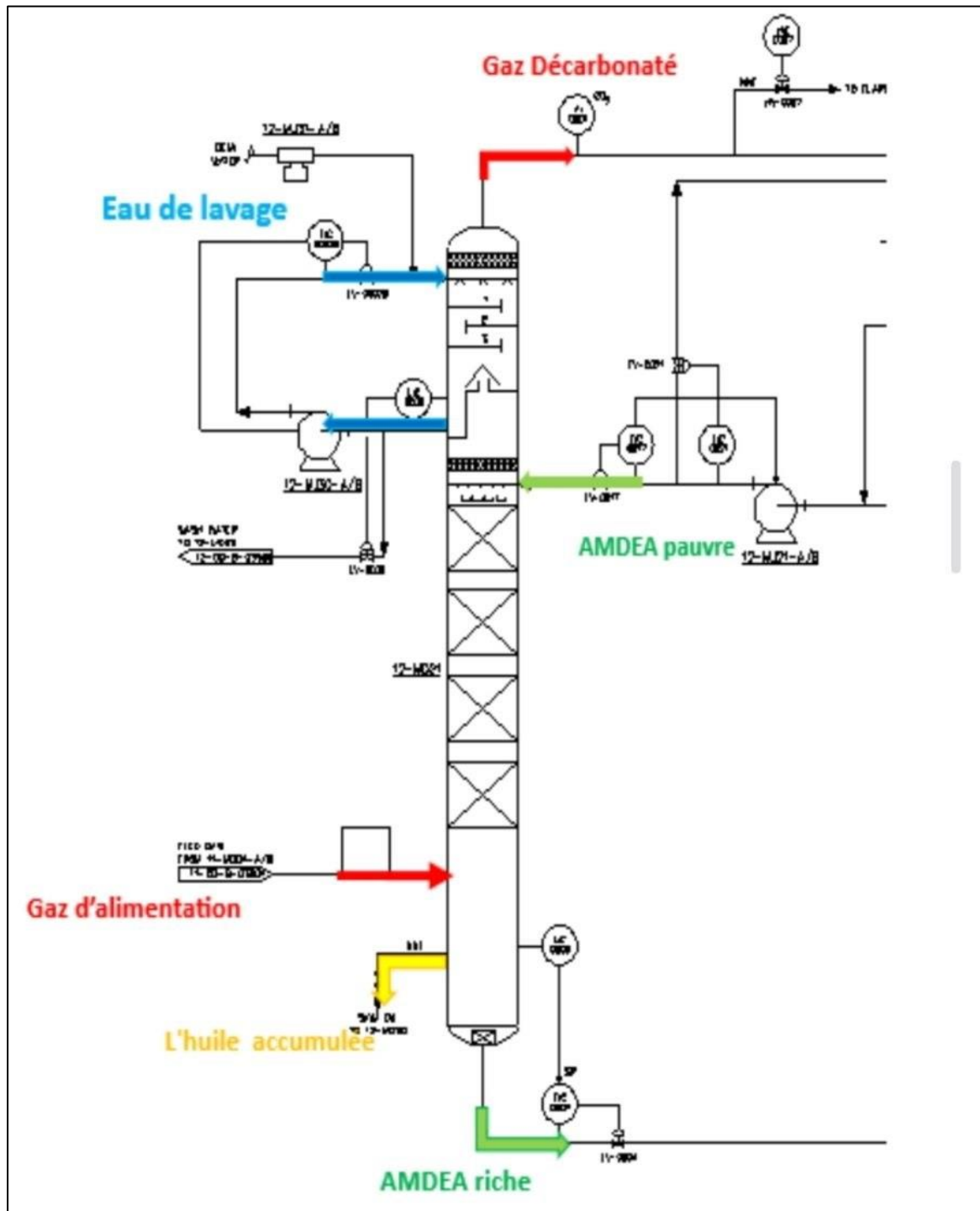


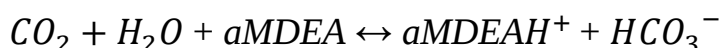
Fig I.04 : Entrées et sorties de la colonne d'absorption

Le flux gazeux provenant du filtre de gaz traité est dirigé vers l'absorbeur de CO₂, où il est mis en contact avec une solution aqueuse d'aMDEA pour éliminer le CO₂. Les différents flux entrants (le gaz d'alimentation et la solution d'aMDEA pauvre) ainsi que les flux sortants (la solution d'aMDEA riche et l'huile accumulée) au niveau de la colonne d'absorption sont illustrés dans la (voir fig I.04).

