

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université M'hamed Bougara- Boumerdes

جامعة أمحمد بوقرة- بومرداس



Faculté des Hydrocarbures et de la chimie
Département : Génie des Procédés chimiques et
pharmaceutiques



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme :

Master 2

Présenté par

LAMECHE Bouabdellah

LOUCIF Deya Eddine

Filière : Génie des procédés

Option : Hygiène Sécurité Environnement

**Quantification des gaz à effet de serre par
la méthode empreinte carbone au niveau du complexe GL2Z**

Devant le jury :

Mme. BENRAHOU Fatima Zohra

MCB

UMBB

Président

Mme. MAHDI Karima

MCB

UMBB

Examineur

Mme. YOUNSI Ferroudja

MCB

UMBB

Encadrant

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicaces

À mes chers parents bien-aimés,

Je les remercie pour leurs sacrifices, leur amour inconditionnel et leur soutien financier et moral. Leur présence et leurs efforts constants dans ma vie sont des trésors précieux. Je leur souhaite une vie longue et en bonne santé, et je les aime plus que tout.

À mes deux frères Boualem et Manel bien-aimés,

Bien que nous puissions avoir des différences d'opinions et de perspectives, je tiens à leur dire que je les aime infiniment. Notre lien fraternel est plus fort que nos divergences, et je serai toujours là pour eux jusqu'à la fin.

À la famille LAMECHE et FELLAHI,

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude et mon amour sincère envers chaque membre qui fait partie de notre famille. Votre soutien inébranlable, votre affection inconditionnelle et votre présence précieuse a une empreinte sur ce que je suis aujourd'hui. Je suis profondément reconnaissant d'avoir la chance d'appartenir à une famille aussi merveilleuse et aimante. Mon amour pour vous tous est infini.

À mon binôme Loucif deya eddine,

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude envers lui pour son écoute attentive et son aide précieuse. Sa générosité et sa disponibilité ont fait de lui un partenaire exceptionnel.

À tous mes précieux amis de bon coin,

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon affection envers eux. Leur amitié précieuse et leur soutien inconditionnel ont enrichi ma vie de manière inestimable. Ensemble, nous avons partagé des moments inoubliables. Leur présence m'a apporté du réconfort et de la joie. Mes amis, je vous porte dans mon cœur et je suis reconnaissant d'avoir la chance de vous avoir à mes côtés. Je vous aime profondément.

À toute personne que je connais,

LAMECHE BOUABDELLAH

Dédicaces

À mon père et ma mère *رحمة الله عليها*,

Vous êtes mes piliers, ma source d'amour et de soutien inconditionnel, je vous dédie toute ma gratitude et mon amour infini.

À mes deux frères,

Tu es mon roc, mon confident et mon inspiration, je te dédie tout mon amour et ma reconnaissance pour ta présence précieuse dans ma vie.

À ma chère famille LOUCIF,

Vous êtes mon ancre, ma source de bonheur et ma plus grande fierté, je vous dédie tout mon amour et ma reconnaissance infinie pour les moments inoubliables et le lien indéfectible qui nous unit.

À mon précieux binôme, LAMECHE BOUABDELLAH,

Tu es bien plus qu'un partenaire de travail, tu es un ami sincère et un soutien inébranlable, je te dédie toute ma gratitude et mon respect pour notre collaboration exceptionnelle et les moments mémorables que nous avons partagés.

À mes chers amis,

Vous êtes ma famille choisie, mes rayons de soleil et mes complices de tous les instants, je vous dédie tout mon amour et ma reconnaissance pour les rires, les aventures et le précieux soutien que nous partageons.

LOUCIF DEYA EDDINE

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier le Bon Dieu, pour le courage et la patience qu'il nous a offerts, afin de réaliser ce travail.

Nous adressons nos remerciements à nos chers parents que nous aimons le plus au monde et qui ont tant sacrifié pour nous faciliter le chemin vers le succès.

Nos profondes gratitude au Dr. Younsi Ferroudja, pour son honorable encadrement et pour les conseils judicieux qui nous ont été d'une très grande d'aide.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers tous les enseignants de l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes qui ont joué un rôle essentiel dans notre apprentissage et dans l'acquisition de connaissances tout au long de notre parcours universitaire. Leur dévouement, leur expertise et leur engagement envers l'éducation ont grandement contribué à notre développement académique et personnel. Nous leur sommes reconnaissants pour leur soutien constant et pour avoir partagé avec nous leur savoir et leur passion pour leurs domaines d'expertise.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers tous nos amis que nous avons rencontrés tout au long de notre parcours académique. Leur présence et leur accompagnement dans notre vie ont été inestimables. Leur soutien, leur encouragement et leur amitié ont rendu notre expérience universitaire plus enrichissante et significative.

Nous sommes reconnaissants d'avoir pu partager des moments précieux, des rires, des défis et des réussites avec eux. Leur amitié restera gravée dans nos souvenirs et nous les remercions chaleureusement d'avoir été présents à nos côtés.

Table de matière

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction Générale	1
Chapitre 01 : Présentation de l'entreprise	3
Introduction.....	3
I. Présentation du complexe GL2Z	3
1. Objectif de complexe GL2/Z	3
2. Situation géographique et voisinage du complexe GL2/Z.....	3
3. Plan d'implantation du complexe	4
3.1 Les utilités	6
3.2 Description d'un train de procédé	5
3.3 La zone terminale.....	12
Conclusion	15
Chapitre 02: Généralité sur les gas à effet de serre	16
I. Les enjeux environnementaux	16
I.1 Changement climatique	16
I.1.1 Destruction de la couche d'ozone	16
I.1.2 Augmentation de la teneur en aerosols.....	16
I.1.3. L'aggravation de l'effet de serre.....	16
II. Les principaux gaz à effet de serre	17
II. 1 Sources d'émission du CO2	18
II. 2 Sources d'émission du CH4	19
II.3. Sources d'émission du N2O	19
II.4. La vapeur d'eau et le réchauffement climatique planétaire	20
II.5. Les hydrofluorocarbures (HFC)	23
II.6. Les différents types de gaz fluorés	24
III. Les effets des GES.....	25
III.1. La nature et la biodiversité	25
III.2. La santé humaine.....	25

IV. Cadre réglementaire international.....	25
1. Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance.....	26
2. Convention de Vienne pour la protection de la couche d’ozone.....	26
3. Le Protocole de Montréal sur les substances détruisant la couche d’ozone	26
4. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).....	26
5. Engagements au titre de la CCNUCC	27
6. Le Protocole de Kyoto.....	28
7. L’Algérie et le Protocole de Kyoto	31
V. Caractéristique des combustibles.....	32
VI. Les sources d’émission de GES dans l’industrie gazifière.....	33
1). Les émissions de combustion, incluant les sources stationnaires et mobiles	33
2). Les émissions de ventilation et rejets de procédé	33
3). Les émissions fugitives	34
4). Le Brulage	34
5). Les émissions indirectes de GES.....	35
VII. Principe de quantification des émissions de GES	36
VIII Les méthodologies de comptabilisation des GES.....	37
1. La norme ISO 14064-1	37
2. Les méthodes spécifiques et sectorielles	38
3. La méthode Bilan Carbone	38
4. GHG Protocol.....	39
5. Empreinte de carbone	39
Chapitre 03 : Quantification des émissions des gaz à effet de serre	40
1. Sources d’émissions de GES dans le complexe GL2Z.....	40
1. Sources d’émissions de CO ₂	40
1.1 Dioxyde de carbone issu de la colonne de régénération du solvant riche	40
1.1.2 Dioxyde de carbone contenu dans les fumées des chaudières	42

1.1.3. Dioxyde de carbone issu des torches	44
1.2. Sources d'émissions du CH ₄	45
1.2.1. Extraction et production de gaz naturel	45
1.2.2Transport et distribution du gaz naturel	45
1.2.3. Utilisation du gaz naturel.....	45
1.3. Source d'émission du N ₂ O	46
2 Empreinte carbone.	46
3. L'analyse de cycle de vie (ACV)	47
4.Description de la méthode	48
5. Choix des Facteurs d'Emission (FE)	49
a). Conversion des facteurs d'émissions sur des bases calorifiques inférieures vers des facteurs d'émission pour des bases calorifiques supérieures	49
b). Facteurs d'émission pour les émissions fugitives	49
c). Facteurs d'émissions pour le torchage (brûlage)	50
d). Facteurs d'émissions pour la ventilation.....	50
6). Le pouvoir calorifique	50
6.1 pouvoir calorifique inférieur (PCI).....	50
6.2. Pouvoir calorifique supérieur (PCS).....	50
6.3 Passage du PCS au PCI.....	51
7. Potentiel de réchauffement mondial (PRG).....	52
8.Application de la méthode	52
9.Les avantages et les inconvénients de la méthode	63
10.Réduction des émissions de CO ₂ et les procédés du captage	65
11. Procédés du captage de CO ₂	65
11.1. Captage du CO ₂ en postcombustion.....	67
11.2. Captage par oxycombustion	67
11.3. Captage précombustion	68
11.4. Comparaison des différents procédés du captage	69
12.Stockage du CO ₂	70
Conclusion Générale.....	71

Liste des figures

Figure 1: Situation Géographique du complexe GL2/Z	3
Figure 2: Schéma synoptique d'un train de procédé.	6
Figure 3: Section traitement de gaz. [1]	8
Figure 4: Sections Séparation, Liquéfaction, Boucle propane et Boucle MCR. [1]	11
Figure 5: Schéma de principe du procédé de GNL.	14
Figure 6: Carte de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère : elle dépend de la température et donc de la latitude.	22
Figure 7: La rétroaction de la vapeur d'eau contribue à amplifier le réchauffement provoqué par l'augmentation de dioxyde de carbone.	22
Figure 8: Volume brûlé par pays (top 10 et le reste du monde) pendant l'année 2018.....	35
Figure 9: Sources d'émissions de CO2 dans le complexe GL2Z.	40
Figure 10: Procédé de décarbonatation et de régénération du MEA riche dans le complexe GL2Z.	42
Figure 11: Schéma d'une chaudière à tubes d'eau. [9].....	43
Figure 12: Fumée issue des torches dans le complexe GL2Z. [10].....	45
Figure 13: présentation de la quantité du gaz émis par type de gaz.....	62
Figure 14: présentation de la quantité émise par équipement.....	63
Figure 15: Captage postcombustion. [11].....	67
Figure 16: Captage par oxycombustion. [11].....	68
Figure 17: Captage précombustion. [11]	69
Figure 18: Stockage dans des réservoirs de Pétrole et du Gaz.....	70

Liste des tableaux

Tableau 1: Compositions du GN provenant de Hassi R'mel.....	6
Tableau 2: Chronologie des évènements et rendez-vous internationaux Sur le climat.....	29
Tableau 3: les PRG données par le 4ème rapport d'évaluation du GIEC.....	48
Tableau 4: Rapport PCS/PCI pour les combustibles liquides ou gazeux	51
Tableau 5: Consommation de gaz naturel par les chaudières au niveau des allumeurs pendant l'année 2022.	52
Tableau 6: Les facteurs d'émissions des combustibles GN par défaut donnés par le GIEC pour la combustion stationnaire dans les industries Energétiques.....	53
Tableau 7: Consommation de gaz naturel par les chaudières au niveau de la chambre de combustion pendant l'année 2022.....	54
Tableau 8: Volume de gaz torchés pendant l'année 2022.....	56
Tableau 9: Volume de gaz ventilés (CO2) pendant l'année 2022.....	57
Tableau 10: Consommation d'essence pendant l'année 2022.....	58
Tableau 11: Consommation de gas-oil pendant l'année 2022.....	60
Tableau 12: Quantité des gaz émis par type de gaz	61
Tableau 13: Quantité du gaz émis par équipement en eq CO2.....	62

Liste des abréviations

- ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.
- A.P.C.I : Air Product and Chemicals - Incorporation
- API : American Petroleum Institute.
- ANCC : Agence Nationale des Changement Climatique.
- CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changement Climatique.
- CH4 : Méthane.
- CNC : Comité Nationale du Climat.
- COP : Conférence des Parties.
- CO2 : Dioxyde de Carbone.
- DA : Donnée d'Activité.
- FE : Facteur d'Emission.
- GES : Gaz à Effet de Serre.
- GHG : Greenhouse Gases.
- GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'Evolution du Climat.
- GN : Gaz Naturel.
- GNL : Gaz Naturel Liquéfié.
- GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié.
- HFC : Les Hydrofluorocarbure.
- ISO : organisation internationale de normalisation
- N2O : dioxyde Nitreux
- OMM l'Organisation Météorologique Mondiale
- SH : Sonatrach.
- VAG : Veille de l'Atmosphère Globale
- WBCSD : World Business Council for Sustainable Development
- WRI: World Resources Institutes

Résumé:

L'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est l'une des principales causes du réchauffement climatique et des changements environnementaux observés à l'échelle mondiale. Pour faire face à ce défi majeur, la réduction des émissions de GES est devenue une priorité pour les gouvernements, les entreprises et les individus à travers le monde. Ce travail explore les différentes stratégies et mesures mises en œuvre pour réduire les gaz à effet de serre et pour construire un avenir durable.

Dans ce travail, nous avons établi un inventaire de gaz à effet de serre des sources stationnaires de combustion (chaudière), les combustions mobiles et les émissions fugitives au niveau du complexe GL2Z.

Nos calculs se sont faits par la méthode empreint carbone dans le but de connaitre la quantité des GES émis par le complexe et d'essayer de réduire.

Introduction Générale

La production d'énergie joue un rôle crucial dans le développement et l'évolution des sociétés humaines, utilisant diverses sources d'énergie potentielles. Au cours des dernières années, les besoins énergétiques mondiaux ont considérablement augmenté, tandis que les ressources fossiles se raréfient et les préoccupations environnementales s'intensifient.

En conséquence, les compagnies pétrolières et gazières sont des acteurs majeurs du changement climatique, étant responsables d'une quantité considérable d'émissions de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Leur responsabilité englobe toutes leurs activités, de l'extraction du gaz à leur utilisation finale par les consommateurs.

Dans le contexte de ces changements climatiques, l'Algérie contribue aux efforts mondiaux de surveillance de l'atmosphère. Depuis 1999, elle abrite à Tamanrasset, dans le sud du Sahara, l'une des stations de référence du programme scientifique de la Veille de l'Atmosphère Globale (VAG), coordonné par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Cette station effectue en continu des mesures de concentration des gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote.

Aujourd'hui, face à la menace des changements climatiques, l'épuisement des ressources naturelles, l'effet sur biodiversité, la nature et, ainsi que sur la santé humaine, les acteurs souhaitant faire un diagnostic environnemental et évaluer la pression exercée sur l'environnement par nos différentes activités, ont besoin d'outils pertinents. L'empreinte carbone peut-être l'un de ces outils.

Le complexe GNL2/Z de l'entreprise SONATRACH de part, sa grande capacité de production de gaz, constitue un pôle important où les sources d'émissions de gaz à effet de serre sont diversifiées à travers les torches, les chaudières, les combustions mobiles et les émissions fugitives. Raison pour laquelle nous avons fait le choix de ce thème de mémoire de fin d'études qui a pour objectif de :

- Constituer une base de données qualitative et quantitative des émissions de gaz à effet de serre.
- Identifier et localiser les sources d'émissions et les activités les plus significatives engendrant les gaz à effet de serre.
- Proposer des recommandations pour réduire les émissions de CO₂.

C'est autour de ces étapes que s'articule le contenu de notre travail qui est :

Chapitre 1 : Présentation du complexe et des opérations du processus. dans ce chapitre, nous présentons en détail notre complexe GL2Z, ainsi que les opérations du processus qui y sont réalisées. Nous expliquons les différentes étapes de production, depuis l'entrée jusqu'à la sortie des produits finis, afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'unité.

Chapitre 2 : nous avons parlé sur les différents gaz à effets de serre et leurs effets, le cadre réglementaire international et national régissant les émissions des gaz à effet de serre. Caractéristiques des combustibles ainsi que Concepts relatifs au processus d'inventaire des GES.

Chapitre 3 : nous avons parlé sur les émissions des GES dans le complexe GL2Z, nous avons calculé les quantités de CO₂, CH₄ et N₂O émises par le complexe par la méthode empreinte carbone et on a parlé sur la réduction des émissions de CO₂ et les procédés du captage.

Chapitre 01 :

Présentation du complexe GL_2/\mathbb{Z}

-Introduction :

Le complexe GL2/Z est une unité de production importante parmi les autres unités du groupe SONATRACH.

Après la découverte d'énormes réserves de gaz naturel ont HASSI R'MEL le pays a procédé aux installations des complexes de liquéfaction du gaz naturel. Et c'est ce qui a fait l'existence du complexe GL2/Z.

Il a été construit sur une surface de 72 Hectares par la société américaine Pullman Kellogg. Le contrat a été signé avec cette dernière le 09/02/1976, sa réalisation a été commencée en début 1978 pour être opérationnel en début 1981.

La première production de GNL a été effectuée le 29/01/1981 et la première expédition était le 20/07/1981.

I. Présentation du complexe GL2Z

1. Objectif de complexe GL2Z

L'usine a été conçue pour permettre d'assurer le transport sous forme liquide du gaz naturel provenant de HASSI R'MEL ce gaz est acheminé par pipeline vers le complexe ; il est traité, liquéfié, stocké, le gaz naturel liquéfié (GNL) est ensuite chargé à bord de navires méthaniers de haut mer spécialement prévus pour le transport cryogénique et il est livré à l'étranger.

2. Situation géographique et voisinage du complexe GL2Z

Le complexe industriel du gaz naturel **GL2Z** est le dernier né des sites de la zone industrielle d'Arzew. Situé à BETHIOUA (40 km à l'ouest d'ORAN, 450 km d'ALGER). Il s'étend sur une superficie de 72 Hectare, il est limité au nord par la mer, au sud par le village de BETHIOUA, à l'ouest par GL1/z et à l'est par l'usine de dessalement son emplacement au bord de la mer lui permet d'utiliser cette ressource inépuisable pour produire de l'eau distillée, le refroidissement des équipements, et à la lutte contre le feu.

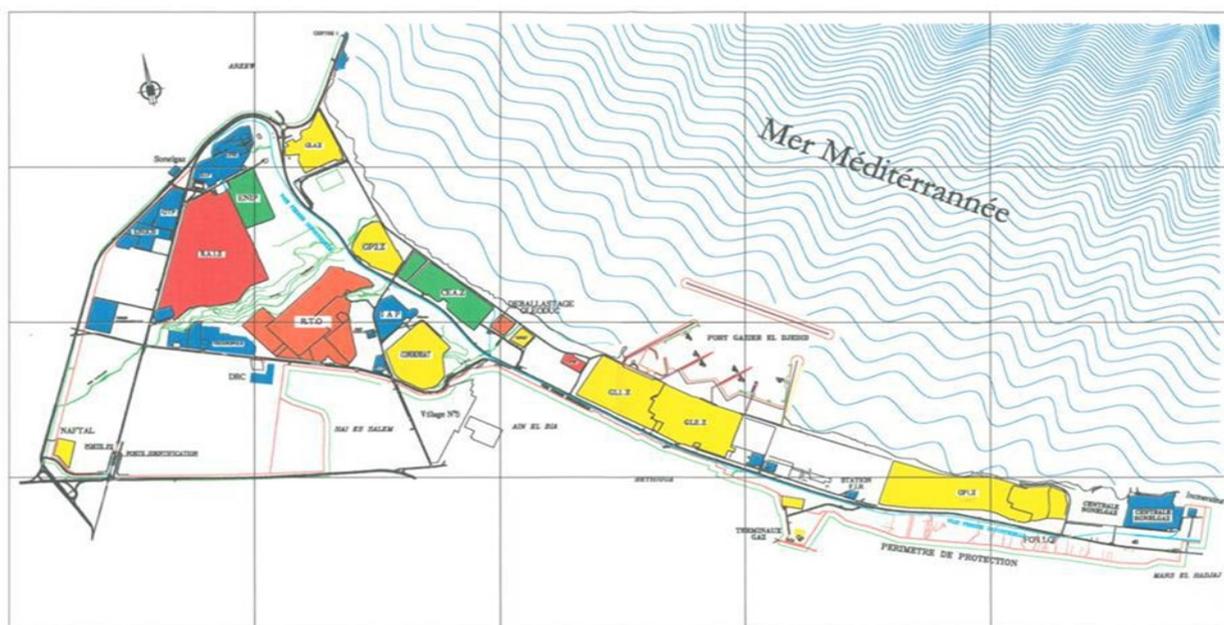


Figure 1: Situation Géographique du complexe GL2/Z

3. Plan d'implantation du complexe :

L'emplacement du complexe GL2/Z au bord de la mer répond à des exigences et à des contraintes d'ordre économique et sécuritaire.

Ce choix préalablement étudié permet d'utiliser l'eau de mer comme source d'alimentation pour le refroidissement, la production d'eau dessalée et la lutte contre les incendies. En outre, il permet de faciliter l'exportation des hydrocarbures notamment le GNL et ses extraits par voie marine (méthaniers).

D'une façon générale, l'implantation du complexe est divisée en trois parties bien distinctes :

- Les utilités
- Les trains de procédé.
- La zone terminale « Stockage et Chargement ».

3.1 Les utilités :

Les utilités constituent une zone importante au sein du complexe GL2/Z. Elles permettent d'assurer la fourniture de tous les besoins pendant le démarrage et la marche normale des trains de liquéfaction.

Le fonctionnement de l'usine pour la production du GNL, nécessite la disposition d'un nombre de fluides et d'énergie, tels que la vapeur d'eau, l'eau de refroidissement, l'air comprimé, ...etc.

3.1.1 Sources d'énergie :

La vapeur d'eau est produite par trois chaudières à haute pression (62 bars) et une chaudière basse pression (17bars). Cette vapeur sert à entraîner les équipements, tels que les turbogénérateurs et la turbopompe d'alimentation en eau de chaudière.

3.1.2 Source de refroidissement :

Le complexe dispose de six pompes d'eau de mer qui assurent la distribution en eau de mer au niveau des trains de liquéfaction et des utilités pour le refroidissement dans les échangeurs.

3.1.3 Production d'électricité :

L'électricité est produite par trois turbogénérateurs ayant une capacité chacun 20 MW ainsi qu'une source SONELGAZ avec une tension de 60 KV.

Toutefois, pour une mise en marche normale, seuls deux turbogénérateurs peuvent suffire à produire la totalité de l'énergie demandée qui est environ de 36 MW.

3.1.4 Unité de dessalement :

Cinq unités de dessalement sont implantées au sein du complexe d'une capacité de 45 m³/h chacune, permettant ainsi suffisamment d'eau distillée, destinée à assurer d'une manière continue l'alimentation des chaudières.

3.1.5 Production d'air comprimé :

Pour des raisons sécuritaires, le procédé repose en grande partie sur une régulation pneumatique assurée par un ensemble de quatre compresseurs. De plus, on dispose d'un compresseur de secours en cas de besoins.

3.1.6 Azote :

L'azote est fourni par l'entreprise nationale des gaz industriels (ENGI), et utilisé pour l'inertage des installations pour la préparation aux travaux de maintenance ainsi que les démarrages.

3.2 Description d'un train de procédé :

Le procédé A.P.C.I (Air Product and Chemicals - Incorporation) utilisé dans le complexe GL2/Z fonctionne avec deux fluides frigorigènes, le Propane et le MCR (multi component réfrigérant).

La production de GNL dans le complexe GL2/Z est assurée par six trains fonctionnant en indépendance où chacun comprend un nombre d'équipements montés principalement en série, assurant ainsi la transformation du GN de l'état gazeux à l'état liquide, chaque train est divisé en Cinq sections :

- Section traitement de gaz
- Section séparation
- Section liquéfaction
- Section compression
- Section fractionnement

La figure suivante montre un schéma synoptique d'un train de procédé.

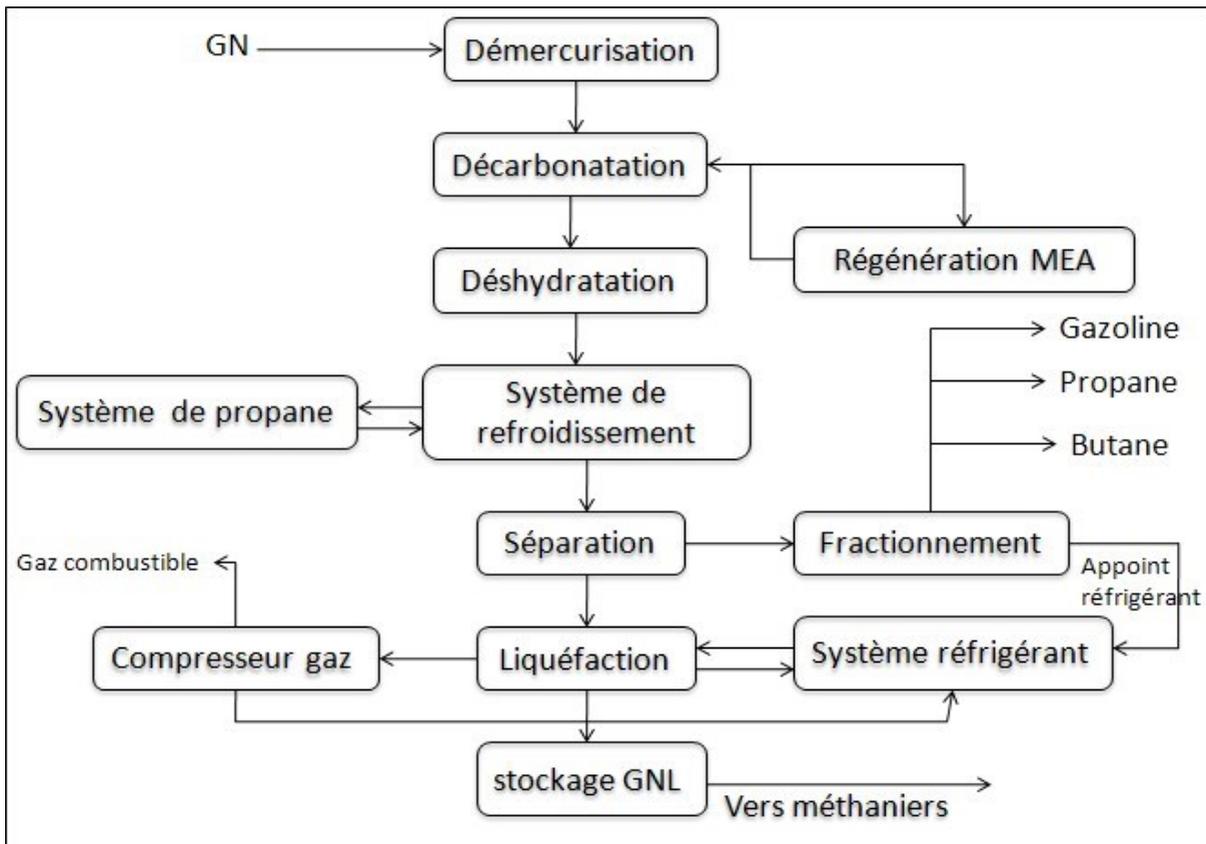


Figure 2: Schéma synoptique d'un train de procédé.

3.2.1 Section traitement de gaz :

Le GN, à sa sortie du gisement de HASSI RMEL, est un mélange d'hydrocarbure dont la teneur en méthane est supérieure à 80% ; mais contient également de l'éthane du propane, du butane, du pentane et quelque trace d'hydrocarbures lourds.

Le tableau suivant récapitule la composition du GN provenant de Hassi R'mel

Tableau 1: Compositions du GN provenant de Hassi R'mel.

Compositions	% molaire
Méthane	83,12
Ethane	7,70
Propane	2,08
n-butane	0,49
Isobutane	0,31
n-pentane	0,12
Iso-pentane	0,11
Hexanes +	0,07
Azote	5,60
Eau	0,00
Hélium	0,19
Dioxyde de carbone	0,21

L'alimentation en GN se fait à 42 bars et à la température ambiante.

Il doit être conditionné avant son liquéfaction aux températures cryogéniques. Ce conditionnement comprend l'élimination des contaminants tels que le mercure, le gaz carbonique et la vapeur d'eau. Leurs présences dans le gaz, causeront des problèmes d'exploitation aux températures cryogéniques, créant ainsi des bouchages au niveau des vannes et des échangeurs, de la corrosion par le mercure des boites froides en aluminium.

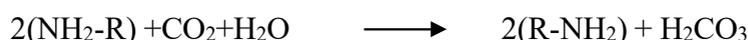
Ce conditionnement est assuré par le démercuriseur, la section décarbonatation et la déshydratation.

a) Démercurisation :

Après passage dans un ballon séparateur où les hydrocarbures liquides sont récupérés au fond du ballon, le gaz d'alimentation traverse un échangeur pour amener sa température aux alentours de 45 °C puis il est introduit dans le démercuriseur où les traces de mercure sont piégées. La teneur résiduelle en mercure du gaz sortant est de l'ordre de 0,01ng/Nm³.

b) Décarbonatation et la déshydratation :

Dans cette section, le gaz carbonique (CO₂) est absorbé par une solution de Mono-Ethanol-Amine (MEA) à 15% de concentration selon la réaction suivante :



L'opération d'absorption se fait à contre-courant dans une colonne à plateaux. La solution de MEA riche en CO₂ est reprise dans une colonne de régénération et ensuite recyclée vers la colonne principale.

Le GN chaud débarrassé de CO₂ (teneur 70 ppm) sera refroidi à 21 °C par le propane (15,2 bars et 18,3 °C) afin de réduire au maximum la quantité de vapeur d'eau que devront retirer les sécheurs.

Le gaz séparé de l'eau issue de cette condensation dans le ballon séparateur, traverse ensuite de haut en bas les sécheurs.

L'adsorption de l'eau dans les sécheurs est assurée par des matériaux désenchaîner sous forme de tamis moléculaire de type 4 A°.

L'adsorption est faite par un procédé sélectif de séparation qui fixe les molécules d'eau et les libère par élévation de température. La vapeur d'eau est éliminée jusqu'à 0,5 ppm et le lit des sécheurs est régénéré après une période d'adsorption donnée.

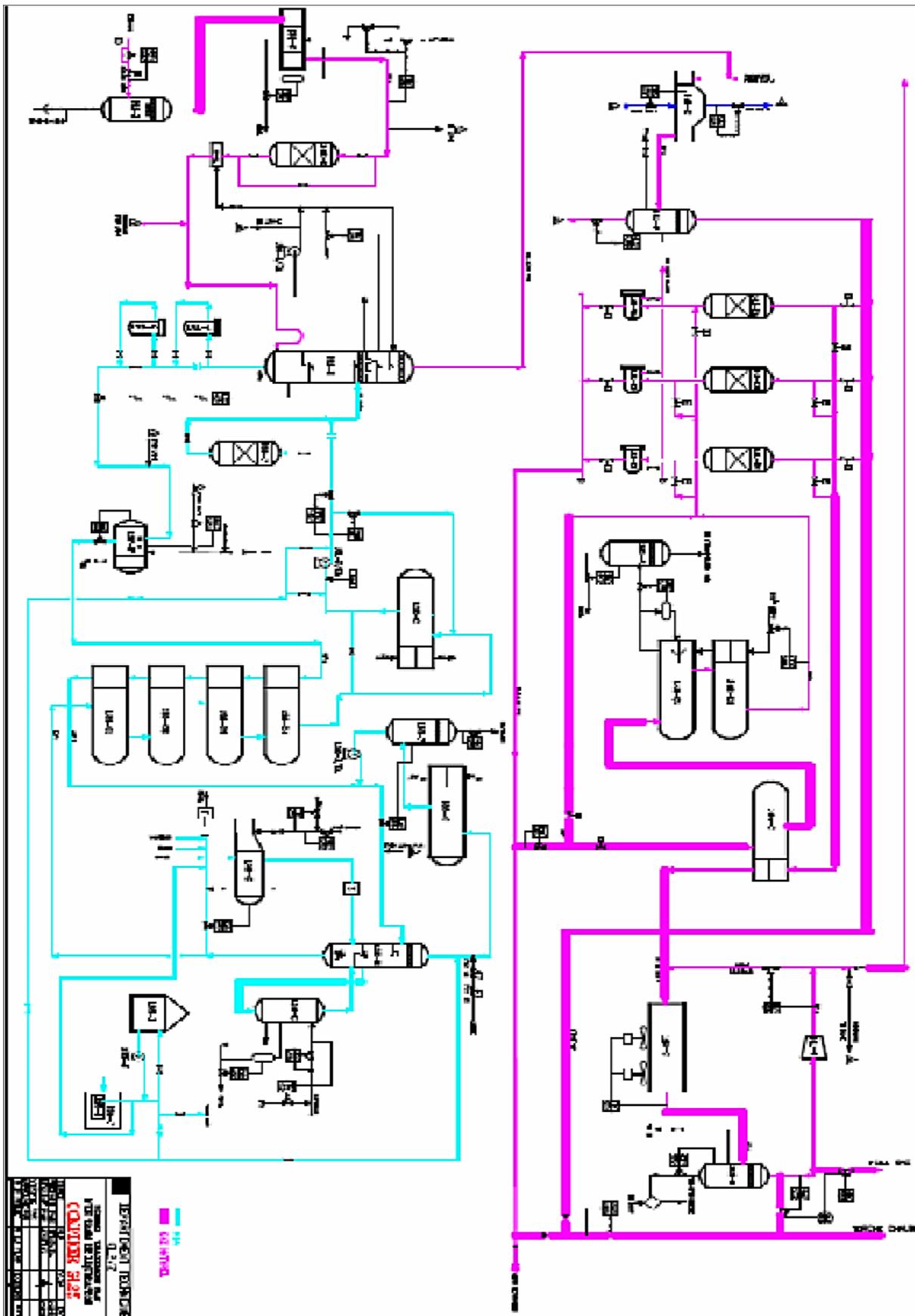


Figure 3: Section traitement de gaz. [1]

3.2.2 Section séparation :

Le mélange condensats lourds/gaz venant des pré-refroidisseurs au propane, passe dans un échangeur d'alimentation où par échange avec les vapeurs de tête de la colonne de séparation appelée tour de lavage est sous refroidi à -47 °C à 39 bars, ce mélange est injecté au niveau du dixième plateau de la tour de lavage, les produits lourds seront séparés par distillation.

Le liquide de fond se dirige vers le fractionnement. Les vapeurs de tête se réchaufferont, dans l'échangeur d'alimentation et passent dans le faisceau chaud de l'échangeur principal qui constitue « le condenseur de tête » de la tour de lavage. Elles seront refroidies et condensées partiellement par le MCR. Sa partie liquide est recueillie dans le ballon de reflux et riche en méthane, sera acheminé vers le faisceau central de l'échangeur principal pour être liquéfié.

3.2.3 Section liquéfaction :

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz est refroidi à une température inférieure à son point de rosée, Cette température est en fonction de la pression.

Pour un mélange gazeux tel que le GN, la condensation aura lieu sur l'intervalle de température comprise entre le point de rosée et le point de bulle.

Le GN traité riche en constituants légers à -33 °C et 37 bars absolus, pénètre dans le faisceau central dans lequel il circule de bas en haut, la liquéfaction dans le faisceau central se fait en deux temps :

Le gaz est réfrigéré à -110 °C par échange thermique avec le MCR liquide et vapeur, le gaz partiellement condensé sera liquéfié complètement par le MCR vapeur condensé. Le GNL sortant en tête de l'échangeur principal sous forme de liquide à 24,3 bars absolus et -148 °C passe dans l'échangeur de rejet et se combine à sa sortie avec la réinjection du propane et de l'éthane venant du fractionnement.

Ce mélange à -151 °C sera détendu à 4,8 bars dans le ballon de gaz combustible haute pression, par flash. Ce flash a pour effet de libérer l'azote et l'hélium dissous dans la phase liquide du GNL.

Ce liquide sera refroidi -156 °C avant de pénétrer en tête de la colonne du déazoteur par échange avec le liquide de fond.

La phase liquide GNL est récupérée au fond du déazoteur où elle sera acheminée vers les bacs de stockage à -162 °C par des pompes.

Les vapeurs de tête passent dans l'échangeur de rejet où elles se réchauffent au contact du MCR du GNL des réinjections d'éthane et de propane et du gaz combustible venant de tête du ballon flash et déchargent dans le circuit fuel gaz.

3.2.4 Section compression :

a) Système de propane réfrigérant :

La boucle de propane est une boucle à quatre étages qui permet de refroidir le GN et le MCR (multi composant réfrigérant) par paliers successifs, le propane, après compression et condensation, subit quatre niveaux de détente refroidissante, lui permettant d'échanger ses frigories avec le MCR ; l'appoint en propane du système est assuré par le propane soutiré du dépropaniseur.

b) Système de réfrigérant mixte (MCR) :

Le MCR sert à liquéfier le GN dans l'échangeur principal, il constitue la deuxième boucle frigorigène de l'unité de liquéfaction, ce fluide frigorigène est un mélange de méthane, éthane, propane et d'azote, le méthane circule dans une boucle fermée à deux compresseurs MRC (I) et MRC (II), chacun est entraînés par une turbine.

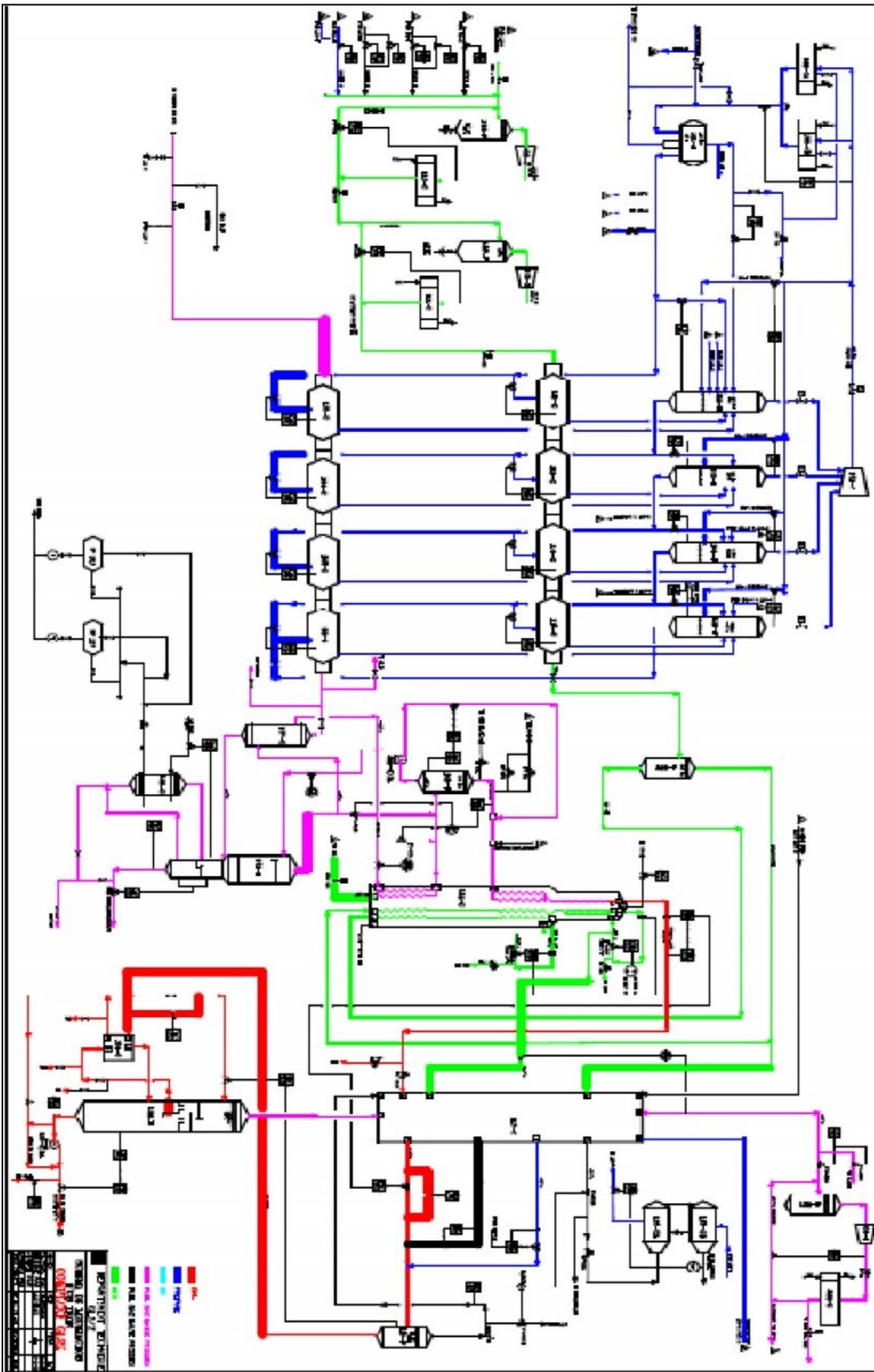


Figure 4: Sections Séparation, Liquéfaction, Boucle propane et Boucle MCR. [1]

3.2.5 Section fractionnement :

L'unité fractionnement est alimentée par les produits de fond de la tour de lavage situé en amont de l'échangeur principal. La section est composée de trois colonnes :

a) Déethaniseur :

Il permet d'extraire l'éthane en haut de la colonne pour être réinjecter dans le GNL, l'excès est utilisé comme combustible dans le système fuel gaz. Les produits de fond du Déethaniseur sont acheminés vers la colonne de dépropanisations.

b) Dépropaniseur :

Il constitue la 2^{ème} tour de fractionnement. Son rôle est de produire le propane en tête de colonne et de l'acheminer en grande partie vers GP1/Z pour y être commercialisé ou réinjecté dans le GNL, l'autre partie est sert comme appoint dans la boucle MCR et propane réfrigérant. Les produits de fond sont acheminés vers la colonne de débutanisation.

c) Débutaniseur :

Il constitue la 3^{ème} tour de fractionnement, Le produit de tête de colonne est du butane à (98.8 %) est envoyé vers GP/Z pour être commercialisé ou réinjecté. Dans le GNL. Le produit de fond de la tour constitue la gazoline qui est envoyé vers stockage pour y être commercialisé.

d) Circuit de gaz combustible de procédé :

Les sources principales du gaz combustibles sont les gaz de détente du ballon de séparation de gaz combustible haute pression, les vapeurs de tête du dé-azoteur. Les vapeurs des bacs de stockage de détente du déethaniseur, dépropaniseur et débutaniseur, ballon séparation des hydrocarbures, gaz de régénération venant des sècheurs, gaz d'étanchéité des compresseurs. Les vapeurs de tête du dé-azoteur et le gaz d'étanchéité sont comprimés dans le compresseur de gaz combustible avant de pénétrer dans le collecteur principal de gaz combustible du procédé. [2]

3.3 Terminal :

3.3.1 Stockage du GNL :

Trois réservoirs de GNL assurent le stockage de la totalité de la production de GNL des 6 trains pendant 5 jours. Les réservoirs d'une capacité unitaire de 100000m³ permettent de stocker le GNL à la pression atmosphérique de 1.103 bars et une température de -162°C. Lors remplissage des réservoirs, une certaine quantité du produit se vaporise. Les échanges de chaleur avec l'extérieur dû à condition sont aussi la cause de cette vaporisation, les vapeurs de stockage sont recueillies et

comprimées par les compresseurs de vapeur de stockage avant d'être renvoyées dans le collecteur principal du gaz combustible.