Le fluide entre dans l'unité 12 (12-MD21) à une pression de 65,6 bars et une température de 35°C, mais en cas d'arrêt du compresseur de gaz d'alimentation, le mélange gazeux contournera le compresseur et entrera dans l'absorbeur de CO₂ à une pression d'environ 36 bars. Pour garantir que la température de la charge soit supérieure à 15°C, le préchauffeur de gaz d'alimentation (11-MCO₂) est utilisé pour réchauffer le courant si nécessaire. L'absorbeur de CO₂ est divisé en deux sections : une section inférieure avec 4 lits de matériau d'emballage en vrac où l'absorption de CO₂ a lieu, et une section supérieure avec 3 plateaux à vanne pour le lavage à l'eau du gaz décarbonaté. La perte de charge dans la colonne est surveillée à l'aide du transmetteur 12-PDI-0007.

Le flux entre par le fond de la colonne et la solution d'aMDEA entre par le sommet de la section de garnissage. Les lits de garnissage maximisent l'efficacité du contact entre la phase gazeuse et la solution d'aMDEA.

Le solvant d'aMDEA réagit avec le CO₂ contenu dans le gaz. L'activateur contenu dans le solvant réagit préférentiellement et rapidement avec le CO₂ pour former un intermédiaire carbamate. Ensuite, l'aMDEA favorise l'hydrolyse de cet intermédiaire pour transférer le CO₂ sous forme d'ions bicarbonate HCO₃⁻, tout en régénérant l'activateur libre. Toutes ces réactions sont des réactions d'équilibre.



La solution d'aMDEA riche est récupérée dans le fond de l'absorbeur, qui est ensuite envoyée vers la section de régénération. Lors de la désorption, la solution d'aMDEA riche en CO₂ est introduite dans la colonne de régénération, où elle est chauffée par le rebouilleur situé à la base de la colonne. L'apport de chaleur augmente la température de la solution, ce qui rompt les liaisons chimiques formées entre le CO₂ et l'aMDEA lors de l'étape d'absorption. Le dioxyde de carbone ainsi libéré remonte vers le sommet du régénérateur avec une faible quantité de vapeur d'eau. En tête de colonne, le mélange gazeux est refroidi dans un condenseur afin de condenser la majeure partie de la vapeur d'eau, qui est ensuite renvoyée dans la colonne sous forme de reflux pour limiter les pertes de solvant.

Le CO₂ récupéré est évacué en tête du régénérateur, tandis que la solution d'aMDEA régénérée, devenue pauvre en CO₂, est récupérée au fond de la colonne, refroidie puis recyclée vers l'absorbeur pour être réutilisée dans un nouveau cycle d'absorption.

Le gaz décarbonaté est lavé des résidus de solvant à l'aide d'eau dans la section de lavage, afin de minimiser les pertes et les entraînements d'aMDEA par l'effluent. Le courant gazeux est ensuite acheminé à l'unité de déshydratation à une température de 61°C et une pression de 65,2 bars. Une conduite vers la torche chaude est également prévue pour évacuer le gaz naturel. L'eau de lavage est recueillie sur le plateau cheminé entre la section de lavage et la section à garnissage de l'absorbeur, et est recyclée par les pompes d'eau de lavage. Un appoint continu d'eau déminéralisée est prévu pour compenser les pertes d'eau dans le solvant, en aval du contrôle de débit.

Tableau I.02 : Composition chimique du rejet gaz riche en CO₂

Composition	Gaz enrichi	Débit massique (Kg/h)
Méthane	0,0013	55,67
Éthane	0,0004	17,13
CO ₂	0,9119	39048,47
Eau	00864	3699,73
Total	1	42821

I.5. Gaz naturel

I.5.1. Définition du gaz naturel

Le gaz naturel (GN) est un combustible fossile formé sous terre par la décomposition de la matière organique sur des millions d'années. C'est une source d'énergie majeure et polyvalente, largement utilisée dans l'industrie, la production d'électricité, le chauffage et le transport. Sa composition chimique varie selon sa provenance, mais il reste majoritairement constitué d'hydrocarbures légers [4].