Le GNL peut être transféré d'un réservoir à un autre lorsqu'on ne charge pas, en utilisant la pompe de transfert. Il est également possible de transférer la production de GNL de GNL1 vers les bacs de stockage de GNL2, en utilisant également la pompe de transfert de GNL2 à GNL1, le débit maximum est de l'ordre de 12000m³/h.

3.3.2 Chargement de GNL :

Les installations de chargement permettent le transfert de GNL contenu dans les bacs vers les cuves des méthaniers. Les 5 pompes de chargement effectuent le pompage de GNL qui est refoulé à travers un collecteur commun jusqu'aux les 4 bras de chargement installés sur l'appontement.

Ces bras sont articulés pour permettre le raccordement aux brides du navire avec une certaine liberté de mouvement de ce dernier. Un 5^{ème} bras est destiné à la collecte des vapeurs du méthanier lors de la mise en froid du chargement.

Dans les périodes sans chargement, le maintien en température des conduites est assuré par une circulation de GNL au moyen d'une des deux pompes.

3.3.3 Principaux paramètres de fonctionnement :

Ces paramètres sont comme suit :

Débit de chargement	100000 m³/h
Pression des cuves de méthanier	1.08 bars
Température	-162°c
Débit de circulation	113 m³/h
Pression	5.5 bars

3.3.4 Contrainte de transport du GN :

Les distances parfois très importantes séparant les puits de production du centre de communication du GN nécessitent la présence d'un réseau de transport adéquat. A l'heure actuelle, le moyen de transport le plus économique reste les gazoducs.

Cependant, la traversée d'une mer pose des problèmes, le gaz naturel (1 m³ de GN) équivaut à 1 litre de pétrole, ceci exclut son transport par bateau même sous pression. Afin de résoudre ce problème deux cas sont possible, les conduites sous-marines et la liquéfaction.

Pour la première, la solution considérant à poser gazoduc en pleine mer à des distances courtes (200 à 300 Km) et à des faibles profondeurs (300 m à 400 m), en empêche que cette technique reste en plein développement et d'ailleurs le gazoduc (transmet) reliant la Tunisie et l'Italie destinée à exporter le GN algérien depuis Italie vers l'Europe, est qu'un succès remarquable.

Pour ce qui est de la liquéfaction, on doit remédier à l'état très peu dense du GN à l'environ de -162°c ainsi son volume est réduit d'un facteur 600 et il peut être transporté par navire.

3.3.5 Schéma de principe du procédé de GNL :

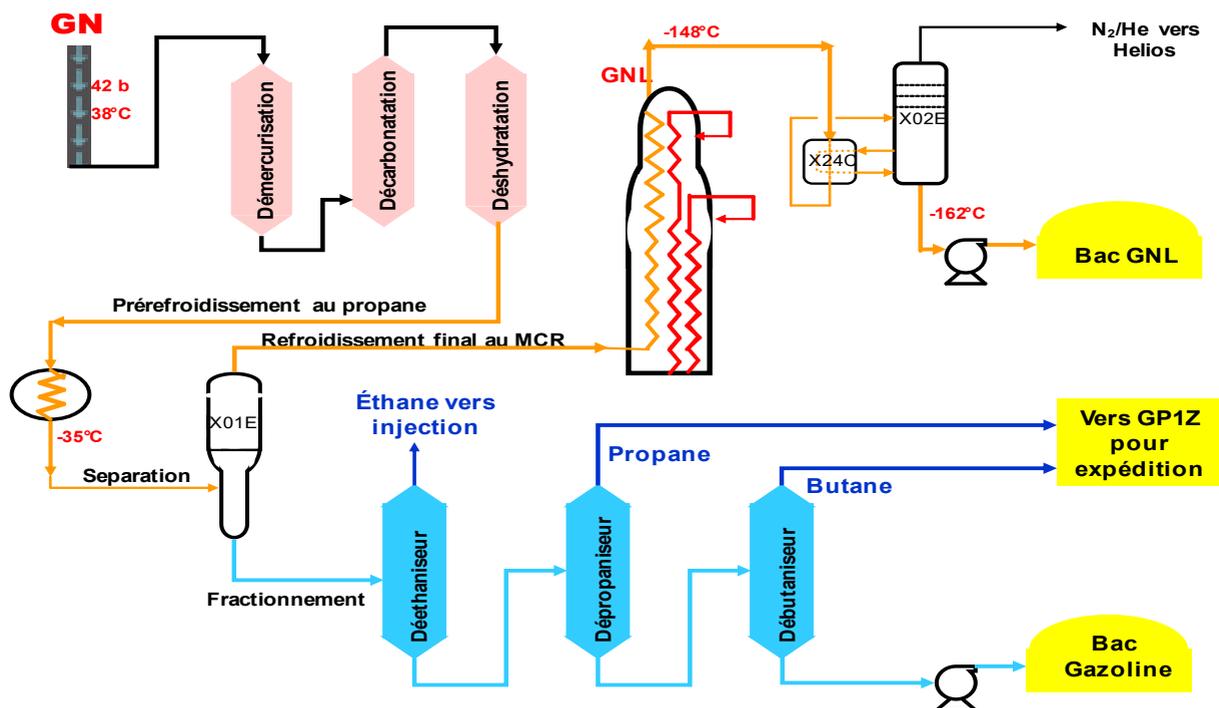


Figure 5: Schéma de principe du procédé de GNL.

Conclusion :

C'est au niveau du complexe GL2/Z qu'on a effectué notre stage de fin d'études. Sa grande capacité de production du GNL nous a permis de faire ce sujet suite à la diversité des équipements à combustion stationnaire qui engendrent une quantité considérable de gaz à effet de serre.

CHAPITRE 02 :

Généralité sur les gaz à effet de serre

I Les enjeux environnementaux :

La notion de « protection de l'environnement » est généralement perçue comme un tout alors que plusieurs impacts qui lui sont associés sont extrêmement hétérogènes et enchaînés (une chaîne d'effets). Au premier niveau de classement, trois thèmes majeurs sont distingués par l'Organisation des Nations Unies :

- Changement climatique,
- Effets sur la nature et la biodiversité,
- Effets sur la santé humaine.

I.1 Changement climatique :

Dans ce contexte, trois impacts environnementaux influencent le climat au niveau mondial et ont un effet à long terme :

I.1.1 Destruction de la couche d'ozone :

L'ozone est produit à partir du dioxygène. Aux altitudes supérieures à 30 km, le rayonnement solaire possède une énergie suffisante pour casser une partie des molécules de dioxygène et libérer les atomes. Un atome d'oxygène doit se recombinaison à un autre élément, il interagit donc avec une autre molécule d'oxygène (O₂) présente pour former une nouvelle molécule, composée de trois atomes d'oxygène, l'ozone (O₃). La dégradation de la couche d'ozone implique une moindre protection des rayons ultraviolets les plus nocifs et une élévation des risques pour la vie terrestre. Du fait de la présence, dans la stratosphère, de molécules de synthèse, l'équilibre entre la production et la destruction d'ozone se déstabilise. Ces dernières années, l'activité humaine a participé à la modification de cet équilibre dynamique en rejetant de nombreuses substances appauvrissant la couche d'ozone. Ces substances contiennent principalement dans diverses combinaisons du chlore, du fluor, du brome, du carbone et d'hydrogène

I.1.2 Augmentation de la teneur en aérosols :

Les aérosols sont constitués de particules très fines en suspension dans l'atmosphère. Les aérosols dits primaires sont émis directement sous forme de particules. Leurs tailles sont généralement supérieures au micron lorsqu'ils sont produits mécaniquement et inférieure au micron lorsqu'ils sont issus de processus de combustion. Les aérosols secondaires, de taille généralement sub-micronique, sont issus de la transformation en particules de substances émises dans l'atmosphère sous forme gazeuse, soit par transformation directe gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau nuageuses.

I.1.3 L'aggravation de l'effet de serre :

Les gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, etc) permettent de retenir une partie de la chaleur apportée à la terre par le soleil en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, par

l'atmosphère elle-même et par les nuages. Une partie de ce rayonnement absorbée est ensuite réémise en direction du sol, contribuant ainsi au réchauffement des basses couches de l'atmosphère : C'est l'effet de serre naturel. Ces dernières années, l'importante augmentation de la concentration de gaz à effet de serre a entraîné une hausse de la température des basses couches de l'atmosphère. C'est ce qui est appelé l'effet de serre renforcé, qui est selon les scientifiques, responsable d'une hausse de température moyenne de $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ depuis la fin du XIXe siècle.

Les augmentations des émissions de gaz à effet de serre sont principalement dues aux émissions de CO₂ lors de la combustion des combustibles fossiles. Parmi les autres gaz à effet de serre, on trouve les émissions de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O), de gaz fluorés et chlorés (CFC, HFC, HCFC, PFC et SF₆). Plusieurs gaz chimiquement réactifs, notamment les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) jouent également le rôle de gaz à effet de serre indirecte en raison de l'influence qu'ils exercent non seulement sur la production d'ozone, mais aussi sur la destruction du CH₄ et d'autres gaz à effet de serre. L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe provoque selon les modèles utilisés, des perturbations observées du système climatique qui sont reprises et détaillées dans les rapports de l'IPCC et GIEC :

- Augmentation des précipitations et de l'humidité atmosphérique
- Diminution de l'enneigement et de l'étendue des glaces terrestres
- Elévation du niveau de la mer
- Changement de la circulation atmosphérique et de la circulation des courants marins
- Variabilité du climat et des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes.

II Les principaux gaz à effet de serre :

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre. Ces différents gaz à effet de serre contribuent à l'effet de serre.

L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs complexes du réchauffement climatique. Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC). Ci-dessous, les sept principaux gaz à effet de serre :

- Le dioxyde de carbone (CO₂),
- Méthane (CH₄),
- Protoxyde d'azote (N₂O),
- La vapeur d'eau
- Les hydrofluorocarbures (HFC),
- Les perfluorocarbures (PFC),
- L'hexafluorure de soufre (SF₆).

Les gaz à effet de serre sont mesurés en équivalent carbone. 1 kg de CO₂ vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est-à-dire le poids du carbone seul dans le composé « gaz carbonique ». On distingue deux classes d'émissions de GES fondées sur le type de leurs sources :

- Emission anthropique de GES : toute émission de GES liée à une activité humaine et non à une émission naturelle.
- Emission naturelle : toute émission due à un phénomène naturel tel que les zones humides naturelles, la respiration des arbres ou celle des êtres humains.

II.1 Sources d'émission du CO₂ (Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique) :

La majorité des émissions de CO₂ viennent de l'utilisation des combustibles fossiles : pétrole, charbon et gaz. Leur combustion, dans les installations industrielles et dans les véhicules notamment, dégage du CO₂.

Dans le monde, les émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de trente milliards de tonnes équivalent CO₂. Environ 80 % de ces émissions proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles.

[4]

Carburant fossile :

La plus grande source est aujourd'hui constituée par les carburants fossiles alimentant les usines de production d'électricité qui émettent plus d'un tiers des émissions mondiales en CO₂. Ces installations sont d'habitude organisées en grandes unités centralisées, livrant en moyenne 500 - 1000 MW de puissance électrique. Une centrale à charbon pulvérisé de 1000 MW émet entre 6 - 8 Mt/an de CO₂, une centrale à pétrole à monocycle à peu près deux tiers, et une centrale au Gaz Naturel à cycle combiné, la moitié.

Procédés industriels :

Plusieurs procédés industriels produisent des ruisseaux extrêmement concentrés de CO₂ en tant que produit dérivé. Bien que relativement peu nombreux, ils constituent un bon candidat pour la technologie Captage Carbon Storage (CCS), parce que le CO₂ capturé pourra faire partie intégrante du procédé de production totale, pour avoir des coûts de capture relativement bas. Par exemple, le GN provenant des puits contient souvent une fraction significative de CO₂ qui pourrait être capturé et emmagasiné. Un autre procédé industriel qui se prête à la séquestration de dioxyde de carbone est la fabrication d'ammoniaques.

Production d'hydrogènes :

Il y aura dans le futur des émissions additionnelles de CO₂ dues de la production d'hydrogène à partir de GN et de charbon. Le CO₂ dérivé produit serait très concentré et les coûts cumulatifs de

capture du carbone seraient alors relativement bas. L'hydrogène pourrait être utilisé dans des cellules de carburant et par d'autres technologies, mais il y a des investissements majeurs à faire pour le développement d'un marché de l'hydrogène et d'une infrastructure massive adaptée à ces nouveaux carburants.

II.2 Source d'émission du Méthane (CH₄) :

Le méthane est le principal responsable de la formation de l'ozone troposphérique, un polluant atmosphérique dangereux ainsi qu'un gaz à effet de serre, dont l'exposition provoque chaque année un million de décès prématurés. Le méthane est également un puissant gaz à effet de serre. Sur une période de 20 ans, son effet de réchauffement est 80 fois plus puissant que celui du dioxyde de carbone.

Le méthane est à l'origine d'environ 30 % du réchauffement de la planète depuis l'ère préindustrielle et il prolifère plus rapidement que jamais depuis que l'on a commencé à tenir des registres dans les années 1980. En fait, d'après les données de la National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis, même si les émissions de dioxyde de carbone ont ralenti pendant les fermetures liées à la pandémie de 2020, le méthane atmosphérique a augmenté.

II.3 Sources d'émission du protoxyde d'azote N₂O :

Une des sources majeures d'émissions de N₂O est liée aux phénomènes de nitrification/dénitrification dans les sols cultivés en lien avec l'utilisation d'engrais azotés minéraux et la gestion des déjections animales. D'autres sources importantes ont été identifiées telles que certains procédés industriels (fabrication de glyoxal, d'acides adipique, glyoxylique et nitrique) et certains équipements de combustion (stationnaires et mobiles).

Depuis 1990, on observe une baisse d'environ 35 % des émissions de protoxyde d'azote due à la mise en œuvre d'un contrôle des émissions par le secteur de l'industrie chimique. Bien que marginale, la part attribuée au trafic routier est, elle, en forte hausse du fait de la généralisation des pots catalytiques sur les voitures.

Les activités agricoles émettent du N₂O :

Les émissions de protoxyde d'azote relatives aux activités agricoles sont liées à la gestion du cycle de l'azote contenu dans les fertilisants et les effluents d'élevages. Elles sont généralement sous contrôle biologique et diffusent dans l'espace et dans le temps. Leur réduction implique diverses pratiques et modifications du système d'exploitation, à adapter selon le contexte et les

productions. Elle doit aussi prendre en compte les transferts potentiels de pollution.

-Dans l'industrie, trois sources principales de N₂O ont été identifiées :

- Les ateliers de production d'acide nitrique ;
- Les ateliers de production de glyoxal et d'acide glyoxylique ;
- Les ateliers de production d'acide adipique.

II.4 La vapeur d'eau et le réchauffement climatique planétaire :

L'eau sous forme de vapeur est un gaz à effet de serre (GES). Pourquoi alors n'en parle-t-on jamais au sujet du réchauffement planétaire et pourquoi ne mentionne-t-on que de la contribution des autres GES, surtout celle du CO₂ ? La raison tient au fait que l'impact des émissions anthropiques de vapeur d'eau est négligeable. Par contre, l'eau est très probablement au cœur d'une importante rétraction positive : plus il fait chaud, plus la capacité de l'atmosphère à contenir de la vapeur augmente, amplifiant ainsi le réchauffement planétaire

L'eau contribue à l'effet de serre naturel de la Terre :

La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre particulièrement efficace. Elle absorbe fortement, et dans une vaste gamme de fréquences, les radiations infrarouges émises par la surface terrestre. Ce faisant, elle contribue avec les nuages, le CO₂ et d'autres gaz à l'effet de serre naturel de la Terre. Sans cet effet, la température moyenne sur Terre serait bien plus basse, soit 33 °C de moins.

L'eau serait alors surtout présente sous forme de glace et la vie moins propice. Cependant, l'équilibre thermique naturel terrestre est bouleversé par les activités humaines.

La déforestation et les émissions de CO₂, de méthane, d'oxydes nitriques et d'autres gaz halogénés réchauffent la Terre et la rendent à moyen ou long terme inhospitalière pour l'être humain et les autres espèces.

Il est important de se souvenir que le maintien des conditions de température planétaire ne repose que sur 0,43% des gaz qui composent l'atmosphère (99% est composé d'azote et d'oxygène et ne jouent aucun rôle thermique). [3]

Parmi les contributeurs à l'effet de serre naturel, l'eau est le principal en termes de concentration (H₂O ; 0,39%), suivie de loin par le dioxyde de carbone (CO₂ ; 0,039%), le méthane (CH₄ ; 0,00018%) et l'oxyde nitrique (N₂O ; 0,000032%). [3]

Dans l'absolu, la vapeur d'eau contribue à l'effet de serre pour environ 50%, les nuages (donc l'eau liquide) pour 25%, le CO₂ pour 20%, l'ensemble des autres gaz contribuant pour environ 5%. [4]

L'influence de la concentration d'eau sur l'effet de serre :

Comme on vient de le voir, la vapeur d'eau anthropique ne joue pas de rôle significatif en tant qu'agent de forçage radiatif. Mais, plus généralement, la vapeur d'eau présente naturellement dans l'atmosphère est au cœur d'un phénomène de rétroaction pouvant amplifier la hausse de la température.

L'atmosphère est un fluide gazeux régi par les lois de la thermodynamique. La teneur maximale en vapeur d'eau est déterminée par une loi bien connue, l'équation de Clausius Clapeyron. C'est elle par exemple qui détermine les conditions de température et de pression dictant l'apparition du brouillard, du givre (la « gelée blanche ») ou de la rosée le matin.

L'équation de Clausius Clapeyron indique notamment que la quantité de vapeur d'eau atmosphérique est fixée par la température : plus la température planétaire augmente, plus la teneur en vapeur d'eau augmente. [5]

Bien que l'effet de serre et l'équation de Clausius-Clapeyron abordent des phénomènes distincts, ils sont interconnectés par le rôle de la vapeur d'eau dans le climat et les phénomènes météorologiques.

Et puisque la vapeur d'eau est un GES, elle va à son tour faire augmenter la température. C'est un cas typique de rétroaction positive. Chaque degré d'augmentation de la température peut augmenter la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère de 7%. Cet effet aurait le potentiel de doubler l'effet des gaz à effet de serre anthropiques.

La vapeur d'eau, un acteur majeur du réchauffement climatique :

L'air peut contenir une certaine quantité d'eau sous forme vapeur sans qu'il y ait condensation. Cette quantité est très dépendante de la température : un air froid (de type polaire ou à haute altitude) contient très peu d'eau alors qu'un air chaud (comme rencontré dans les basses couches d'une atmosphère tropicale) peut contenir beaucoup d'eau. La relation entre la température et la quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue dans l'air est très non linéaire (environ 7 % par degré supplémentaire).

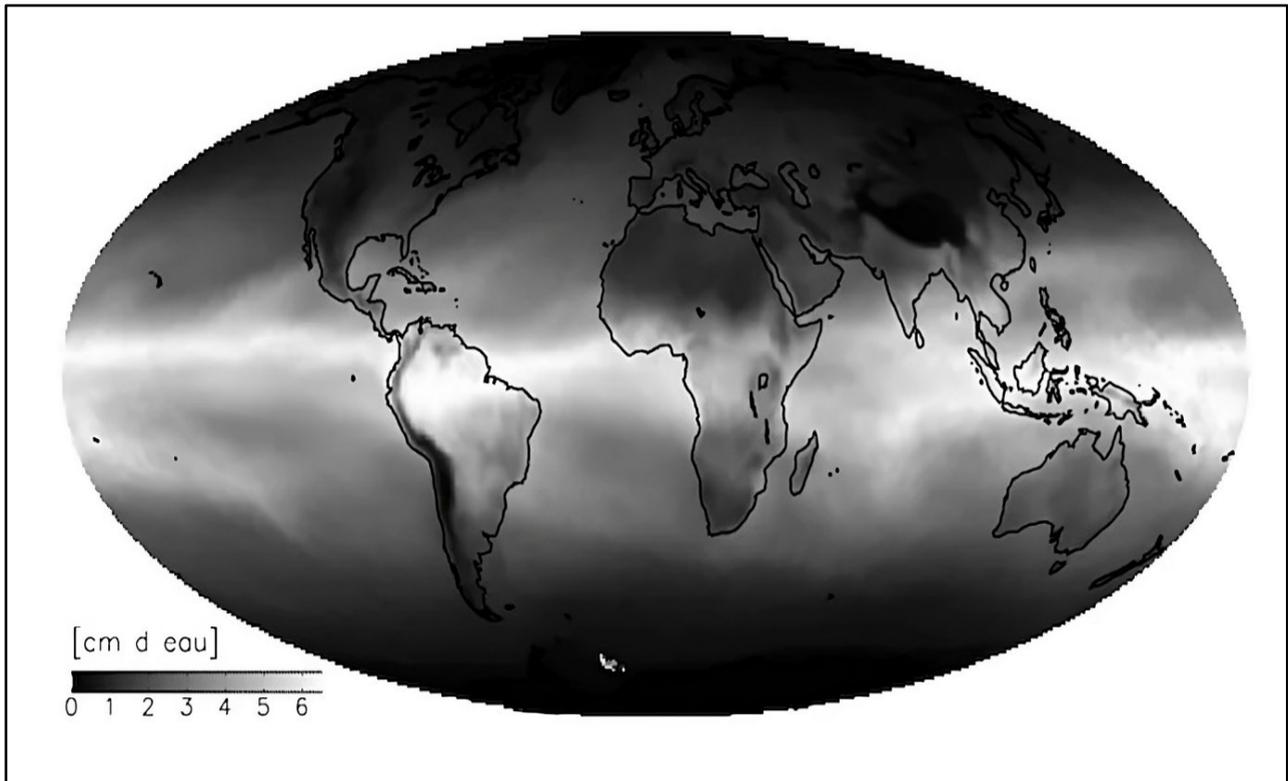


Figure 6: Carte de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère : elle dépend de la température et donc de la latitude.