I.5.2. Composition du gaz naturel

Le tableau ci-dessus donne les différentes compositions du gaz naturel :

Tableau I.03 : Composition chimique du gaz naturel

<i>Composants</i>	<i>Masse molaire (g/mol)</i>	<i>% Molaire</i>
<i>Méthane</i>	<i>16,04</i>	<i>83</i>
<i>Ethane</i>	<i>30,07</i>	<i>7,10</i>
<i>Propane</i>	<i>44,10</i>	<i>2,25</i>
<i>Dioxyde de carbone</i>	<i>44,01</i>	<i>0,21</i>
<i>Hélium</i>	<i>4</i>	<i>0,19</i>
<i>Azote</i>	<i>28,01</i>	<i>5,89</i>

D'après les résultats du tableau I.03, on remarque clairement que le constituant principal du gaz naturel traité est le méthane avec une fraction molaire prédominante de 83%. Les hydrocarbures plus lourds (éthane, propane, butane) ainsi que les traces d'autres composés ne représentent qu'une faible proportion du mélange global.

Chapitre II

Généralités sur le dioxyde de

carbone (CO₂)

II.1. Introduction

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore, quasiment inodore et insipide. Il est donc pratiquement indétectable par les organes des sens humains. Le dioxyde de carbone est considéré comme non toxique. Ce n'est pas une matière dangereuse au sens de la réglementation relative à ces substances. L'air que nous respirons contient environ 0,04% de dioxyde de carbone en volume. Cette concentration est d'une importance vitale car elle stimule notre système respiratoire et détermine le débit et le volume inspiratoires.

La manipulation du dioxyde de carbone à l'échelle industrielle nécessite une maîtrise rigoureuse des normes de sécurité et des propriétés thermodynamiques du gaz. Souvent dénommé gaz carbonique, le CO₂ peut également former de l'acide carbonique (H₂CO₃) lorsqu'il est dissous dans l'eau, ce qui influence fortement la corrosion dans les installations de traitement.

Carbonique désigne la solution aqueuse du dioxyde de carbone (CO₂ dans H₂O). [5]



Figure II.01 : Molécule de CO₂

II.2. Propriétés du CO₂

Le dioxyde de carbone est ininflammable, c'est un gaz inerte et chimiquement stable dans les conditions atmosphériques normales. Le CO₂ inhibe ou empêche totalement les réactions de combustion.

Le dioxyde de carbone peut réagir violemment en présence de certaines substances comme l'ammoniac ou les amines. Il est soluble dans l'eau. Il se forme alors de l'acide carbonique qui est un acide faible et a un effet corrosif sur les aciers au carbone et certains métaux non ferreux.

Dans les conditions atmosphériques normales, le dioxyde de carbone possède une densité absolue de 1,977 kg/m³ (soit une densité relative d'environ 1,529 par rapport à l'air), c'est la raison pour laquelle le CO₂ va vers le bas et peut s'accumuler dans les fosses, les souterrains ou les dépressions de terrain. S'il y a peu de circulation d'air, de telles accumulations de CO₂ peuvent subsister pendant des heures.

Une attention particulière doit être portée aux états physiques du fluide, qui dépendent étroitement de la pression et de la température (voir le diagramme de la fig II.02).

Dans les conditions atmosphériques normales, le CO₂ est à l'état gazeux.

- À une température comprise entre -56,6 et 31,1°C et sous une pression d'au moins 5,2 bars, le CO₂ est à l'état liquide.
- Aux températures inférieures à -56,6 °C, le CO₂ peut se trouver à l'état solide.
- Les coordonnées du point triple du CO₂ sont de -56,6 °C et 5,2 bars, point unique où les trois états physiques coexistent simultanément.

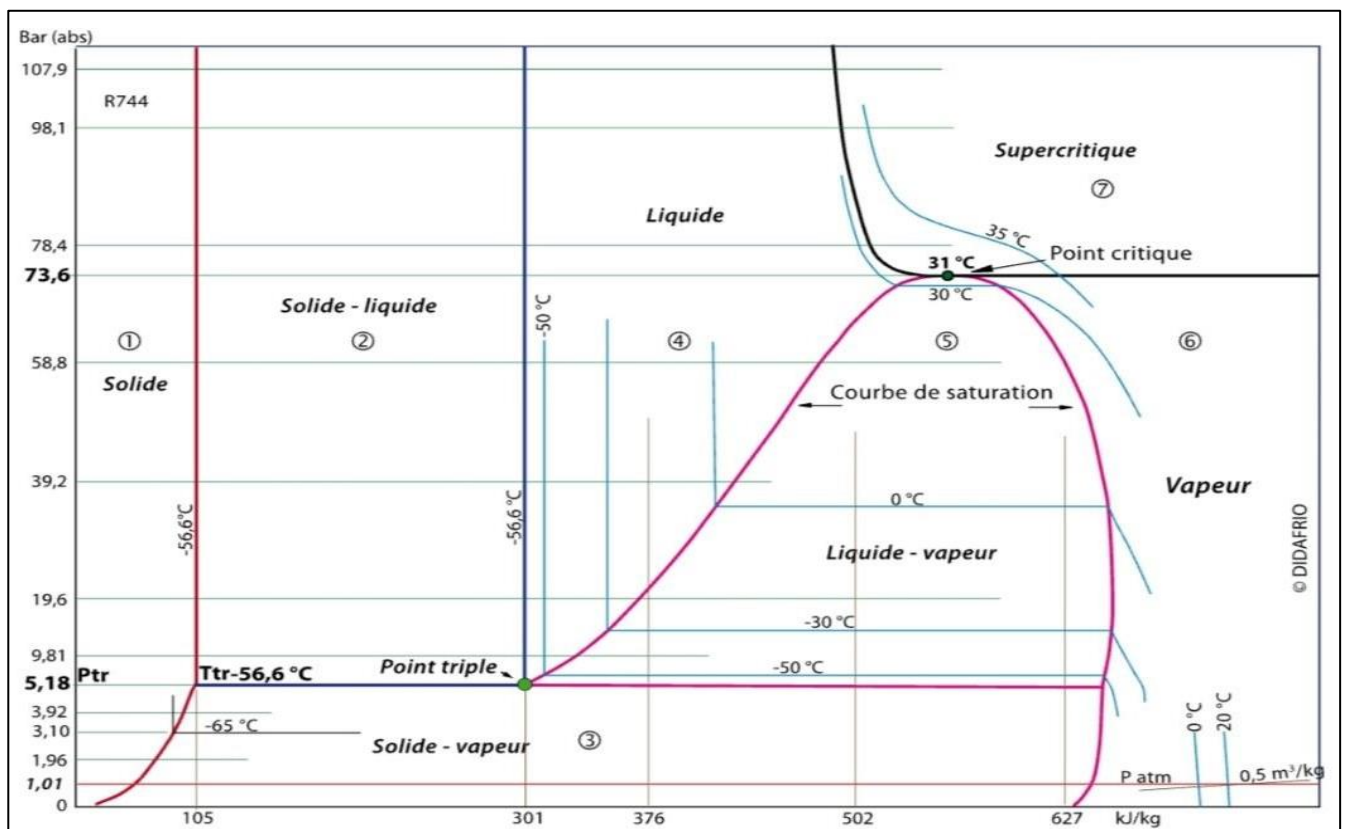


Fig II.02 : Diagramme enthalpique complet du CO₂ « R744 »

À l'intérieur d'une bouteille de gaz, le dioxyde de carbone se trouve à l'état liquide, maintenu sous pression. À une température ambiante de 20°C, la pression de saturation de ce liquide est d'environ 57 bars.

Lors d'un prélèvement via un détendeur réglé à une pression secondaire inférieure à 5,18 bars, le CO₂ passe instantanément à l'état gazeux. À titre d'illustration, la détente à la pression atmosphérique d'un kilogramme de CO₂ liquides génère un volume d'environ 550 litres de gaz. Sous certaines conditions spécifiques, le fluide peut également être soutiré sous phase liquide. Néanmoins, une détente subite du CO₂ liquides lors de son extraction provoquent un refroidissement intense (choc thermique), entraînant la formation simultanée de gaz et de neige carbonique. [5]

Les principales propriétés physico-chimiques du dioxyde de carbone sont synthétisées dans le tableau II.01 ci-dessous :