Si la température augmente à cause d'émissions anthropiques de CO_2 , l'air peut contenir plus de vapeur d'eau. En pratique, c'est bien ce qui se produit et la vapeur d'eau additionnelle dans l'air va alors contribuer à l'effet de serre, renforçant le réchauffement initial.

Ainsi, la vapeur d'eau va contribuer à amplifier l'effet initial (hausse de la température), même si elle n'en est pas à l'origine. C'est ce que l'on appelle une « rétroaction positive ».

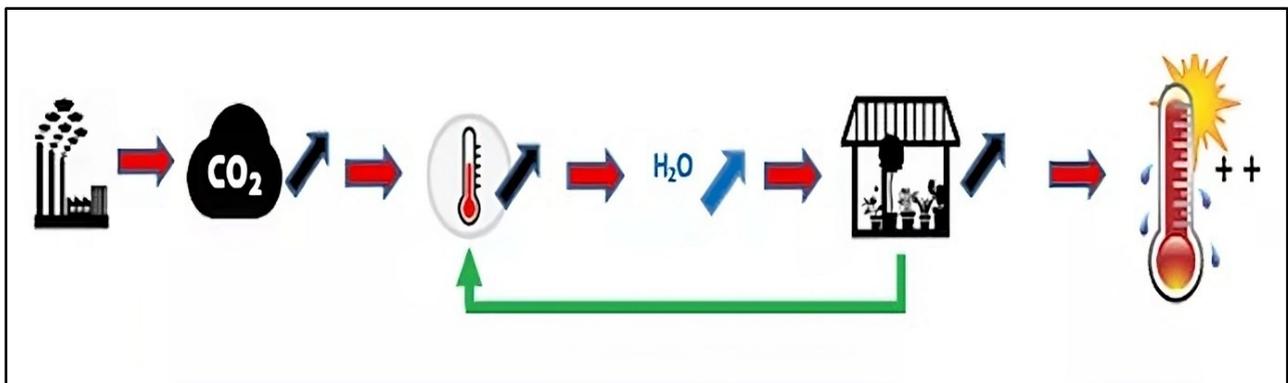


Figure 7: La rétroaction de la vapeur d'eau contribue à amplifier le réchauffement provoqué par l'augmentation de dioxyde de carbone.

Une « rétroaction » est un processus qui se met en place suite à une perturbation initiale et qui vient la renforcer (rétroaction positive) ou l'atténuer (rétroaction négative).

Dans le cadre du réchauffement climatique, un exemple de rétroaction négative forte est lié à l'émission de rayonnement infrarouge : lorsque la température augmente, l'atmosphère, l'océan et les

surfaces émettent plus de rayonnement infrarouge vers l'espace, ce qui permet d'évacuer la chaleur depuis la Terre vers l'espace, et induit un refroidissement.

Du côté des « rétroactions positives », on a vu l'exemple de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cet effet, qui est bien compris et donc inclus dans les modélisations climatiques, multiplie le réchauffement initial par un facteur proche de 3. Il est donc essentiel pour comprendre l'ampleur du réchauffement climatique.

Un autre exemple est celui de la neige et banquise : avec le réchauffement, leurs surfaces tendent à diminuer. Puisque neige et banquise réfléchissent une large part du rayonnement solaire vers l'espace, leur disparition provoque une absorption supplémentaire de l'énergie solaire dans le sol, et donc un réchauffement additionnel.

Les nuages ont eux aussi le potentiel pour être le vecteur d'une rétroaction. Mais leur impact est complexe puisque, dans le même temps, ils réfléchissent une partie du rayonnement solaire vers l'espace (effet refroidissant) et ils contribuent à l'effet de serre (effet réchauffant). Par ailleurs, l'impact du réchauffement climatique sur la couverture et sur l'altitude des nuages n'est pas évident. Les modèles de climat indiquent que, au final, les nuages conduisent à une rétroaction positive, mais son ampleur reste incertaine puisqu'elle diffère suivant les modèles.

Contrairement aux « rétroactions », les « forçages » sont les actions humaines qui conduisent à un changement climatique. Les émissions de vapeur d'eau ne constituent pas un forçage significatif, mais la vapeur d'eau est bien le vecteur d'une rétroaction essentielle pour quantifier l'amplitude du réchauffement climatique. [5]

II.5 Les hydrofluorocarbures (HFC) :

Sont des gaz fluorés utilisés dans diverses applications industrielles, y compris l'industrie du gaz naturel. Les principales sources d'émissions de HFC dans cette industrie sont les suivantes :

Systèmes de réfrigération et de climatisation :

Systèmes de réfrigération commerciale et industrielle : Les HFC sont couramment utilisés comme réfrigérants dans les systèmes de réfrigération commerciale et industrielle, tels que les supermarchés, les entrepôts frigorifiques, les installations de stockage des aliments, etc. Les fuites de ces systèmes peuvent entraîner des émissions de HFC dans l'atmosphère.

Climatisation : Les HFC sont également utilisés comme réfrigérants dans les systèmes de climatisation des bâtiments commerciaux, résidentiels et industriels. Les fuites dans ces systèmes peuvent contribuer aux émissions de HFC.

Mousse et isolation :

Mousse expansive : Les HFC sont utilisés dans la production de mousses expansées pour l'isolation thermique dans les bâtiments, les appareils électroménagers, les véhicules et autres applications. Les émissions de HFC peuvent se produire pendant le processus de production, lors de la mise en œuvre

ou en raison de la dégradation ultérieure de la mousse

Applications spécifiques :

Aérosols : Certains aérosols, tels que les aérosols propulseurs, contiennent des HFC.

Équipements électriques et électroniques : Les HFC sont utilisés comme agents de soufflage, de nettoyage ou de protection dans la fabrication d'équipements électriques et électroniques.

Pour réduire les émissions de HFC dans l'industrie du gaz naturel, plusieurs mesures peuvent être prises :

Utilisation de réfrigérants à faible potentiel de réchauffement globale (PRG) en remplacement des HFC à fort PRG.

Mise en œuvre de systèmes de gestion des fuites efficaces pour les systèmes de réfrigération et de climatisation afin de minimiser les pertes de HFC.

Promotion de l'utilisation de technologies alternatives et de substituts aux HFC, tels que les réfrigérants naturels (par exemple, les hydrocarbures, l'ammoniac, le CO₂) et les mousses isolantes à faible teneur en HFC.

Il est important de noter que les réglementations environnementales peuvent jouer un rôle crucial dans la réduction des émissions de HFC, en imposant des limites d'utilisation, des normes d'efficacité énergétique et des contrôles de fuites pour les industries utilisant ces gaz.

II.6 Les différents types de gaz fluorés :

Les gaz fluorés sont utilisés dans diverses applications : réfrigérateurs, systèmes de refroidissement, gonflement de la mousse, commutateurs électriques, bulles d'air des chaussures de sport ou encore pneus de voiture. On retrouve parmi eux :

-Les perfluorocarbures (PFC), composés organiques formés uniquement de carbone et de fluor (six atomes de carbone au plus), surtout utilisés dans les procédés de fabrication de semi-conducteurs et pour des applications diverses et ciblées sur d'autres secteurs, par exemple en diélectrique ou en fluides de transfert de chaleur (en application confinée ou en application ouverte). Les émissions atmosphériques de PFC proviennent également de la formation de PFC lors du procédé de première fusion de l'aluminium, par effet d'anode.

-L'hexafluorure de soufre (SF₆), gaz intervenant comme diélectrique dans les équipements électriques (commutateurs et transformateurs haute et moyenne tension), est également utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs. L'emploi du SF₆ comme gaz inertant dans la production de magnésium génère également des émissions atmosphériques de SF₆. La part des gaz fluorés dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre est de 1,1%. Même s'ils représentent une petite partie des gaz à effet de serre, ils sont considérés comme puissants, et représentent donc une menace pour

l'environnement.

III L'effets des GES sur :

III.1 La nature et la biodiversité :

En général, les effets néfastes sur la nature et la biodiversité sont provoqués principalement par le dérèglement climatique causé par l'activité humaine. Les types de pollution ayant des effets sur la nature et la biodiversité sont multiples, en fonction des compartiments de l'environnement qui assurent la transmission des polluants vers les différentes espèces (eau, air, sol) :

- La pollution par les matières organiques (provenant des déchets domestiques, agricoles ou industriels),
- La pollution microbiologique par les déchets organiques contenant des germes pathogènes (virus, bactéries ou parasites),
- La pollution par les hydrocarbures, la pollution par pesticides,
- La pollution par les nitrates des eaux souterraines,
- L'eutrophisation des eaux.

III.2 La sante humaine :

De plus en plus, la santé humaine est affectée par les problèmes écologiques liés à la pollution atmosphérique et aquatique, à l'exposition aux substances chimiques dangereuses et aux nuisances sonores. Généralement, les effets les plus connus sont les problèmes d'infection des voies respiratoires, d'allergies, certains types de cancer, des effets neurotoxiques et la déficience du système immunitaire. Ainsi, on peut citer comme principales catégories de risques pour la santé humaine :

- Toxicité humaine par polluant direct : inhalation, ingestion, etc.
- Smog photochimique : production excessive d'ozone troposphérique et accumulation de particules en suspension.
- Destruction de la couche d'ozone : exposition accrue aux ultraviolets solaires.
- Exposition au bruit et aux odeurs...

IV Cadre juridique international :

Le cadre juridique international en matière de lutte contre la pollution atmosphérique et la réduction des gaz à effet de serre, a connu une évolution considérable ces dernières années. Cette évolution est proportionnelle à la prise de conscience internationale.

1. Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (adoptée à Genève en 1979 - entrée en vigueur en 1983).

La Convention a été élaborée au sein de la Commission des Nations Unies pour l'Europe qui réunit tous les Etats européens, la Russie, le Canada et les Etats-Unis d'Amérique. Ce traité régional est entré en vigueur le 16 mars 1983, IL concerne en premier lieu des états industrialisés confrontés de plus en plus à la pollution atmosphérique transfrontière. Les principales obligations de la Convention visent la protection de l'homme et son environnement contre la pollution. Jusqu' 1998, la convention de Genève 1979 a connu plus de 5 protocoles additionnels dont les objectifs étaient soit la mobilisation des moyens ou la mise en œuvre de plans d'actions relatifs à des substances spécifiques (souffre, oxyde d'azote, COV).

2. Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone (1985) :

C'est une Convention sans obligations qui comptait 160 Parties. Elle est entrée en vigueur le 22/09/1988. Elle établit une procédure qui vise à réduire la production et l'utilisation des Chlorofluorocarbones (CFC).

3. Le Protocole de Montréal sur les substances détruisant la couche d'ozone : (Adopté en 1987 - entré en vigueur en 1989).

Le Protocole prévoit l'obligation pour les parties de geler leur consommation et production des substances réglementées et il énonce l'obligation de réduire la consommation et la production d'au moins une partie de ces substances. En 1997, le protocole s'appliquait à 161 Etats signataires. Successivement à Londres (1990) puis à Copenhague (1992), lors des Conférences des Parties, le Protocole a subi des ajustements et des amendements. Les amendements de Londres renforcent les restrictions aux échanges commerciaux avec les Etats non Parties du Protocole de Montréal, comme il renforce le mécanisme financier. Alors qu'à Copenhague, les ajustements s'articulent essentiellement sur de nouveaux objectifs et un nouveau calendrier

4. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) : (Adoptée en décembre 1992, entrée en vigueur en 1992).

Adoptée lors du Sommet de Rio de Janeiro au Brésil, cet accord pose les fondements d'une action internationale concertée visant à atténuer les changements climatiques et à s'adapter aux incidences qu'ils entraînent. Ses dispositions qui traduisent une vision à long terme ont novatrices et étroitement liées à la notion du développement durable.

La Convention-cadre applique le principe des responsabilités communes mais différenciées, qui a été reconnu dans la Déclaration de Rio de Janeiro (1992). On retrouve ce principe dans le préambule de

la Convention-cadre qui stipule ceci : « Consciente que le caractère planétaire des changements climatiques requiert de tous les pays qu'ils coopèrent le plus possible et participent à une action internationale, efficace et appropriée, selon leurs responsabilités communes mais différenciées respectives et leur situation sociale et économique ».

En plus de la Conférence des Parties (COP) et du secrétariat, la CCNUCC a créé deux organes subsidiaires, l'un chargé du conseil scientifique et technologique et l'autre chargé de la mise en œuvre.

La Conférence des Parties (COP) a tenu 15 sessions, et a adopté plus de 300 Décisions, certaines d'une importance capitale, comme celles portant adoption du protocole de Kyoto et d'autre, de caractère technique, comme celles instituant des directives pour l'établissement par les parties de rapports nationaux et de communications nationales sur leurs émissions et les mesures prises pour faire face aux changements climatiques.

La Convention-cadre a prévu un mécanisme financier ainsi qu'un mécanisme institutionnel, afin de mettre en œuvre ses engagements. Comme, elle a prévu l'élaboration d'un Protocole afin d'établir des règles juridiques communes aux Parties.

5. Engagements au titre de la CCNUCC :

5.1 Cadre général : La CCNUCC établit un cadre général pour relever le défi des changements climatiques au plan international. Elle déclare que son objectif ultime est de stabiliser les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre à un niveau qui les empêchera de nuire au système climatique.

5.2 Rapport sur les émissions : Les Parties à la Convention ont accepté un certain nombre d'engagements pour répondre aux changements climatiques. Toutes les Parties doivent rédiger et soumettre périodiquement des rapports spéciaux appelés communications nationales. Celles-ci doivent contenir des informations sur les émissions de gaz à effet de serre de la Partie concernée et décrire les mesures que cette dernière a prises et les plans qu'elle doit adopter pour appliquer la Convention.

5.3 Programmes nationaux : La Convention exige de toutes les Parties qu'elles mettent en œuvre des programmes et mesures nationaux afin de contrôler les émissions de gaz à effet de serre et s'adapter aux impacts des changements climatiques. Les Parties ont également consenti à promouvoir le développement et l'utilisation de technologies non-nuisibles pour le climat, la sensibilisation et l'éducation aux changements climatiques et à leurs impacts, et la gestion durable des forêts et autres écosystèmes qui peuvent capter les gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ainsi qu'à coopérer avec d'autres Parties dans ces domaines.

5.4 Engagements des pays industrialisés : les pays industrialisés, appelés Parties à l'Annexe I de la Convention, ont pris des engagements supplémentaires. Ces parties ont initialement accepté d'entreprendre des politiques et mesures ayant pour objectif précis de revenir en 2000 aux niveaux d'émissions de gaz à effet de serre de 1990. Les Parties à l'Annexe I doivent également fournir des communications nationales plus fréquentes et des rapports annuels séparés sur leurs émissions nationales de gaz à effet de serre.

6. Le Protocole de Kyoto (signé en 1997, entré en vigueur en 2005).

C'est un traité international visant à la réduction des gaz à effet de serre dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CNUCC). Signé lors de la troisième conférence annuelle de la convention (COP3) à Kyoto, il a été ratifié à ce jour par 183 pays. L'objectif principal de cet accord est de réduire ou d'éliminer les émissions des gaz à effet de serre, à l'origine du dérèglement climatique. Il engage 38 pays développés à réduire leurs émissions de 5.2% en moyenne d'ici 2012. L'année de référence pour évaluer cette réduction est 1990. Le principe de base du Protocole de Kyoto s'articule autour de la notion de responsabilités communes et différenciées. Cela sous-entend les spécificités des pays, leurs priorités nationales et régionales de développement.

6.1 Principe environnementaux du Protocole. L'article 2 du Protocole de Kyoto énonce des mesures à appliquer en matière d'environnement, Il s'agit de :

- Accroître l'efficacité énergétique,
- Protection et renforcement des puits et réservoirs des gaz à effet de serre,
- Promotion de l'agriculture durable,
- Promotion des énergies renouvelables et propres,
- Réajustement de la réglementation afin de promouvoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre,

Limiter ou réduire les émissions issues des secteurs de la gestion des déchets, le transport et la distribution d'énergie. Ces mesures représentent les axes essentiels autour desquels s'articulent les mécanismes de flexibilité prévus par le Protocole

6.2 Mécanismes du Protocole :

La faisabilité des objectifs inscrits au titre du Protocole reste tributaire de plusieurs facteurs. Il s'agit notamment des contraintes liées aux coûts et aux frais qu'engendrerait le recours aux solutions technologiques de substitutions proposées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce point

a été soulevé par les pays en voie de développement (PED) qui ont exigé d'aides substantielles pour venir à bout de ces difficultés. Ainsi, il a été prévu la mise en place de mécanismes fondés sur le marché et des instruments économiques adaptés pour inciter les parties à plus d'effort.

6.3 Mesures contraignantes du Protocole :

Il est prévu des mesures contraignantes envers les pays en infraction par rapport aux objectifs fixés. Ces pays doivent compenser leurs surplus d'émissions en empruntant des crédits d'émissions avec une pénalité de 30%. Cependant, à ce jour l'application de telles mesures et le report des échéances restent problématiques.

6.4 Engagements au titre du Protocole de Kyoto

6.4.1 Stabilisation des gaz à effet de serre :

Le Protocole a le même objectif final que la Convention, à savoir la stabilisation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre à un niveau qui empêche de dangereuses interférences avec le système climatique. Pour atteindre cet objectif, le Protocole de Kyoto renforce et améliore de nombreux engagements déjà mis en place par la Convention. Seules les Parties à la Convention deviennent Parties au Protocole.

6.4.2 Objectifs juridiquement contraignants pour les pays en développement :

Bien que toutes les Parties aient accepté de poursuivre la mise en œuvre des engagements pris au titre de la Convention, seules les Parties à l'Annexe I ont accepté de nouveaux objectifs au titre du Protocole. Pour être précis, ces Parties ont accepté des objectifs d'émission juridiquement contraignants pour la période 2008-2012.

6.4.3 Nouveaux outils pour réduire les émissions : Pour aider les pays industrialisés à atteindre ces objectifs juridiquement contraignants et promouvoir un développement durable dans les pays en développement, le Protocole de Kyoto a adopté trois mécanismes novateurs : le mécanisme de développement propre ou MDP, la mise en œuvre commune (MOC) et l'échange d'émissions.

6.4.4 Suivi : Pour étayer l'application de ces mécanismes et encourager la réalisation, par les Parties à l'Annexe I, de leurs objectifs d'émission, le Protocole de Kyoto a renforcé les procédures de rapport et de suivi de la Convention et créé un système de banques de données électroniques, appelés registres nationaux, afin de surveiller les transactions effectuées au titre du mécanisme de Kyoto. Il a également créé un comité de surveillance qui a l'autorité de décider et d'appliquer les conséquences.

Tableau 2: Chronologie des évènements et rendez-vous internationaux Sur le climat.

1979	Première Conférence mondiale sur le Climat
1988	Création du groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)
1989	Deuxième Conférence mondiale sur le Climat Rapport 1 du GIEC
1990	Assemblée Générale des Nations Unies – lancement de négociations sur l'élaboration d'une convention Internationale sur les changements climatiques
1991	Le Comité intergouvernementale de négociation adopte le Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
1992	Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement La Convention est ouverte à la signature
1994	Entrée en vigueur de la Convention-cadre
1995	COP 2 Berlin Rapport 2 du GIEC
1996	Deuxième Conférence des Parties à Genève
1997	COP 3 Kyoto - Adoption du Protocole de Kyoto
1998	COP 4 Buenos Aires
1999	COP 5 Bonn
2000	COP 6 La Haye (Partie 1) - Négociation des modalités de mise en œuvre du Protocole Kyoto COP 6 / Partie 2 Bonn - Accord politique sur les modalités de mise en œuvre du Protocole Kyoto

2001	COP 7 Marrakech - Mise au point des accords techniques du Protocole Kyoto Rapport 3 du GIEC
2002	Sommet Mondial pour le Développement Durable COP 8 New Delhi
2003	Conférence Mondiale sur les Changements climatiques COP 9 Milan
2004	COP 10 Buenos Aires
2005	COP 11 Montréal
2006	COP 12 Nairobi
2008	COP 14 Poznan
2009	COP 15 Copenhague

7. L'Algérie et le Protocole de Kyoto : L'Algérie est partie à la CCNUCC par décret présidentiel 93-99 du 10 Avril 1993 portant ratification de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. L'Algérie est partie au Protocole de Kyoto le 17 mai 2005 :

- Décret présidentiel n°04-144 du 28 avril 2004 portant ratification du Protocole de Kyoto à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques, fait à Kyoto le 11 décembre 1997.
- Instruments de ratification déposés le 16 Février 2005 L'Algérie démontre un engagement sérieux dans le processus des Changements Climatiques ; Elle :
 - Participe pleinement aux négociations (très active)
 - Membre du Groupe d'Experts sur le Transfert de Technologie (2006)
 - Membre du Conseil Exécutif du MDP (2007 à ce jour)
 - Préside le Groupe Afrique des Changements Climatiques pour les années 2008-2009

- Participe à la coordination de sujets de négociations au titre du Groupe Africain et du G77+Chine
- Participe à la Co-Présidence de Groupes de Contacts / Consultations Informelles (Spill Over Effect, 2.3 et 3.14 mesures de ripostes, diversification économique, ...).

V . Caractéristiques des combustibles :

a. La combustion :

La combustion c'est une réaction chimique dégageant de la chaleur, elle s'obtient en faisant agir un combustible (réducteur) avec un comburant (oxydant) dont l'ensemble constitue le milieu réactionnel.

Le combustible et le comburant réagissent entre eux pour donner des sous-produits de combustion.

Dans la majorité des combustions industrielles, les systèmes réactionnels sont constitués de :

- Un combustible sous forme de charbon, d'hydrocarbures liquides ou gazeux, de gaz sidérurgique.
- Un comburant sous forme d'un composé oxygéné tels que l'air ou l'air sur oxygéné.

Dans le cadre des inventaires, la combustion de carburant peut être définie comme l'oxydation intentionnelle de matière dans un appareil conçu pour fournir de la chaleur ou un travail mécanique a un procédé.

Pour écrire les équations de combustion ou établir des bilans massiques exprimant la conservation des espèces chimiques, il est nécessaire de connaître :

- D'une part, la nature du combustible est celle du comburant à travers leurs formulations chimiques ou leur analyse élémentaire.
- D'autre part, les proportions relatives de ces deux réactifs dans le milieu réactionnel. [6]

b. Les combustibles

Les combustibles sont des matières organiques (végétales et animales) ayant subi des transformations physico-chimiques provoquées par des phénomènes de :

- Pression, due à un enfouissement anaérobique (mines, gisements).
- Température.
- Stockage de très longue durée (centaines de millions d'années).

Les combustibles sont des mélanges complexes dans lesquels on retrouve les éléments chimiques suivants : Carbone $c=12$, hydrogène $H=1$, oxygène $o=16$, azote $N=14$, soufre $s=14$.

En dehors des hydrocarbures purs de type C_nH_m les combustibles sont connues plutôt par leur composition pondérale (cas de liquides et solides) ou volumiques (cas de gaz), on entend par hydrocarbures purs les composés hydrocarbonés exclusivement constitués de carbone et d'hydrogène les quatre grandes familles hydrocarbures sont les suivants :

- Série des paraffines à chaîne ouverte saturé.
- Série des paraffines à chaîne fermé saturé.

- Série des oléfines.
- Série des Aromatique.

c. Caractéristiques communes des combustibles

Composition élémentaire chimique générale : carbone, hydrogène et soufre (+oxygène, azote.....),

On distingue différents types de combustibles :

- Solides : Matière d'origine végétale transformée progressivement en tourbe, lignite, houille et anthracite.
- Liquides et Gazeux : matière organique animale transformée en pétrole et gaz combustible.
- Bicomcombustibles : Bois de chauffage, Charbon de bois, Biocarburants, Biogaz.
- Déchet : matières Biodégradables ou non.

Plus un combustible est dense, plus il contient de carbone.

Les principaux critères de comparaison sont :

- Le pouvoir calorifique (PCI ou PCS).
- Les émissions de CO₂.
- D'autres critères sont aussi importants à connaître : manutention, stockage, sécurité, pollution (Soufre, N₂ ...).

d. Le comburant

Le comburant est constitué d'oxygène plus au moins dilué d'azote, il répond à la forme générale O₂+N.

VI -Les sources d'émission de GES dans l'industrie gazifière :

Les émissions de GES de cette industrie proviennent d'une très large variété de sources qui peuvent être regroupées pour faciliter leur comptabilisation dans les principales catégories suivantes :

1) Les émissions de combustion, incluant les sources stationnaires et mobiles :

- Les sources stationnaires de combustion qui constitue la part la plus importante des émissions de l'industrie gazifière et qui résulte de la combustion dans les équipements de production de chaleur et d'énergie tel que : les chaudières, les turbines, les moteurs et autres torches et incinérateurs.
- Les sources mobiles constituées par les émissions de tous les nombreux moyens de locomotion utilisé par l'industrie du gaz tel que : tankers, avions, camions, trains, et autres véhicules de transport de personnes ou de marchandise. Malgré la large utilisation de ces moyens leurs contributions restent faibles devant les sources stationnaires de combustion.

2) Les émissions de ventilation et rejets de procédé :

- Ces émissions résultent de l'utilisation de procédés physiques ou chimique de traitement ou séparation utilisés dans cette industrie, On peut citer : les rejets de CO₂ lors du traitement de gaz naturel ou ceux du méthane lors de la stabilisation des huiles sur le champ de production.

3) Les émissions fugitives :

- Ces émissions résultent des fuites se produisant sur les joints, raccords, tubulures et vannes. Ce genre d'émissions est de tout temps contrôlé au vu des risques que telles fuites peuvent occasionner dans l'industrie des hydrocarbures et sont généralement insignifiantes.
- Dans le transport du gaz par canalisation les émissions fugitives de méthane peuvent devenir significatives.

4) Le Brûlage :

Le brûlage est réalisé pour des raisons de sécurité, lorsque plus de gaz est produit par rapport au gaz pouvant être utilisé ou pour le contrôle des émissions de routine.

- Le brûlage peut être nécessaire pour des raisons de sécurité sur les installations puits ou de traitement de gaz lors notamment lors des opérations de complétion de puits (avant mise en production), la maintenance de routine et de non-routine, et les arrêts d'urgence.

- Le brûlage peut être nécessaire car la quantité de gaz produite est supérieure à celle qui peut être utilisée. Cela peut être dû au manque d'infrastructures de collecte du gaz, les sur-approvisionnements et les déséquilibres de pression, l'arrêt temporaire des équipements et la mise en commun des liquides du gaz naturel. Si le gaz est produit à partir de puits de pétrole avant que les lignes de collecte de gaz ne soient disponibles, le torchage peut être utilisé. Même s'il existe une infrastructure de collecte des gaz, la production initiale, à haute pression et à haut débit, des nouveaux puits peuvent submerger les systèmes de collecte et le gaz excédentaire peut être brûlé à la torche. La formation de condensat dans les réseaux de collecte peut également entraîner le brûlage.

- Le brûlage à la torche peut être utilisé comme contrôle des émissions de routine, pour contrôler certains types d'émissions qui pourraient autrement être ventées et rejetées dans l'atmosphère.

Les volumes brûlés sont régulièrement quantifiés sur la base des mesures de l'intensité lumineuse effectuées par satellite. Ces émissions ne comprennent pas le brûlage à dans des espaces clos, mais donnent néanmoins une indication de l'ampleur et de la répartition du brûlage à un moment donné.

En 2018, Global Gas Flaring Reduction Partnership de la Banque mondiale (Banque mondiale, 2019) a rapporté que les torches à ciel ouvert ont brûlé environ 145 milliards mètres cubes (bcm) de gaz par an.¹ Cela représente près de 4 % des 3 870 milliards de m³ de gaz naturel produits dans le monde en 2018. La répartition est détaillée dans la figure figure ci-contre. Si les 145 (bcm) de gaz brûlé avait été vendu, il serait valorisé 15 à 20 milliards de dollars américains par an (sur la base d'une valeur du gaz allant de 3 à 4 dollars américains par mille pieds cubes standard (0,11 à 0,14 dollars américains par mètre cube standard).

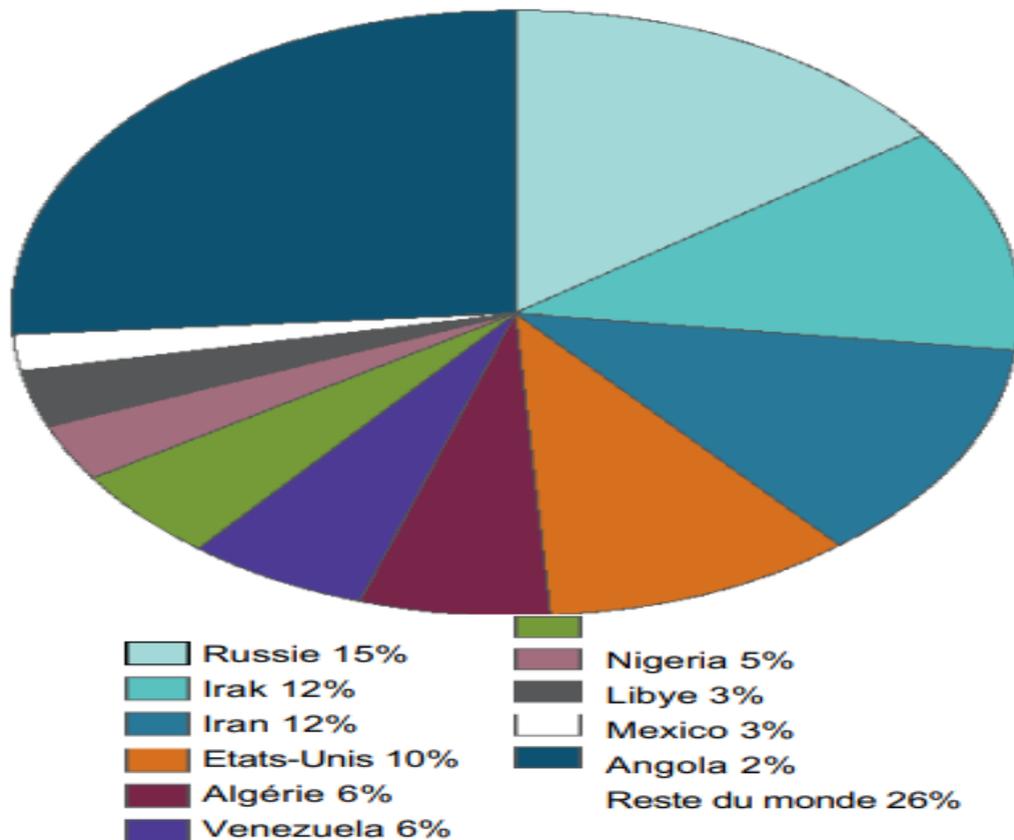


Figure 8: Volume brûlé par pays (top 10 et le reste du monde) pendant l'année 2018

5) Émissions indirectes de GES :

Les émissions indirectes sont les émissions qui sont une conséquence des activités de l'entreprise déclarante mais provenant de sources détenues ou contrôlées par une autre partie (IPIECA, 2011). Cette catégorie comprend les émissions provenant de la combustion d'hydrocarbures pour produire de l'électricité, de la chaleur, de la vapeur, ou de refroidissement, où cette énergie est importée ou achetée.

Ce document se concentre sur les émissions de GES de CO₂, CH₄ et N₂O car ce sont les émissions les plus importantes. les GES courants émis par les activités de l'industrie pétrolière et gazière. Cependant, bien que l'API Compendium fournit des méthodes d'estimation des émissions pour les six GES ou classes de GES (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC et PFC), cela ne devrait pas impliquer que tous les GES sont nécessairement importants.

Le dioxyde de carbone est principalement émis à partir de sources de combustion, mais peut également être émis à partir de gaz la production, le traitement, le raffinage et les opérations de CSC par le biais de certaines sources ventilées et fugitives. Ceci est particulièrement important dans les opérations utilisant ou traitant du gaz de champ riche en CO₂. Pour ces sources autres que la combustion, le potentiel d'émission de CO₂ dépendra de la concentration en CO₂ associées à la

source d'émission, ainsi que les pratiques de conception et d'exploitation des installations. La concentration de CO₂ dans le gaz naturel commercial est généralement faible (< 2 % par gazoduc spécifications), de sorte que les émissions ventilées et fugitives associées à son utilisation sont faibles par rapport aux émissions produites par la combustion. Cependant, les émissions de CO₂ évacuées et fugitives du CSC les opérations peuvent être Les émissions de méthane peuvent provenir d'une ou de toutes les sources d'émission décrites. Le méthane est émis lorsque du gaz naturel est émis par des sources de fuites fugitives d'équipement ou lorsque le gaz naturel est évacué directement pendant les procédures d'entretien ou d'urgence. On trouve aussi du méthane dans les gaz d'échappement en raison d'une combustion incomplète du carburant. Le protoxyde d'azote est produit à la fois naturellement, par diverses réactions biologiques dans le sol et dans l'eau, et anthropique à travers les activités industrielles, de gestion des déchets et agricoles. En ce qui concerne les opérations de l'industrie pétrolière et gazière, des traces de N₂O peuvent se former à partir de réactions entre l'azote et l'oxygène qui se produisent lors de la combustion d'une source fixe ou mobile. La quantité de N₂O formée lors de la combustion varie en fonction du carburant, de l'équipement et de la pollution dispositif de contrôle (par exemple, les convertisseurs catalytiques installés pour réduire les émissions des véhicules à moteur peuvent augmenter émissions de N₂O). Selon le type d'installation (c'est-à-dire station de compression ou usine à gaz) et prolifération (et modèle/type) de moteurs alternatifs dans une installation en amont particulière, N₂O les émissions peuvent représenter plus de 2 % de l'inventaire total des émissions de GES de l'installation, sur une base d'équivalent CO₂. Comme indiqué à la section 8, les émissions de N₂O contribuent à moins de 1 % des émissions globales de GES d'une raffinerie inventaire (sur une base CO₂e). Climatisation (mobile et stationnaire), réfrigération (y compris les gros équipements de traitement tels que refroidisseurs) et les équipements d'extinction d'incendie sont des sources potentielles d'émissions de HFC et de PFC. Soufre l'hexafluorure est le plus souvent utilisé pour les applications de disjoncteurs dans l'industrie de l'énergie électrique, mais peut également être utilisé comme gaz traceur pour la détection de fuites dans les pipelines. Très plus importantes que celles des systèmes de gaz naturel, mais encore petites par rapport à Émissions de combustion de CO₂.

VII Principe de quantification des émissions de GES :

1. **Transparence** : La documentation est suffisante et assez claire pour que des parties autres que la structure qui a réalisé l'inventaire puissent comprendre comment l'inventaire a été compilé et peut leur garantir que les principes de bonnes pratiques des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre sont respectés. (les informations communiquées en termes de méthodes, données d'activité, facteurs choisis, etc. permettent de comprendre et reproduire l'inventaire)
2. **Cohérence** : Les estimations pour différents gaz, catégories de source et années d'inventaire sont réalisées de telle manière que les différences dans les résultats d'une année à l'autre et d'une

catégorie à l'autre reflètent les différences réelles dans les émissions. Si possible, les tendances annuelles des inventaires devraient être calculées en utilisant la même méthode et les mêmes sources de données chaque année et devraient chercher à refléter les réelles fluctuations annuelles dans les émissions ou les absorptions et ne pas être sujettes à des changements causés par des différences méthodologiques. (Ex : Cohérence dans la série de données, on n'utilise pas un facteur d'émission différent pour une même source d'émission d'une année sur l'autre, idem pour les PRG ou les méthodes utilisées. En cas de changement, il est nécessaire de recalculer toute la série)

3. **Exhaustivité** : Les estimations sont présentées pour toutes les catégories pertinentes de sources, puits et gaz. Lorsque des éléments manquent, leur absence doit être clairement indiquée et une explication quant à leur absence doit être donnée. Cela implique de tendre à reporter toutes les émissions de GES, quand une méthode du GIEC permet leur calcul et que les données sont disponibles. Aussi, le périmètre organisationnel et opérationnel défini pour le reporting des émissions correspond aux émissions réelles de Sonatrach (ni surestimées, ni sous-estimées)
4. **Comparabilité** : L'inventaire national de gaz à effet de serre est présenté de manière à pouvoir être comparé avec les inventaires nationaux de gaz à effet de serre d'autres pays. Cette comparabilité devrait être reflétée dans le choix approprié de catégories de source clés, dans l'adoption des directives pour l'établissement des rapports et tableaux, et dans l'utilisation de la classification et de la définition des catégories d'émissions ou d'absorptions présentées. Cela implique également de promouvoir en interne la comparabilité entre les sites de même nature en uniformisant les méthodes (ex : choisir un même facteur d'émission pour un même type de sources au sein de l'entreprise)
5. **Exactitude** : Mesure relative de la rigueur de l'estimation des quantités émises ou absorbées. Les estimations doivent être exactes, c'est-à-dire qu'elles ne doivent comporter aucune surévaluation ou sous-évaluation systématique des quantités réellement émises ou absorbées, pour autant que l'on puisse en juger d'après les données et informations disponibles. Par ailleurs, les incertitudes doivent être aussi réduites que possible. Pour assurer l'exactitude d'un inventaire, des méthodes appropriées et conformes aux Lignes directrices du GIEC doivent être utilisées.

VIII . Les méthodologies de comptabilisation des GES :

1. ISO 14064-1 : 2006 et 14069 :

La norme ISO 14064-1 : 2006, élaborée au sein du comité technique ISO/TC207 « management environnemental », spécifie, pour les organisations, les principes et les exigences pour la quantification et la rédaction de rapports sur les émissions et suppression de Gaz à Effet de Serre. La France a proposé sa révision, ce qui a été accepté à plus de 80% (vote en septembre 2013). Ce travail a démarré en janvier 2014 dans le cadre du TC207/SC7/WG4 et est porté par la France (présidence et

secrétariat). Le contenu de la révision s'appuiera sur le Technical Report ISO 14069, disponible depuis avril 2013. Ce guide technique a pour objectif d'aider les utilisateurs dans l'application de la norme ISO 14064-1 au travers de lignes directrices et d'exemples afin d'assurer la transparence dans la quantification des émissions et suppressions de GES des organisations et dans la rédaction de leurs rapports. Il propose par ailleurs une nomenclature des postes d'émissions au sein de chaque scope. [7]

2. Les méthodes spécifiques et sectorielles :

D'autres méthodes, protocoles, et outils ont été développés pour répondre aux spécificités des secteurs. Par exemple, l'ADEME, en collaboration avec le Ministère français en charge de l'agriculture, les partenaires et instituts techniques du secteur agricole, a développé et mis à disposition Dia'terre en 2010 pour l'évaluation des émissions de GES des exploitations agricoles ou encore ClimAgri pour l'évaluation des émissions de GES de l'agriculture et des forêts à l'échelle des Territoires. Dans le secteur universitaire, l'université de NEW Hampshire en collaboration avec l'institut Second nature ont développé un outil (une plateforme) fondé sur les exigences du GHG Protocol qui sert à faire une comptabilisation ainsi qu'un reporting des émissions des GES dans un établissement universitaire.

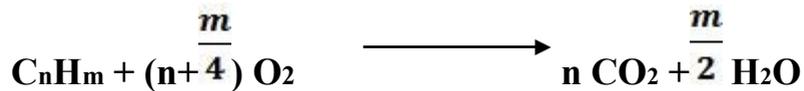
3. La méthode Bilan Carbone :

La Méthode Bilan Carbone est une méthode de calcul des émissions annuelles de gaz à effet de serre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, elle a été créée par l'ADEME (Agence pour la Transition Ecologique), ce bilan peut être fait par un état, une région, une entreprise ou même une institution. Toutes les échelles sont personnelles. Si nos activités émettent du méthane (CH₄), du protoxyde d'azote (N₂O) et du dioxyde de carbone (CO₂), nous devons tous les convertir en équivalent dioxyde de carbone. L'approche par bilan matière consiste à calculer les émissions sur la base des quantités de matière les plus connues (dans le cas du CO₂ d'origine énergétique, il s'agit du bilan du combustible utilisé). Le bilan carbone a pour but d'informer le système d'échange, de jeter les bases de solutions efficaces pour réduire la consommation d'énergie et d'optimiser les taxes écologiques (taxes carbone). La combustion est une opération courante dans l'industrie pétrolière pour produire de l'énergie, par les sources fixes ou mobiles dans les torchères ou autres procédés d'oxydation.

Pour chacune de ces sources, On considérera que les GES émis sont :

- Le CO₂ produit de la réaction de combustion.
- Le CH₄ gaz imbrulée lors de cette combustion.
- Le N₂O produit d'une série de réactions complexes lors de la combustion.

Réaction de la combustion :



4. GHG Protocol :

En 1998, le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) et le World Resources Institutes (WRI) ont développé, en partenariat avec des entreprises, des ONG et des représentants d'états, une méthode de comptabilisation et de déclaration des émissions de GES pour les entreprises : le GHG Protocol « A Corporate Accounting and Reporting Standard ». Ce protocole, largement diffusé à l'international, a servi de base à l'élaboration de l'ISO 14064-1 : 2006. En octobre 2011, le GHG Protocol a été complété du « Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard » qui précise notamment les postes potentiels d'émissions indirectes de GES Chapitre II : Mesure et comptabilisation des émissions des GES et de l'azote réactif Importance et Méthodologies 13 d'une organisation. Depuis juillet 2014, une méthode dédiée aux Territoires est mise à disposition : le Global Protocol for Community-scale GHG emissions.

5. Empreinte de carbone :

Selon le Global Footprint Network, le terme « empreinte carbone » est utilisé comme diminutif pour la quantité de carbone (généralement en tonnes) émise par une activité, une personne, un groupe ou une organisation, par sa consommation en énergie et en matières premières. La composante carbone de l'empreinte écologique va au-delà de cette définition en traduisant cette quantité en surface de forêt nécessaire pour séquestrer ces émissions de dioxyde de carbone. Cela permet de représenter la demande que les combustions de ressources fossiles exercent sur la planète. L'empreinte carbone représentant la moitié de l'empreinte écologique de l'ensemble de l'humanité, il paraît essentiel de la réduire afin de lutter contre cette surconsommation.

Le Dictionnaire de l'environnement définit l'empreinte carbone comme la mesure du volume de dioxyde de carbone (CO₂) émis par les énergies fossiles, par les entreprises ou les êtres vivants. Il est, dans ses usages privés de l'énergie, directement responsable d'une partie des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Le terme « empreinte carbone » a été choisi car le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique. Le calcul se fait en comparant le potentiel de réchauffement global de différents gaz par rapport à celui du CO₂. [8]

CHAPITRE 03 :
Quantification des émissions
des GES

1. Sources d'émissions du GES dans le complexe GL2Z :

1.1.1 Sources d'émissions du CO₂ :

Le GNL se compose essentiellement de Méthane condensé à l'état liquide (réduction du volume original d'environ 1/ 600). En effet, lorsque ce gaz est refroidi à une température d'environ – 161 °C à la pression atmosphérique.

Le GNL est presque du méthane pur. Les autres composants du GN sont donc séparés lors de l'opération de fractionnement.

Le dioxyde de carbone doit être extrait au préalable, car il endommagerait les unités de liquéfaction en s'y solidifiant. On le considère généralement comme un rejet atmosphérique.

Au cours des différentes étapes de notre stage au niveau du complexe GL2Z on a constaté que le gaz carbonique est parmi les principaux gaz polluants dans le complexe.