Tableau II.01 : Principales caractéristiques physico-chimiques du CO₂

<i>Propriété</i>	<i>Valeur/caractéristiques</i>
<i>État à pression et température ordinaires</i>	<i>Gaz incolore et inodore</i>
<i>Masse molaire (g/mol)</i>	<i>44,01</i>
<i>Masse volumique à 1 atm et 0°C (kg/m³)</i>	<i>1,977</i>
<i>Masse volumique à 1 atm et 20°C (kg/m³)</i>	<i>1,87</i>
<i>Viscosité à -78 °C (Pa.s)</i>	<i>7.10⁻⁵</i>
<i>Température de sublimation (°C)</i>	<i>-78,5</i>
<i>Température de fusion (°C)</i>	<i>-57</i>
<i>Température critique (°C)</i>	<i>31,06</i>
<i>Pression critique (MPa)</i>	<i>7,4</i>
<i>Solubilité dans l'eau à 25°C (g/L)</i>	<i>1,45</i>
<i>Solubilité dans l'éthanol à 20°C (g/L)</i>	<i>2,964</i>

II.3. Utilisations et applications du CO₂

Le dioxyde de carbone est un composé polyvalent indispensable dans de nombreux secteurs industriels, allant de l'agroalimentaire à la transition énergétique. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques, il est largement utilisé pour diverses applications techniques, comme illustré dans les exemples suivants :

II.3.1. Aéronautique

Dans le secteur aéronautique, le CO₂ est utilisé pour la protection gazeuse lors du soudage de pièces structurales. De plus, le nettoyage par neige carbonique permet de décaper sans abrasion les surfaces sensibles des avions (composites, métaux, verre). Enfin, il sert à calibrer les appareils de mesure des émissions des moteurs d'avions. [7]

II.3.2. Automobile

Dans l'industrie automobile, le CO₂ est utilisé comme gaz de protection pour le soudage des châssis et des carrosseries. De plus, le nettoyage par neige carbonique est appliqué pour décaper les moules d'injection plastique et préparer les pièces avant peinture. Enfin, il sert à calibrer les bancs d'essai qui mesurent les gaz d'échappement des moteurs afin de vérifier leur conformité environnementale. [7]

II.3.3. Boissons

Le dioxyde de carbone est utilisé pour la carbonatation des boissons telles que les sodas, l'eau minérale, ainsi que dans la maturation du vin. Sous forme solide (glace carbonique), le dioxyde de carbone est utilisé à différentes étapes de la production et de la distribution des boissons. Le dioxyde de carbone supercritique est utilisé pour extraire la caféine du café. [7]

II.3.4. Chimie

Le dioxyde de carbone est utilisé comme matière première dans des procédés chimiques tels que la synthèse de l'urée et de la méthionine. Il est également utilisé pour contrôler la température des réacteurs et neutraliser les effluents alcalins. Enfin, il est utilisé sous conditions supercritiques pour purifier et teindre les fibres polymères, animales ou végétales. [7]

II.3.5. Composants électroniques

Le dioxyde de carbone est utilisé en tant qu'agent de refroidissement durant les essais des composants électroniques. [7]

II.3.6. Gestion des déchets et de l'eau

Le dioxyde de carbone est largement utilisé en gestion de l'eau pour le contrôle du pH, pour lequel il représente une excellente solution de substitution à l'acide sulfurique ou chlorhydrique. Le CO₂ est en effet avantageux en terme économique, écologique, et pour la sécurité. Le dioxyde de carbone est également utilisé pour la production d'eau potable à partir d'eau salée. [7]

II.3.7. Alimentation

Le dioxyde de carbone allonge la durée de vie de nombreuses denrées alimentaires grâce à ses propriétés fongistatiques et bactériostatiques. Les aliments sont conditionnés sous atmosphère protectrice (MAP). Il est utilisé sous forme de glace sèche pour le refroidissement ou la congélation des denrées alimentaires et la régulation de leur température pendant leur transport et leur stockage. Du CO₂ est introduit dans les serres pour accélérer la croissance des végétaux cultivés. [7]

II.3.8. Santé à l'hôpital

Le dioxyde de carbone est employé en chirurgie en insufflation et en dermatologie. [7]

II.3.9. Laboratoires et centres de recherche

Le dioxyde de carbone est utilisé en tant que phase mobile dans des procédés de chromatographie et d'extraction en phase supercritique. (Alimentaire, santé). La neige carbonique (phase solide) est utilisée pour la recherche en laboratoire. Le dioxyde de carbone est aussi utilisé dans des mélanges gazeux pour calibrer les analyseurs dans le cadre du contrôle de la qualité de l'air et des émissions de CO₂. [7]

II.3.10. Fonderie métallique

Dans l'industrie métallurgique le dioxyde de carbone est utilisé pour la protection de l'environnement, pour l'élimination des fumées des fours fonctionnant à arc électrique et la métallurgie non ferrique. De petites quantités de CO₂ liquide peuvent être utilisées pour le recyclage de l'eau provenant d'un Drainage Minier Acide (AMD). Il est également utilisé pour les lasers de CO₂. [7]

II.3.11. Pétrole et gaz

Le dioxyde de carbone se mélange aux huiles de pétrole et réduit leur viscosité, il est donc utilisé pour optimiser la récupération de pétrole brut dans les gisements. Il est aussi employé pour remettre en pression les puits en fin d'exploitation. Lorsque du dioxyde de carbone anthropique (c'est à dire du carbone provenant des activités humaines) est utilisé pour cela, une partie du dioxyde de carbone reste piégé dans le réservoir, ce qui permet d'en limiter l'impact sur le réchauffement climatique. [7]

II.3.12. Pharmacie et biotechnologies

Dans les domaines pharmaceutique et biotechnologique, le CO₂ supercritique est largement utilisé comme solvant écologique pour extraire les principes actifs et les huiles essentielles des plantes. De plus, il sert d'agent de synthèse chimique et permet de contrôler l'atmosphère (inertage) des procédés de fabrication. Enfin, sous forme de glace carbonique, il assure le transport sécurisé des produits thermosensibles à basse température (jusqu'à -78°C). [7]

II.4. Sources d'émissions de CO₂

II.4.1. Combustibles fossiles et industrie

Cette catégorie englobe les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et des processus industriels. [8]

II.4.2. Secteur de l'énergie

La production d'électricité est un moteur majeur de la croissance des émissions de gaz à effet de serre (GES). [8]

II.4.3. Utilisation, changement d'affectation des terres et foresterie (LULUCF)

Ce secteur comprend les émissions et les absorptions de CO₂ résultant des activités humaines directes, telles que la déforestation et les changements d'utilisation des terres. [8]

II.5. Effets sur l'environnement

II.5.1. Réchauffement climatique

Les GES (Gaz à Effet de Serre) sont responsables du réchauffement de la planète et du changement climatique. Les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère continuent d'augmenter, ce qui aggrave ce phénomène. [8]

II.5.2. Intensification des événements météorologiques extrêmes

L'accumulation du CO₂ renforce l'effet de serre en piégeant le rayonnement infrarouge dans l'atmosphère, ce qui entraîne une hausse globale des températures. Ce réchauffement se manifeste concrètement par une intensification des incendies de forêt, des vagues de chaleur, des tempêtes et des sécheresses à l'échelle mondiale. [8]

II.5.3. Impact sur les écosystèmes

Le changement climatique modifie la capacité d'absorption du carbone par la végétation et augmente les risques pour la permanence des stocks de carbone forestier. [8]

II.5.4. Boucles de rétroaction

Une boucle de rétroaction climatique est un processus par lequel un changement initial (comme le réchauffement) déclenche. Dans le cas du CO₂, le réchauffement peut déclencher des émissions supplémentaires provenant de sources naturelles (comme la libération de méthane par le dégel du pergélisol ou les zones humides), ce qui amplifie et aggrave davantage le changement climatique initial. [8]