Les principales sources d'émissions du CO₂ dans le complexe GL2Z sont :

- La colonne de régénération du solvant riche en gaz carbonique ;
- Les chaudières ;
- Les torches ;

La figure suivante montre ces principales sources :

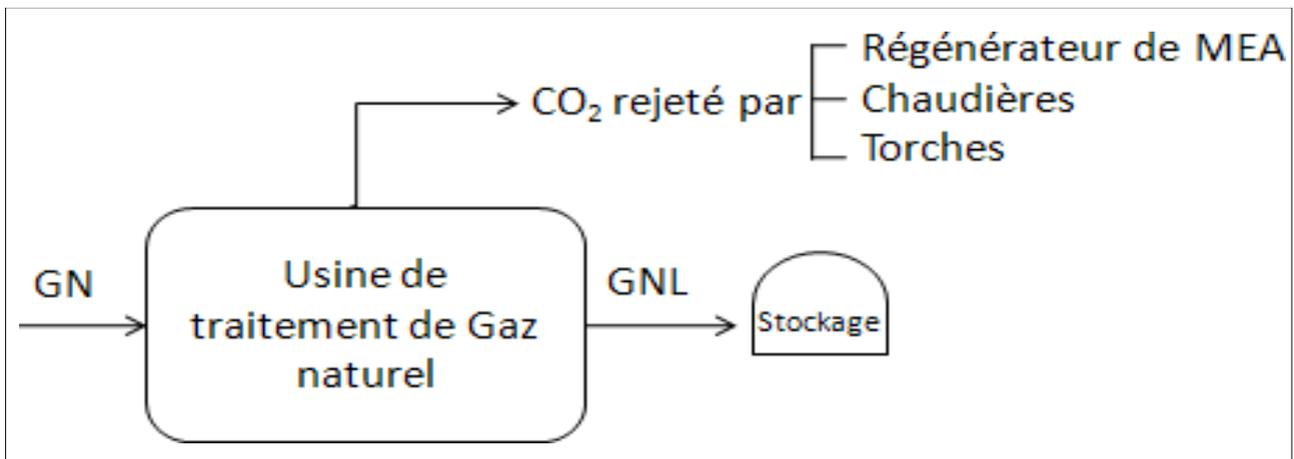
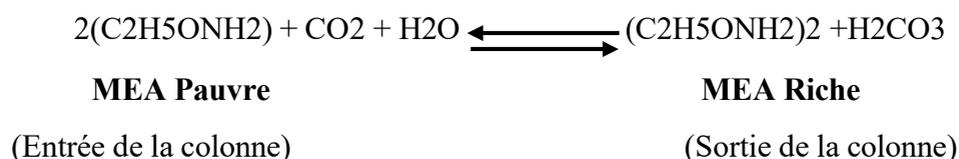


Figure 9: Sources d'émissions de CO₂ dans le complexe GL2Z.

1.1.1.1 Dioxyde de carbone issu de la colonne de régénération du solvant riche :

Le gaz carbonique CO₂ est éliminé du GN selon le procédé classique par absorption / extraction avec une solution d'amine. Cette élimination s'effectue selon la réaction chimique réversible suivante :



Cette réaction d'absorption est réalisée à haute pression et basse température, tandis que la régénération des amines s'effectue à basse pression et haute température (réaction réversible). On utilise une solution aqueuse à 15 % de monoéthanolamine (MEA). Cependant sa capacité d'absorption du CO₂ est relativement faible : l'absorption d'une mole de CO₂ nécessite deux moles d'amine car le carbamate formé par la réaction entre le CO₂ et l'amine est très stable. Un carbamate est un ion contenant un groupement COO⁻. Ce carbamate n'est donc que peu hydrolysé sous forme de bicarbonate.

L'absorption du GN s'effectue au niveau des plateaux par lavage à contre-courant avec la solution aqueuse de MEA régénéré introduite au sommet de la colonne à une température 38 °C et à une pression de 42 bars. La réaction d'absorption du gaz carbonique étant exothermique, une partie de la chaleur de la réaction est évacuée par le gaz décarbonaté qui quitte la colonne à une température de l'ordre de 43 °C.

Le flux de solvant riche en CO₂ est pompé et chauffé dans un échangeur régénérateur, avant d'entrer dans la tour de régénération, par le flux de solvant régénéré. Celui-ci doit en effet être refroidi avant d'entrer dans la partie supérieure de la tour d'absorption. En effet, l'absorption est d'autant plus forte que la température est faible, tandis que la régénération du solvant est d'autant plus importante que la température est élevée.

Dans la tour de régénération, la solution riche en CO₂ est vaporisée dans le bouilleur. Les vapeurs d'eau, de MEA et le CO₂ s'élèvent au-dessus de la zone de vaporisation, et arrivent au niveau de la zone de condensation où l'eau et le MEA se condensent, tandis que le CO₂ reste à l'état gazeux, dissocié du MEA. La solution liquide débarrassée du CO₂ (dans un flash) redescend le long de la tour de régénération, et peut repartir vers l'échangeur croisé pour être refroidie avant son entrée dans la tour d'absorption. Le CO₂ gazeux est rejeté vers l'atmosphère, alors qu'il a plusieurs avantages et utilisations dans différents domaines d'une part, et qui est le principal gaz causé par l'action humaine, ayant des conséquences sur l'effet de serre et les changements climatiques d'autre part.

Le CO₂ rejeté vers l'atmosphère est parmi les principaux polluants dans le complexe GL2Z. Notre étude consiste à estimer les émissions des différentes sources du CO₂, et la comparaison des procédés de captage.

La figure ci-dessous montre le procédé de décarbonatation et de régénération du MEA riche dans le complexe GL2Z.

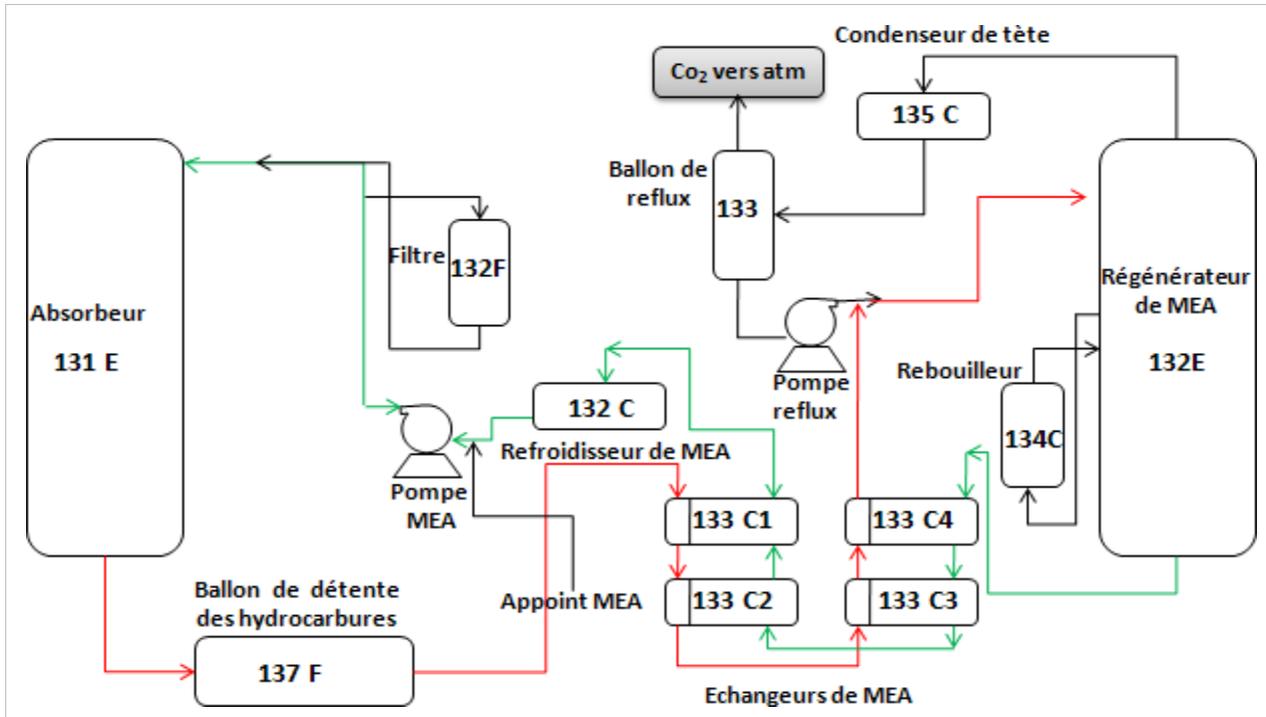


Figure 10: Procédé de décarbonatation et de régénération du MEA riche dans le complexe GL2Z.

1.1.2 Dioxyde de carbone contenu dans les fumées des chaudières :

On utilise les chaudières pour produire de la vapeur nécessaire au fonctionnement du procédé. La source de chaleur est fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon...) ou une résistance électrique.

Le complexe GL2Z est doté de :

- Deux chaudières IHI d'une capacité unitaire de production de 400 t/h 56 t/h de vapeur Surchauffée à 65 bars et 440 °C ;
- Quatre chaudières MHI d'une capacité unitaire de production de 400 t/h de vapeur Surchauffée à 65 bars et 440 °C
- Trois chaudières utilités HP d'une capacité unitaire de production de 91 t/h de vapeur Surchauffée à 65 bars et 440 °C
- Une chaudière utilité BP d'une capacité unitaire de production de 56 t/h de vapeur Surchauffée à 65 bars et 440 °C
- Neuf chaudières process d'une capacité unitaire de production de 136 t/h théoriques de vapeur Surchauffée à 62 bars et 440 °C. La capacité réelle de ces chaudières est de 455 à 90

t/h

Toutes les chaudières de complexe GL2Z sont alimentées soit par le gaz naturel, le fuel gaz ou un mélange des deux produits (fuel gaz à 95 % environ, et GN brut à 5% environ). La combustion de ce combustible est à l'origine d'émission à l'atmosphère des principaux gaz de combustion, et surtout le CO₂.

Réaction de la combustion :

Envisageons la combustion complète d'un hydrocarbure de formule chimique fictive C_xH_y dans l'oxygène : $C_xH_y + (x + \frac{y}{4}) O_2 \longrightarrow xCO_2 + (\frac{y}{2}) H_2O$

Les gaz dégagés lors de la combustion dans les chaudières sont dus à la réaction suivante :



La figure suivante montre un exemple d'une chaudière à tubes d'eau qui fournit un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes / heure, en moyenne et haute pression.

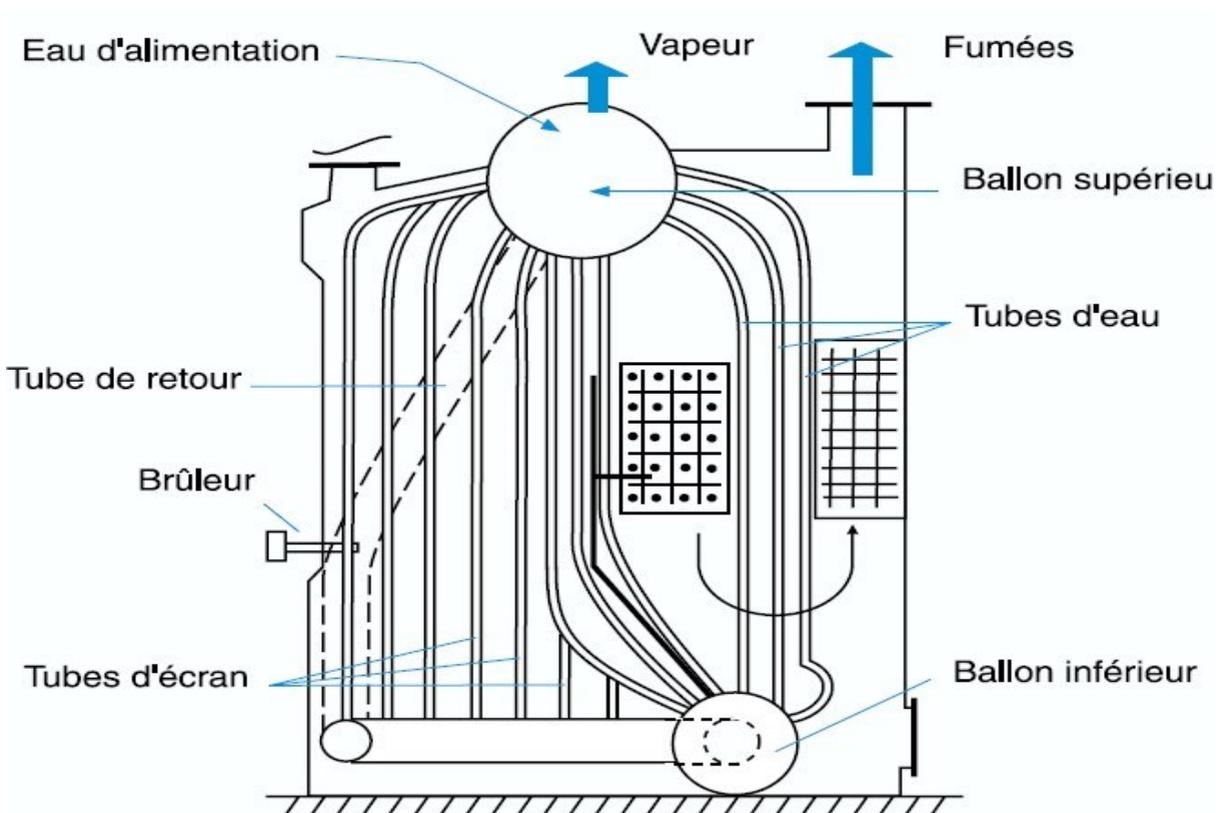


Figure 11: Schéma d'une chaudière à tubes d'eau. [9]

1.1.3 Dioxyde de carbone issu des torches :

Il existe deux manières de torcher les gaz, torcher les gaz durant le fonctionnement normal des unités de production, ou torcher les gaz suite à un dysfonctionnement d'un équipement ou un déclenchement, délestage et redémarrage, dérèglement des boucles de régulation, ou pendant un arrêt.

Parmi les sources des gaz torchés :

a) Gaz torché à partir de l'absorbeur :

Le GN décarbonaté est envoyé vers la torche chaude lorsque la teneur en CO₂ n'est pas inférieure à < 70 ppm.

b) Gaz torché à partir des sécheurs :

Durant la phase de déshydratation, le gaz humide est envoyé vers la torche chaude tant que la teneur en eau est supérieure à 1 ppm.

c) Gaz torché à partir de la tour de lavage :

Les gaz de la tour de lavage sont envoyés vers la torche froide lorsque la teneur en gazoline est supérieure à 0,05 %. Il est à noter que la tour de lavage constitue la source la plus importante des gaz torchés, environ 60 %.

d) Gaz torché à partir de l'échangeur principal et circuits cryogéniques

Au démarrage et avant la stabilisation de l'unité de liquéfaction, 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. Les durées de ces opérations sont dépendantes de l'état de préservation de l'échangeur principal.

e) Gaz torché lors de l'opération de fractionnement

Les quantités torchées sont difficiles à apprécier (dégivrages, démarrages arrêts et stabilisation)

Quelque fois, il y a des pertes dues aux non fermetures des vannes de purges des capacités de liquide et les événements des lignes de vapeurs ne se referment pas complètement et il y a donc passage constant de gaz ou de liquide vers la torche. De plus, lorsque le dégagement des soupapes est rassemblé et acheminé vers la torche.

À travers la figure suivante nous pouvons voir la fumée issue des torches dans le complexe GL2Z.

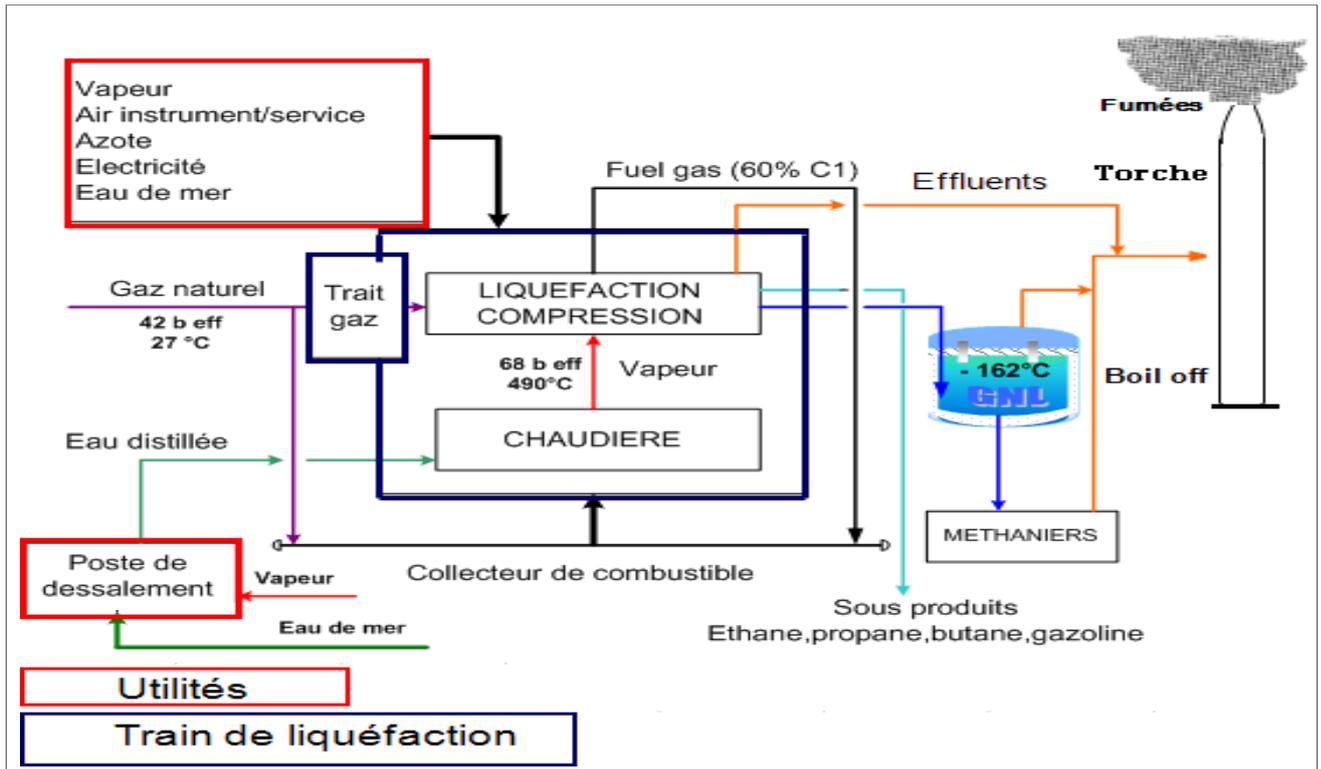


Figure 12: Fumée issue des torches dans le complexe GL2Z. [10]

1.2 Sources d'émissions du CH₄ :

1.2.1 Extraction et production de gaz naturel :

Fuites et pertes lors de l'extraction : Lors de l'extraction du gaz naturel, des fuites de méthane peuvent se produire à partir des puits, des pipelines et des équipements de traitement.

Élimination des gaz non commerciaux : Lorsque le gaz naturel extrait contient des quantités élevées d'autres gaz indésirables, il peut être nécessaire de le brûler ou de le libérer, ce qui entraîne des émissions de méthane.

1.2.2 Transport et distribution du gaz naturel :

Fuites de pipelines : Les pipelines utilisés pour le transport du gaz naturel peuvent présenter des fuites, ce qui conduit à la libération de méthane dans l'atmosphère.

Compression et décompression du gaz : Les processus de compression et de décompression du gaz naturel lors de son transport peuvent également entraîner des fuites de méthane.

Stockage et distribution du gaz naturel liquéfié (GNL) :

Fuites lors de la liquéfaction : Le processus de liquéfaction du gaz naturel pour le transformer en GNL, peuvent entraîner des fuites de méthane.

1.1 Utilisation du gaz naturel :

Combustion incomplète : Lorsque le gaz naturel est brûlé comme combustible, une combustion incomplète peut se produire, ce qui génère des émissions de méthane.

Fuites dans les équipements : Les équipements utilisés pour la combustion du gaz naturel, tels que les chaudières, les fours industriels et les turbines à gaz, peuvent présenter des fuites de méthane.

Pour réduire les émissions de méthane dans l'industrie du gaz naturel, plusieurs mesures peuvent être prises, telles que l'amélioration de la détection et de la réparation des fuites, l'utilisation de technologies de combustion plus efficaces, l'optimisation des processus de production et de transport, et l'adoption de bonnes pratiques environnementales dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement du gaz naturel.

Il est important de noter que les émissions de méthane peuvent varier en fonction des technologies utilisées, des normes de réglementation en place et des pratiques de gestion environnementale des entreprises spécifiques dans l'industrie du gaz naturel

1.2 Source d'émission du N₂O :

Processus de combustion :

Combustion du gaz naturel : Lorsque le gaz naturel est brûlé pour la production d'énergie ou d'autres applications industrielles, il peut y avoir une formation d'oxyde nitreux, en particulier si les températures de combustion sont élevées et si l'azote atmosphérique est présent.

2. Empreinte carbone :

L'empreinte carbone est une mesure de la quantité totale de gaz à effet de serre (GES), exprimée en équivalent CO₂, qui est émise directement ou indirectement par une entité spécifique, telle qu'un individu, une entreprise, un produit ou un événement. Cette mesure vise à évaluer l'impact environnemental des activités humaines en termes de contribution au réchauffement climatique.

La méthode d'empreinte carbone repose généralement sur une approche appelée Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'ACV évalue les émissions de GES tout au long du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'une activité, en tenant compte de plusieurs étapes clés, notamment :

2.1 Extraction et production des matières premières : Cette étape évalue les émissions de GES associées à l'extraction, au traitement et au transport des matières premières utilisées dans la fabrication d'un produit ou la prestation d'un service.