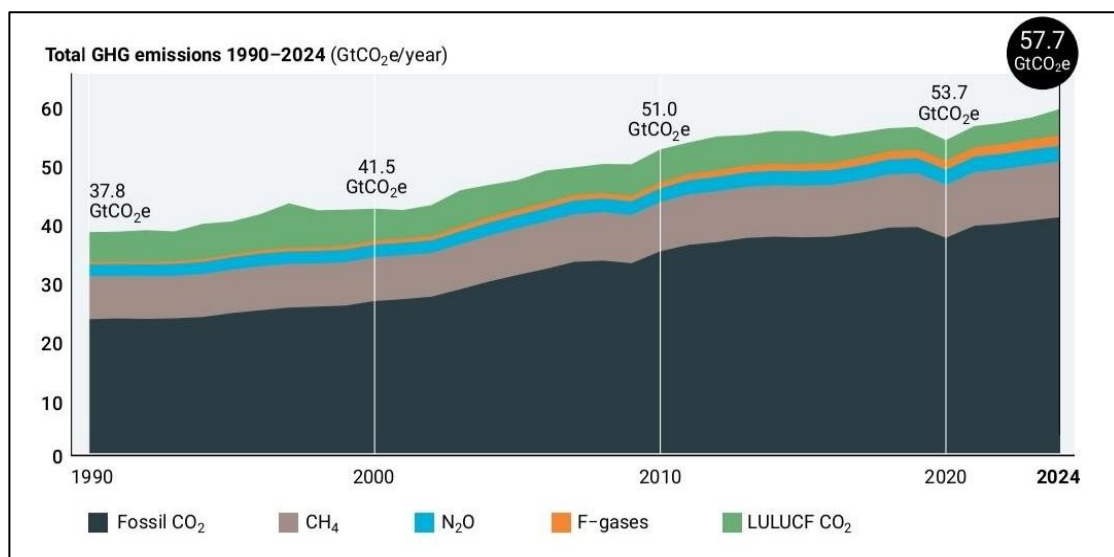


Fig II.03 : Émissions entropiques totales nettes de GES « 1990-2024 »

Chapitre III

Fondements théoriques, choix

des équipements et simulation

Aspen Hysys

III.1. Introduction

Ce troisième chapitre est dédié aux notions fondamentales, au choix des équipements et au dimensionnement du procédé de liquéfaction du CO₂. Son objectif principal est d'établir les bases de calcul théoriques nécessaires afin de justifier le choix technologique des composants retenus. Cette démarche descriptive permettra de structurer rigoureusement les paramètres indispensables à la simulation numérique qui suivra.

III.2. Procédés de récupération proposés

➤ Séparation primaire

.

III.3. Choix des équipements

Ce paragraphe présente un aperçu détaillé des différents types d'équipements principaux qui composent le procédé proposé, ainsi que les critères retenus pour leur sélection.

III.3.1. Conduites

Des conduites en acier inoxydable à faible teneur en carbone sont utilisées pour toute partie en contact avec le CO₂ humide.

III.3.2. Échangeur

III.3.2.1. Calcul du débit massique de propane pour la condensation du mélange

III.3.3.1. Calcul théorique du débit massique de l'eau liquide séparée

III.3.4. Compresseur

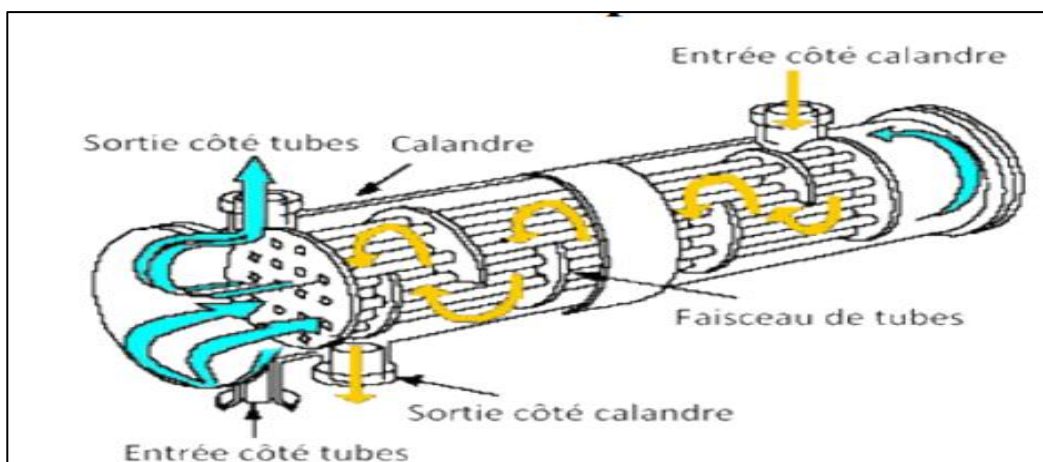
Le choix du compresseur est comme suit :

- Minimiser les frais d'investissement en capitaux.
- Minimiser les frais de maintenance.
- Puissance de rendement requise.
- Souplesse.
- Considérations environnementales.

III.3.4.1. Calcul de l'énergie requise dans les compresseurs

Fig III.02 : Schéma d'un échangeur à tubes et calandre

- On trouve assez fréquemment des chicanes dans le réservoir pour forcer la circulation du fluide à travers tout le réservoir sans quoi le fluide aurait tendance à prendre le plus court chemin entre l'entrée et la sortie.