- 2.2 Fabrication et transformation :** Il s'agit de mesurer les émissions de GES générées lors des processus de fabrication, de transformation et d'assemblage des matières premières pour créer un produit fini.
- 2.3 Distribution et transport :** Cette étape évalue les émissions de GES liées à la logistique et au transport des produits depuis les sites de production jusqu'aux points de vente ou aux consommateurs finaux.
- 2.4 Utilisation :** Il s'agit d'estimer les émissions de GES associées à l'utilisation, l'exploitation ou la consommation d'un produit ou d'un service. Par exemple, la consommation d'énergie par un appareil électroménager ou les émissions de GES provenant du carburant utilisé par un véhicule.
- 2.5 Fin de vie :** Cette étape évalue les émissions de GES liées à l'élimination, au recyclage ou au traitement des produits en fin de vie. Cela peut inclure les émissions provenant de l'incinération, de la décomposition des déchets ou des processus de recyclage.

Une fois que les émissions de GES ont été estimées pour chaque étape du cycle de vie, elles sont converties en équivalent CO₂ en utilisant des facteurs d'émission standardisés. Ces facteurs d'émission tiennent compte de la capacité de chaque gaz à effet de serre à contribuer au réchauffement climatique par rapport au CO₂.

3. L'analyse de cycle de vie (ACV) : est une méthodologie utilisée pour évaluer l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, en passant par la production, la distribution, l'utilisation et la gestion des déchets.

L'ACV prend en compte les aspects environnementaux tels que la consommation de ressources naturelles, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que les impacts sur la biodiversité et la santé humaine. Elle permet de quantifier ces impacts et d'identifier les étapes du cycle de vie qui contribuent le plus à l'empreinte environnementale globale du produit.

L'ACV se compose généralement des étapes suivantes :

- 3.1 Définition de l'objectif et du champ d'application :** Cette étape consiste à déterminer clairement l'objectif de l'analyse de cycle de vie, ainsi que les limites du système étudié, c'est-à-dire les frontières du cycle de vie qui seront prises en compte.
- 3.2 Inventaire du cycle de vie :** À cette étape, toutes les données relatives aux flux de matières premières, à l'énergie utilisée, aux émissions atmosphériques et aux déchets

générés tout au long du cycle de vie sont collectées et quantifiées. Cette collecte d'informations peut être réalisée à l'aide de bases de données existantes, de modèles mathématiques ou d'enquêtes sur le terrain.

3.3 Évaluation des impacts : Une fois l'inventaire du cycle de vie établi, les impacts environnementaux potentiels associés à chaque étape du cycle de vie sont évalués. Cela peut être effectué à l'aide de méthodes d'évaluation normalisées telles que l'Analyse du Cycle de Vie Simplifiée (ACVs) ou l'Analyse du Cycle de Vie Sociale (ACVsoc).

3.4 Interprétation des résultats : Les résultats de l'ACV sont interprétés pour identifier les points chauds environnementaux, c'est-à-dire les étapes du cycle de vie qui ont le plus grand impact environnemental. Ces informations peuvent être utilisées pour proposer des améliorations, des alternatives ou des stratégies d'écoconception visant à réduire l'impact environnemental global du produit ou du système étudié.

4. Description de la méthode :

L'approche méthodologique simple la plus générale consiste à combiner les informations sur l'étendue des activités (appelées données sur les activités ou DA) avec les coefficients qui quantifier les émissions ou les absorptions par unité d'activité.

Ceux-ci sont appelés Facteur d'émission (FE), Des lors, l'équation de base est :

$$\text{Emissions} = \text{DA} \times \text{FE}$$

Afin de calculer les émissions totales en équivalent-CO2 pour chaque gaz à effet de serre, il convient de multiplier les résultats obtenus ci-dessus par le « Le pouvoir de réchauffement Globale » (PRG) du gaz concerné.

Les PRG donnés par le 4ème rapport d'évaluation du GIEC) sont donné comme suit :

Tableau 3: les PRG donnés par le 4ème rapport d'évaluation du GIEC.

Désignation	Formule Chimique	PRG
Dioxyde de Carbone	CO2	1
Méthane	CH4	25
Protoxyde d'Azote	N2O	298

$$\text{Emissions Tôt (eq-CO2)} = \text{Emissions CO2} \times 1 + \text{Emissions CH4} \times 25 + \text{Emissions N2O} \times 298$$

5. Choix des Facteurs d'Emission (FE) :

En général, tous les facteurs d'émission (notamment les valeurs du Niveau 1 et) doivent être régulièrement réaffirmés ou actualisés. La fréquence à laquelle ces mises à jour sont réalisées devrait être proportionnelle au rythme auquel les nouvelles technologies, les pratiques et les normes et d'autres facteurs pertinents (par ex, les changements de type d'activités liées au pétrole et au gaz, l'ancienneté des champs d'exploitation et des installations, etc.) pénètrent l'industrie. Dans la mesure où les nouveaux facteurs d'émission élaborés de cette manière représentent des changements réels au sein de l'industrie, ils ne devraient pas être appliqués rétrospectivement dans la série temporelle.

a) Conversion des facteurs d'émissions sur des bases calorifiques inférieures vers des facteurs d'émission pour des bases calorifiques supérieures :

L'ensemble des facteurs d'émission donnés par le GIEC sont estimés sur des bases calorifiques nettes ou inférieures. Concernant les hydrocarbures algériens, les pouvoirs calorifiques donnés par la Décision n°272 du 27 décembre 2012 sont sur une base calorifique supérieure et il est par conséquent nécessaire, soit de convertir les pouvoirs calorifiques en PCI, soit de convertir les facteurs d'émissions à utiliser pour l'estimation des émissions (cas des émissions dues à la combustion) comme suit :

Pour les Hydrocarbures liquides et solides :

$$FE_{PCS} = FE_{PCI} \times \left(\frac{1-0,05}{1} \right)$$

Pour les Hydrocarbures gazeux :

$$FE_{PCS} = FE_{PCI} \times \left(\frac{1-0,1}{1} \right)$$

b) -Facteurs d'émission pour les émissions fugitives :

La fiabilité des facteurs de Niveau 1 présentés par le GIEC pour les systèmes liés au pétrole et au gaz, dépendra de la taille de l'industrie pétrolière et gazifière d'un pays. Plus l'industrie sera importante, plus la contribution de ses émissions fugitives sera considérable et plus les facteurs d'émission présentés au Niveau 1 seront fiables. « Fugitives » exprime toutes les émissions fugitives notamment celles imputables aux fuites fugitives des équipements, aux pertes de stockage, au recours au gaz naturel pour approvisionner les appareils fonctionnant avec du gaz (par ex., les circuits fermés de contrôle d'instrument, les pompes à injection chimique, les démarreurs à air comprimé, etc.), et la ventilation de dégagement gazeux de distillation imputables aux déshumidificateurs de glycol.

c) -Facteurs d'émissions pour le torchage (brûlage) :

« Brûlage » exprime les émissions imputables à tous les systèmes de brûlage qu'ils soient continus ou d'urgence. Les taux spécifiques de brûlage peuvent varier sensiblement entre les pays. Lorsqu'on connaît les volumes effectifs brûlés, on devrait les utiliser pour déterminer les émissions de brûlage au lieu d'appliquer les facteurs d'émission présentés aux taux de production. Les facteurs d'émission pour estimer directement les émissions de CH₄, CO₂ et N₂O à partir des volumes brûlés déclarés sont 0,012 et 2.0 et 0,000023 Gg, respectivement pour 106 m³ de gaz brûlés, basés sur une efficacité de brûlage de 98% et sur une analyse traditionnelle de gaz sur une usine de traitement de gaz (soit 91,9% CH₄, 0,58% CO₂, 0,68% N₂ et ,84% d'hydrocarbures non méthane par volume).

d) Facteurs d'émissions pour la ventilation :

« Ventilation » exprime la ventilation de gaz résiduels associés et de gaz de solution imputables aux installations de production pétrolière et les volumes de gaz résiduels imputables aux activités d'explosions, de purge et de secours d'urgence au sein des installations gazifières. Lorsqu'on connaît les volumes ventilés effectifs, il faut les utiliser pour déterminer les émissions de ventilation plutôt que d'appliquer les facteurs d'émission présentés aux taux de production. Les facteurs d'émission pour estimer directement les émissions de CH₄ et de CO₂ à partir des volumes ventilés déclarés sont 0,66 et 0,0049 Gg, respectivement, pour 106 m³ de gaz ventilé sur la base d'une analyse traditionnelle de gaz sur les systèmes de transmission et de distribution de gaz (soit 97.3% CH₄, 0.26% CO₂, 1.7% N₂ et ,74% d'hydrocarbure non - méthane par volume)

6. Le Pouvoir Calorifique :

La chaleur produite par la combustion d'une masse de 1 kg de combustible est appelée « le pouvoir calorifique » celle-ci est exprimé en MJ/Kg, se mesure de deux façons le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le pouvoir calorifique d'un combustible (ou d'un carburant) est l'énergie (par unité de masse) libérée par sa combustion à pression constante et dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire 0°C et 1013 mbar).

6.1 Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) :

Le PCI c'est l'énergie thermique libérée lors de la combustion complète d'une unité de combustible, à l'exclusion de la chaleur latente issue de la vapeur d'eau.

6.2 Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) :

Le PCS c'est l'énergie thermique (par unité de masse) libérée lors de la combustion complète d'une unité de combustible, celle-ci comprend : la chaleur dégagée par la combustion appelée « **chaleur sensible** » et la chaleur issue de la vapeur d'eau (fumé) produite par la combustion, condensée et ramené à l'état liquide appelé « **chaleur latente** ».

6.3 Passage du PCS au PCI :

Tous les combustibles fossiles comprennent, en quantités variables, du carbone et de l'hydrogène. Leur combustion produit donc toujours du CO₂ et de la vapeur d'eau. Du fait de la présence de vapeur d'eau, il existe deux manières de mesurer l'énergie disponible par unité de combustible : le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur, exprimée en kWh ou MJ, qui est dégagée par la combustion complète d'un m³ de gaz dans l'air à une pression constante de 1,01325 bar ; le gaz et l'air étant à une température initiale de 0°C et tous les produits de combustion étant ramenés à la température de 0°C.

L'eau pouvant se trouver sous forme gazeuse ou sous forme liquide au voisinage du zéro, il existe en fait 2 pouvoirs calorifiques selon l'état final de l'eau résultant de la combustion :

- Lorsque l'eau formée pendant la combustion est conservée à l'état gazeux (vapeur), la quantité de chaleur mesurée correspond au Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).

- Lorsque l'eau formée pendant la combustion est ramenée à l'état liquide (les autres produits restant à l'état gazeux), la quantité de chaleur mesurée correspond au Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS). La distinction PCS/PCI réside donc dans le fait que le PCS intègre l'énergie (appelée chaleur latente) libérée par la condensation de l'eau après la combustion tandis que l'autre, le PCI, ne l'intègre pas. Pour la majorité des chaudières installées, les gaz d'échappement repartent sans que la vapeur d'eau n'ait condensé, car l'exploitation de la condensation (dans des chaudières éponymes) est relativement récente. De la sorte, lorsqu'il n'est pas précisé dans la bibliographie si les valeurs disponibles sont exprimées en PCS ou PCI, elles sont réputées être des valeurs PCI par défaut. Bien évidemment ce point a été vérifié chaque fois que possible. Le passage du PCI au PCS (ou inversement) dépend de la part de la vapeur d'eau dans les produits de combustion, donc de la proportion d'hydrogène dans le combustible ; il n'est donc pas constant pour tous les combustibles.

Tableau 4: Rapport PCS/PCI pour les combustibles liquides ou gazeux

Combustible liquide ou gazeux	Rapport PCS/PCI
Gaz Naturel	1.11
GPL	1.09
Essence	1.08
Diesel, fioul domestique	1.07
Fioul lourd	1.06
Charbon	1.05

7. Potentiel de réchauffement mondial (PRG ou GWP en anglais) :

Indice, décrivant les caractéristiques de radiation de gaz à effet de serre bien mélangés, représentant l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le rayonnement infrarouge sortant. Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de carbon

8. Application de la méthode :

Combustion stationnaire :

Tableau 5: Consommation de gaz naturel par les chaudières au niveau des allumeurs pendant l'année 2022.

Mois	GN (CM ³ 10 ³)
Janv	839.8
Févr	1073.1
Mars	1146.3
Avr	1866.2
Mai	1446.3
Juin	1539.6
Juil	2029.5
Aout	2169.5
Sept	1959.6
Oct	1446.3
Nov	1399.7
Déc	1633
Total	18849

Pour la comptabilisation de la consommation des équipements en GN avec les facteurs d'émission, on convertit en NM3, sachant que :

$$\text{Consommation GN (CM3 103)} = [(\text{consommation GN (NM3)} \times 1,069)] / 1000$$

$$\text{Consommation GN (NM3)} = [(\text{consommation GN (CM3 103)} \times 1000)] / 1,069$$

Application Numérique :

$$\text{Consommation GN (NM3)} = [(18849 \times 1000)] / 1,069$$

$$\text{Consommation GN (NM3)} = \mathbf{17632366.7 \text{ NM}^3}$$

La Consommation des chaudières au niveau des allumeurs en GN de l'année 2022 : **17632366.7 NM³**

Pouvoir calorifique inférieur du GN : **4.48 x 10⁻⁵ Tj/Kg**

Facteurs d'émissions du GN : **56100 Kg/Tj**

Tableau 6: Les facteurs d'émissions des combustibles GN par défaut donnés par le GIEC pour la combustion stationnaire dans les industries Energétiques.

Combustible	Gaz Naturel		
	CO2	CH4	N2O
GES			
Valeur	56100	1	0,1
Unité	KG/TJ	KG/TJ	KG/TJ

Pour trouver la quantité de CO2 émise en Tonne on multiplie le résultat par la masse volumique.

$$\text{Masse volumique} = \mathbf{0.0008 \text{ Tonnes/NM}^3}$$

• Calcul d'émission CO₂ :



$$E \text{ CO}_2 = \text{Cons (GN)} \times \text{FE} \times \text{PCI} \times f$$



$$E \text{ CO}_2 = 17632366.7 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 56100 \times 0.0008$$

On obtient:

$$E_{CO_2} = 35514.02 \text{ Tonnes /an}$$

- Calcul d'émission CH₄:

$$\longrightarrow E_{CH_4} = \text{Cons (GN)} \times FE \times PCI \times f$$

$$\longrightarrow E_{CH_4} = 17632366.7 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 1 \times 0.0008$$

On obtient:

$$E_{CH_4} = 0.63304 \text{ Tonnes /an}$$

- Calcul d'émission N₂O:

$$\longrightarrow E_{N_2O} = 17632366.7 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 0,1 \times 0.0008$$

On obtient :

$$E_{N_2O} = 0.063304 \text{ Tonnes /an}$$

Calcul d'émission totale en Eq CO₂ :

$$\longrightarrow \text{Emission totale} = (35514.02 \times 1) + (0,63304 \times 25) + (0.063304 \times 298)$$

On aura :

$$\text{Emission totale} = 35534.47 \text{ EqCO}_2 \text{ /an}$$

Tableau 7: Consommation de gaz naturel par les chaudières au niveau de la chambre de combustion pendant l'année 2022.

Mois	GN (CM ³ 10 ³)
Janv	38199.3
Févr	28840.9
Mars	51792
Avr	70971,4
Mai	54286,1
Juin	63231,8
Juil	75896,1
Aout	79154,2
Sept	84096,6
Oct	87683,9

Nov	87683,9
Déc	70121,8
Total	769942,5

Application Numérique :

$$\text{Consommation GN (NM3)} = [(769942,5 \times 1000)] / 1,069$$

$$\text{Consommation GN (NM3)} = 720245557 \text{ NM}^3$$

La Consommation des chaudières au niveau de la chambre de combustion en GN de l'année 2022 : 720245557 NM³

• Calcul d'émission CO₂ :

$$\longrightarrow E_{\text{CO}_2} = 720245557 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 56100 \times 0.0008$$

On obtient:

$$E_{\text{CO}_2} = 1450664.35 \text{ Tonnes /an}$$

• Calcul d'émission CH₄ :

$$\longrightarrow E_{\text{CH}_4} = 720245557 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 1 \times 0.0008$$

On obtient :

$$E_{\text{CH}_4} = 25.8136 \text{ Tonnes /an}$$

• Calcul d'émission N₂O :

$$\longrightarrow E_{\text{N}_2\text{O}} = 720245557 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 0,1 \times 0.0008$$

On obtient :

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 2.58136 \text{ Tonnes /an}$$

• Calcul d'émission totale en EqCO₂ :

$$\longrightarrow \text{Emission totale} = (1450664.35 \times 1) + (25.8136 \times 25) + (2.58136 \times 298)$$

On aura :

$$\text{Emission totale} = 1452078.94 \text{ Eq Co}_2/\text{an}$$

Emissions Fugitives :

Tableau 8: Volume de gaz torchés pendant l'année 2022.

Mois	10 ³ Sm ³ éq GN	10 ³ Cm ³ éq GN	10 ³ en thermie
Janv	6761.2	6850.8	63712.4
Fevr	11297	11447.2	106458.7
Mars	22985.3	23289.9	216595.6
Avril	8789.4	8905.9	82824.5
Mai	6699.3	6788.1	63129.1
Juin	12973.8	13145.7	122254.9
Juillet	9060,9	9181.0	85382.9
Aout	8200.9	8309.6	77278.9
Sept	5831.8	5909.1	54954.7
Oct	4234.9	4291.0	39906.5
Nov	3216.4	3259.0	30308.9
Dec	10602.7	10743.2	99911.6
Totale	110654.1	112120.3	1042718.8

Les formules utilisées :

$$10^3 \text{ Cm}^3 \text{ éq GN} = 10^3 \text{ Sm}^3 \text{ éq GN} \times 1,01325$$

$$10^3 \text{ en thermie} = 10^3 \text{ Cm}^3 \text{ éq GN} \times 9.3$$

PCS de GN est de 9,3 TH/Cm³

Volume du gaz torché en NM³ :

$$\text{Consommation GN (NM}^3\text{)} = [(112120,3 \times 1000)] / 1,069$$

$$\text{Consommation GN (NM}^3\text{)} = 104883349 \text{ NM}^3$$

• Calcul d'émission CO₂:



$$E \text{ CO}_2 = 104883349 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 56100 \times 0.0008$$

On obtient:

$$E \text{ CO}_2 = 210880.979 \text{ Tonnes /an}$$

Calcul d'émission CH₄ :

→ $E_{CH_4} = 104883349 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 1 \times 0.0008$

On obtient:

$E_{CH_4} = 3.759 \text{ Tonnes /an}$

• Calcul d'émission N₂O :

→ $E_{N_2O} = 104883349 \times 4.48 \times 10^{-5} \times 0,1 \times 0.0008$

On obtient :

$E_{N_2O} = 0.3759 \text{ Tonnes /an}$

• Calcul d'émission totale en EqCO₂ :

→ Emission totale = [(210880.979x1) +(3.759x25) +(0.3759x298)]

On aura :

Emission totale=211086.972 eqCO₂

Tableau 9: Volume de gaz ventilés (CO₂) pendant l'année 2022.

Mois	103 Sm ³ CO ₂
Janv	570.1
Fevr	421.1
Mars	758.8
Avril	1205.2
Mai	939.5
Juin	912.8
Juillet	1254.3
Aout	1340.5
Sept	1219.5
Oct	1366.1
Nov	977.7
Dec	8770.6
Totale	11836.0

Volume du gaz ventilé en CM³ :

103 Cm³ équ GN=11836 X 1.01325

Volume du gaz (CM³) = 11992.827 CM³

Volume du gaz ventilé en NM3 :

Volume du gaz (NM3) = 11218734.3 NM3

Volume du gaz ventilé en TONNE :

Volume du gaz (tonne) = 8974.98 tonne

Calcul d'émission totale en EqCO2 :

➔ **Emission totale = 8974.98 x 1**

On aura :

Emission totale = 8974.98 eqCO2

Combustion mobile :

Tableau 10: Consommation d'essence pendant l'année 2022.

Mois	Tonnes
Janv	4.5
Févr	4.7
Mars	4.7
Avr	4.7
Mai	3.4
Juin	4.8
Juil	4.2
Aout	6.0
Sept	4.3
Oct	3.8
Nov	4.4
Déc	4.3
Total	53.8

Calcul du PCS et PCI d'essence Tj/Kg :

Essence : —————> PCS (essence) = 44.75 GJ / 932NM3= 48015021.46 J / NM3

Avec : $\rho=0.8 \text{ Kg/ NM3}$ et $1\text{GJ}=10^9 \text{ J}$

—————> PCS (essence) =48015021.46 / 0.8

—————> PCS (essence) = 60018776.82J/Kg

Avec : $1\text{J}= 10^{-12} \text{ TJ}$

—————> **PCS (essence) = 6.001877x 10⁻⁵ TJ/Kg**

PCI (essence) = 6.001877x 10⁻⁵ x 0.9

—————> **PCI (essence) = 5.4 x 10⁻⁵ TJ/Kg**

• Calcul d'émission CO2 :

Facteurs d'émissions d'essence :69300

—————> **E CO₂ = Cons x FE x PCI**

—————> **E CO₂ = 53.8 x 69300 x 5.4x10⁻⁵**

On obtient:

E CO₂ = 201.33Tonnes /an

• Calcul d'émission CH4 :

Facteurs d'émissions d'essence :3

—————> **E CH₄ = Cons x FE x PCI**

—————> **E CH₄ = 53.8 x 3 x 5.4x10⁻⁵**

On obtient :

E CH₄= 0.00871Tonnes /an

• Calcul d'émission N2O :

Facteurs d'émissions d'essence :0.6

—————> **E N₂O= Cons x FE x PCI**

→ $E_{N_2O} = 53.8 \times 0.6 \times 5.4 \times 10^{-5}$

On obtient :

$E_{N_2O} = 0.00174 \text{ Tonnes /an}$

Calcul d'émission totale en EqCO₂ :

→ Emission totale = [(201.33x1) +(0.00871x25) +(0.00174x298)]

On aura :

Emission totale=202.06627 eqCO₂

Tableau 11: Consommation de gas-oil pendant l'année 2022.