III.4.2. Séparateur vertical

Le ballon de séparation vertical (ou séparateur vertical) est un équipement crucial dans les procédés industriels, particulièrement utilisé pour séparer un mélange diphasique gaz-liquide.

Son fonctionnement repose principalement sur la force de gravité : le mélange entre latéralement dans le fût, où une chute de vitesse soudaine permet aux gouttelettes de liquide les plus lourdes de tomber vers le fond tandis que la phase gazeuse s'élève vers le sommet.

III.4.3. Compresseurs centrifuges

Le compresseur adéquat pour cette installation, également appelé moto-soufflant pour les faibles pressions, permet d'augmenter la pression de CO₂. Le dimensionnement de ce compresseur est crucial pour déterminer ses conditions de fonctionnement optimales, notamment le travail adiabatique et poly tropique fourni ainsi que sa puissance adiabatique. [12]

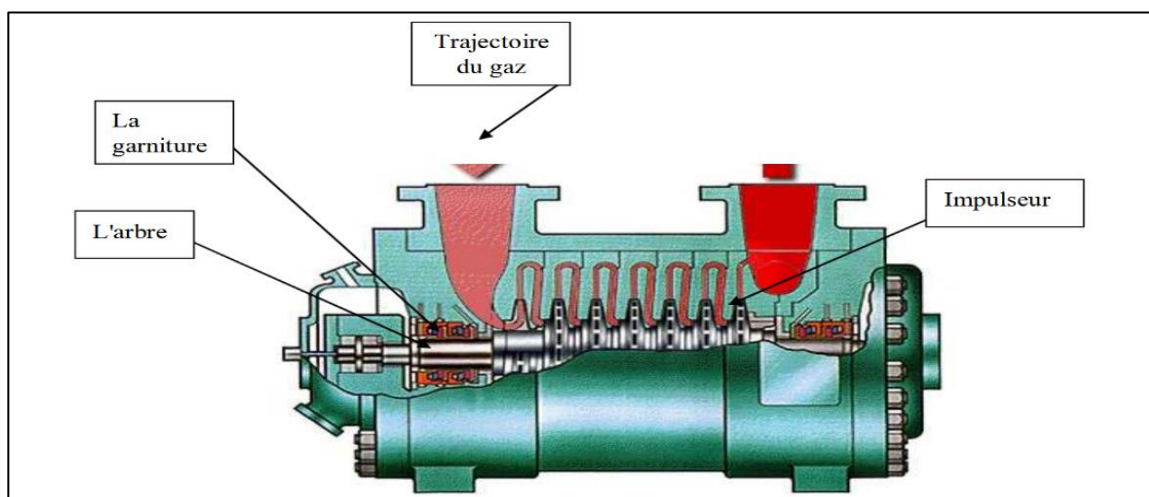


Fig III.04 : Schéma d'un compresseur

Tableau III.02 : Plage de fonctionnement des compresseurs et des souffleurs

Chapitre IV

Interprétation et discussion des

résultats

Références bibliographiques

[1] Manuel opératoire de complexe.

[2] (Rekkab M,2023).

[3] CAS DESIGN (PFD) GL3/Z.

[4] Bauquis, P.-R. Le plein de biocarburants ? Enjeux et réalités ; Éditions Technip : Paris, 2011 ; p 22.

[5] Linde (2017). Consignes de sécurité : Manipulation du dioxyde de carbone CO₂ PanGas AG..

- [6] Bauquis, P.-R. Le guide complet du CO₂ : propriétés, usages et environnement ; Éditions Technip : Paris, 2011 ; Tableau II.01.
- [7] Dioxyde de carbone | Encyclopédie des gaz Air Liquide
<https://encyclopedia.airliquide.com/fr/dioxyde-carbone#applications>
- [8] United Nations Environment Programme (2024). Emissions Gap Report 2024: No more hot air
- [9] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2025: Off target – Continued collective inaction puts global temperature goal at risk. UNEP, 2025.
- [10] Jalon Zeolite. Zéolite 3A ; Jalon : Henan, 2026 ; <https://www.jalonzeolite.com/fr/product-item/zeolite-3a/#>
- [11] Wauquier, JP. Procédé de séparation. Paris: Technip, 1998.
- [12] (after Begg, 1966).
- [13] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=124-38-9&Units=SI&cSO=on#Solubility>.