Mois	Tonnes
Janv	1.9
Fevr	1.8
Mars	1.9
Avril	1.9
Mai	1.6
Juin	1.5
Juillet	1.6
Aout	1.6
Sept	1.8
Oct	1.8
Nov	1.8
Dec	1.8
Totale	21.0

Calcul du PCS et PCI du gas-oil Tj/Kg :

Gas-oil : → PCS (gas-oil) = 43.38 GJ / 932NM³= 46545064.38 J / NM³

→ PCS (gas-oil) =46545064.38 / 0.8

→ PCS (gas-oil) =58181330.48 J/Kg

→ **PCS (gas-oil) = 5.818133x 10⁻⁵ TJ/Kg**

PCI (gas-oil) = 6.001877x 10⁻⁵ x 0.9

$$\text{PCI (gas-oil)} = 5.24 \times 10^{-5} \text{ TJ/Kg}$$

• Calcul d'émission CO₂ :

Facteurs d'émissions du Gas-oil : 74100

$$\longrightarrow E_{\text{CO}_2} = 21 \times 74100 \times 5.24 \times 10^{-5}$$

On obtient

$$E_{\text{CO}_2} = 81.53964 \text{ Tonnes /an}$$

• Calcul d'émission CH₄:

Facteurs d'émissions du Gas-oil : 3

$$\longrightarrow E_{\text{CH}_4} = 21 \times 3 \times 5.24 \times 10^{-5}$$

On obtient:

$$E_{\text{CH}_4} = 0.0033012 \text{ Tonnes/an}$$

• Calcul d'émission N₂O :

Facteurs d'émissions du Gas-oil : 0.6

$$\longrightarrow E_{\text{N}_2\text{O}} = 21 \times 0.6 \times 5.24 \times 10^{-5}$$

On obtient :

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 0.00066024 \text{ Tonnes/an}$$

Calcul d'émission totale en EqCO₂ :

$$\longrightarrow \text{Emission totale} = [(81.53964 \times 1) + (0.0033012 \times 25) + (0.00066024 \times 298)]$$

On aura :

$$\text{Emission totale} = 81.8189 \text{ eqCO}_2$$

Tableau 12: Quantité des gaz émis par type de gaz

Gaz émis	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Quantité	1706317.2	30.218	3.023

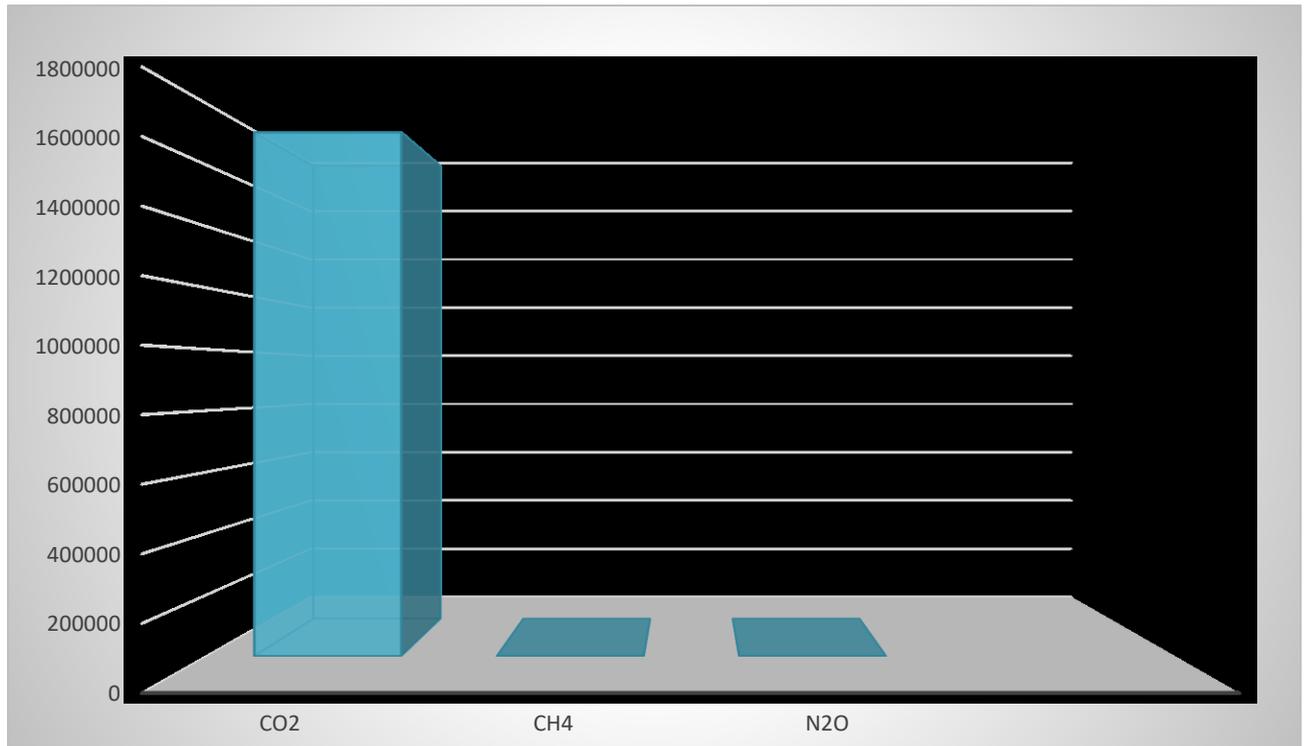


Figure 13: présentation de la quantité du gaz émis par type de gaz

Tableau 13: Quantité du gaz émis par équipement en eq CO2.

Équipement	Les allumeurs	La chambre de combustion	Gaz torché	Combustion mobile	Gaz ventilé
Quantité de CO2 émis	35534.47	1452078.94	211086.972	283.88517	8974.98

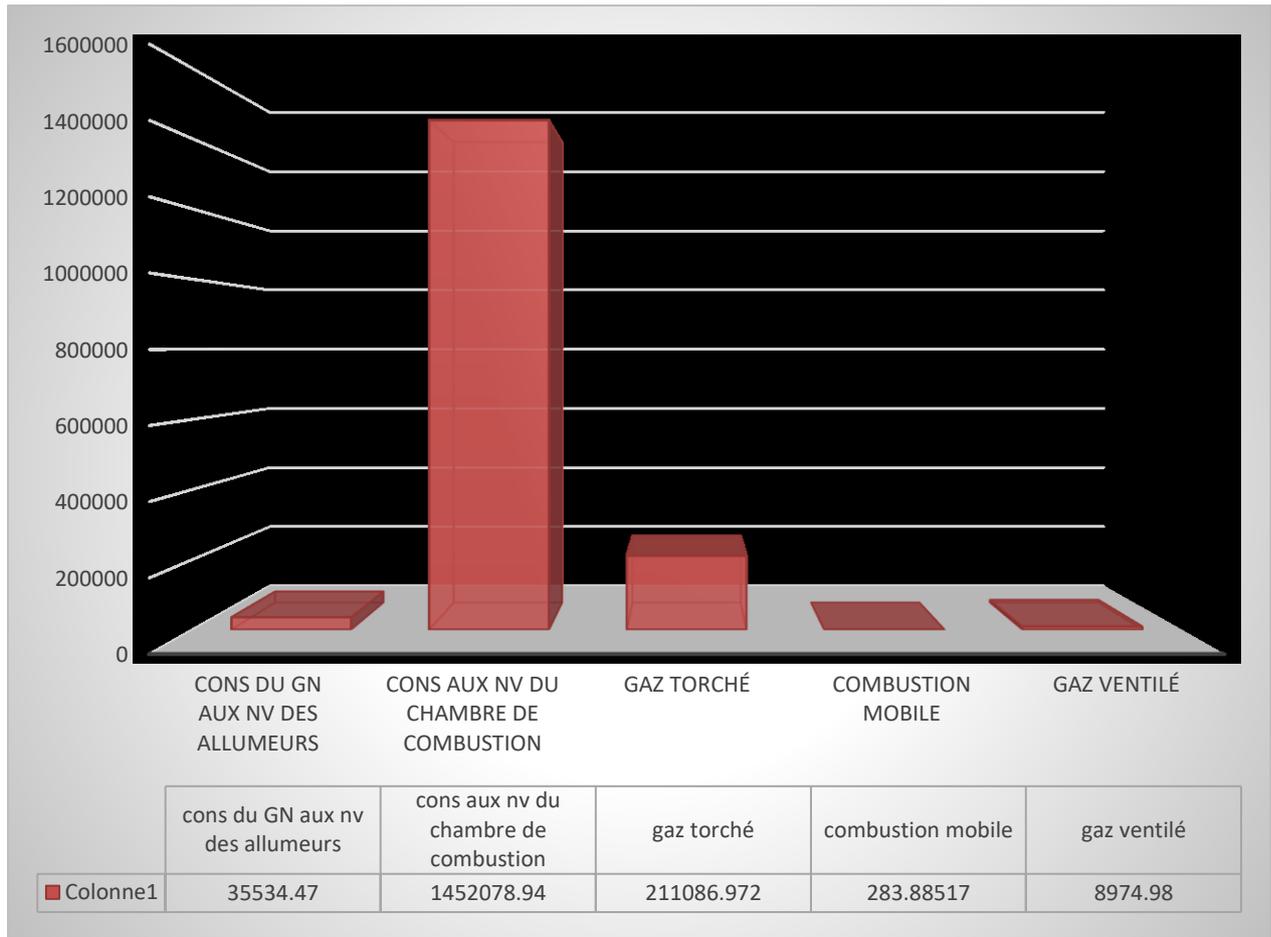


Figure 14: présentation de la quantité émise par équipement.

Ces deux graphiques montrent que les émissions de CH₄ et de N₂O liées à la combustion sont quasiment inexistantes par rapport au CO₂. Par conséquent, nous pouvons conclure que la combustion est l'activité qui produit le plus de gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone, qui a le potentiel de réchauffement climatique le plus élevé.

La chambre de combustion dans la chaudière est la plus importante source d'émissions de GES dans le complexe GNL2/Z.

9. Les avantages et les inconvénients de la méthode :

La méthode empreinte carbone est un outil qui permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à une activité, un produit ou une organisation. Elle vise à quantifier et à prendre conscience de l'impact climatique de nos actions et de nos choix. Cependant, comme toute méthode, elle présente à la fois des avantages et des inconvénients.

9.1 .Avantages de la méthode de l'empreinte carbone :

1. Sensibilisation et responsabilisation : L'empreinte carbone permet de sensibiliser les individus, les entreprises et les gouvernements à l'importance des émissions de GES et à leur

contribution au réchauffement climatique. Elle favorise une prise de conscience collective et une responsabilisation des acteurs.

2. Mesure de l'impact : La méthode de l'empreinte carbone fournit une mesure quantitative de l'impact environnemental d'une activité ou d'un produit spécifique. Cela permet d'identifier les sources les plus importantes d'émissions de GES et de prendre des mesures ciblées pour les réduire.

3. Comparabilité et standardisation : La méthode de l'empreinte carbone offre une approche standardisée pour évaluer les émissions de GES. Cela facilite la comparaison entre différentes activités, produits ou organisations, ce qui peut aider à identifier les meilleures pratiques et à promouvoir la transparence.

4. Incitation à l'innovation : En quantifiant les émissions de GES, l'empreinte carbone encourage l'innovation et le développement de technologies et de pratiques plus durables. Elle stimule la recherche de solutions plus propres et favorise la transition vers une économie à faible émission de carbone.

5. La méthode est utilisée pour estimer tous les gaz qui sont couverts par le référentiel (CO₂, CH₄, N₂O)

9.2.Inconvénients de la méthode de l'empreinte carbone :

1. Simplification de la complexité : L'empreinte carbone repose sur des modèles et des approximations qui peuvent simplifier la réalité complexe des émissions de GES. Il peut y avoir des incertitudes et des marges d'erreur associées aux calculs, en fonction des données disponibles et des hypothèses faites.

2. Limitation du périmètre : L'empreinte carbone se concentre principalement sur les émissions directes et indirectes de GES, mais elle peut ne pas tenir compte de tous les aspects environnementaux et sociaux liés à une activité ou à un produit spécifique. Il est important de compléter l'empreinte carbone par d'autres méthodes et outils d'évaluation pour une vision plus complète.

3. Défis de collecte des données : La collecte de données précises et fiables peut être un défi, en particulier pour les organisations qui ont des chaînes d'approvisionnement complexes ou pour les activités qui ne disposent pas de systèmes de suivi adéquats. Cela peut entraîner des estimations approximatives ou des lacunes dans les résultats.

4. Les facteurs d'émission utilisés par le référentiel sont basés sur le type de combustible au combustible sans prendre en considération la différence des conditions d'exploitation entre les différentes installations où ils sont utilisés.

5. Teneur en Carbone et pouvoirs calorifiques nets : L'incertitude associée à la teneur en carbone et les pouvoirs calorifiques nets résulte de deux éléments principaux, l'exactitude avec laquelle les valeurs sont mesurées et la variabilité de la source d'approvisionnement du combustible et la qualité de l'échantillonnage des approvisionnements disponibles.

10. Réduction des émissions de CO₂ et les procédés du captage :

Les principales sources d'émissions de dioxyde de carbone dans les pays développés sont la combustion des combustibles fossiles pour le chauffage domestique, pour la production d'électricité et d'énergie mécanique, la combustion de carburants pour les transports.

Dans le but de stabiliser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, plusieurs mesures simultanées de réduction des émissions de CO₂ à partir de la production d'énergie doivent être mises en œuvre.

Pour atteindre des objectifs correspondants à la réduction et la stabilisation des émissions de CO₂, il faudra agir sur deux leviers en même temps, à savoir :

- Trouver des méthodes qui font appel à l'utilisation rationnelle de l'énergie, au développement des énergies moins fortement émettrices ou qui fonctionnent sans émission de CO₂, telles que les énergies renouvelables ou l'énergie nucléaire.
- Du côté de la demande, la réduction de la demande, y compris la réduction de l'intensité énergétique de la consommation des procédés et appareils divers ;
- Du côté de la production, comme on peut prévoir une utilisation importante des combustibles fossiles au 21^{ème} siècle, il faudra capturer le CO₂ dans les fumées des installations industrielles et/ou mettre en œuvre de nouveaux concepts de systèmes énergétiques à émission nulle de CO₂ et la séquestration à long terme de celui-ci. Ceci est d'autant plus vrai que la part de l'énergie nucléaire diminue.

Stabiliser la teneur en CO₂ de l'atmosphère en même temps que le flux d'émission à leurs valeurs actuelles signifie donc de le capturer et le stocker des milliards de tonnes de CO₂ par an. [11]

11. Procédés du captage de CO₂ :

La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre a motivé de nombreuses recherches sur les procédés de captage du CO₂, qui constituent la partie la plus pénalisante en terme énergétique de la chaîne captage-transport-stockage.

La séparation du CO₂ des autres constituants présents dans les fumées (azote, argon et oxygène) est nécessaire pour deux raisons majeures :

- Limiter la consommation d'énergie lors de la compression du CO₂ avant le transport
- Limiter la quantité de gaz injecté dans le lieu de stockage.

Trois concepts majeurs liés à la récupération du CO₂ se démarquent :

- Le captage du CO₂ en post-combustion à partir des fumées grâce à un solvant chimique.
- L'oxy-combustion qui consiste à brûler le combustible avec de l'oxygène séparé préalablement de l'azote de l'air. Ce procédé permet de concentrer le CO₂ dans les fumées et d'en faciliter la récupération.
- La décarbonisation du combustible : conversion en gaz de synthèse (H₂ + CO) suivi d'une conversion du CO en CO₂ dans un réacteur shift. Le captage du CO₂ s'effectue en précombustion, c'est à dire en amont du système de production d'électricité.

La première approche est logiquement de chercher à diminuer la production de CO₂ en diminuant la consommation d'énergie. Cette recherche d'une meilleure efficacité énergétique est contrebalancée non seulement le cas échéant par l'accroissement d'activité économique, mais aussi par certaines demandes sociétales (par exemple, de climatisation, de sécurité...). D'autres moyens consistent à substituer des combustibles (substitution du charbon par du gaz naturel, par du nucléaire, par de la biomasse) et à développer les sources renouvelables.

Le captage de CO₂ à l'émission est une approche fondamentalement différente. Il faut peut-être la considérer comme une "roue de secours" permettant de gagner du temps pour mettre en place des mesures plus en amont. Si toutefois on disposait de solutions de stockage définitif, du moins à très long terme, le statut de cette approche pourrait cesser d'être temporaire. D'où de nombreuses études sur le stockage en aquifère profond, ou dans des gisements de pétrole ou de gaz plus ou moins épuisés.

Piéger le CO₂ à sa source nécessite de le séparer des autres constituants (vapeur d'eau, azote, soufre) issus des processus de combustion industriels d'hydrocarbures, de charbon, de GN ou de biomasse. Trois technologies paraissent, à l'heure actuelle, les plus propices pour y parvenir. Elles sont développées principalement dans les régions où se déroulent également les expérimentations de stockage géologique : États-Unis, Japon, l'Europe, et même dans notre pays.

En Algérie, ces procédés ne sont pas encore appliqués, mais il existe un site de séquestration

au niveau de champs gazier de Krechba à In Salah, La séquestration de CO₂ est une opération, réalisable, mais coûteuse sur le plan énergétique et financier, ce qui influe sur le prix du produit fini GNL.

Ce projet permet d'étudier le stockage dans un aquifère salin, mais cette fois sur terre, tous les ans, 1,2 million de tonnes de CO₂, extraites du gaz naturel puisé sur le site, sont réinjectées dans un aquifère souterrain. [12]

1 1 . 1 Captage du CO₂ en postcombustion :

Le captage en post-combustion est une option envisageable à court terme. Le lavage de gaz par un solvant chimique ou physique est utilisé depuis de nombreuses années pour la production d'ammoniaque et la purification du gaz naturel. Un procédé de captage post-combustion peut être mis en application sur des centrales existantes sans modifications majeures du système de production électrique. L'objectif du captage du CO₂ en post-combustion est de récupérer le CO₂ présent dans les fumées en sortie de chaudière. Le principe repose sur l'utilisation de deux colonnes : une colonne d'absorption permettant de séparer le CO₂ des autres constituants gazeux à l'aide d'un solvant et une colonne de régénération permettant de récupérer le CO₂ sous forme gazeuse et de régénérer le solvant. Les solvants chimiques permettent, quant à eux, une bonne séparation du CO₂ même à faible pression partielle. Le CO₂ sous forme gazeuse se solubilise dans le solvant puis réagit avec une autre molécule (amine, carbonate de potassium...).

La réaction chimique permet de limiter la présence du CO₂ sous forme moléculaire dans le 23 solvant et donc de diminuer la pression partielle en CO₂ à l'équilibre. Cela permet une séparation du CO₂ même à faible pression partielle.

L'absorption chimique du CO₂ est basée sur la réversibilité de la réaction chimique par apport de puissance thermique. Les solvants chimiques sont sélectifs par rapport aux gaz inertes tels que l'azote et permettent de récupérer jusqu'à 95% et plus du CO₂ présent dans les fumées tout en ne contenant que des traces des autres composés gazeux.

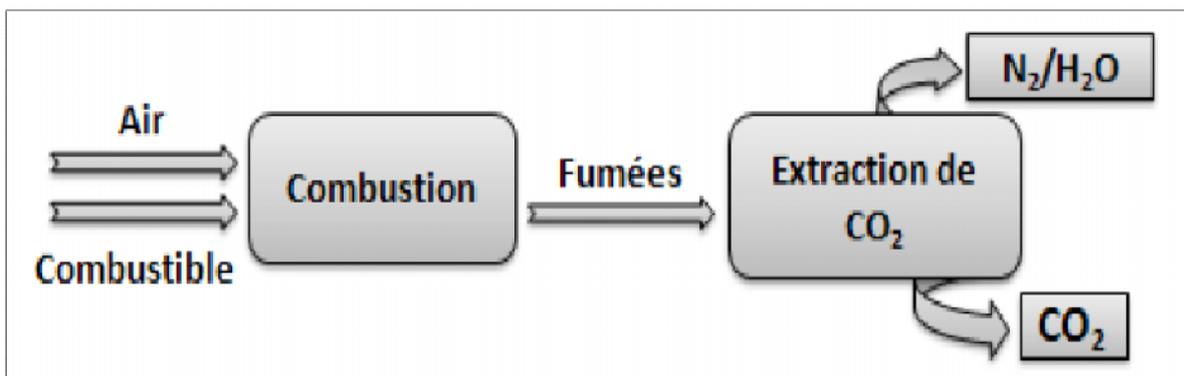


Figure 15: Captage postcombustion. [11]

11.2 Captage par oxycombustion :

Quand un carburant fossile (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) est brûlé dans l'air, la

fraction du CO₂ dans le gaz produit est de 3 -15%, en fonction du contenu en élément carbone du carburant et de la quantité d'air supplémentaire nécessaire pour le procédé de combustion.

L'oxycombustion n'est pas à proprement parler un captage du CO₂. La question est ici réglée à l'entrée et non pas à la sortie, il s'agit de produire une fumée concentrée à 90 % de CO₂ en réalisant une combustion à l'oxygène pur, ce dernier sert directement de comburant et il n'y aura plus d'azote à la « cheminée ». Donc, la combustion se fait en une seule étape, dans une atmosphère contenant uniquement de l'oxygène et non pas de l'air (oxygène + azote) comme dans les procédés classiques. La fumée produite est alors très concentrée en CO₂, comme il est mentionné en haut, ce qui facilite sa récupération, mais il faut encore les purifier et compresser le flux de CO₂ final. Etant donné la grande concentration en CO₂, un procédé frigorifique fonctionnant aux alentours de 223 °K est tout indiqué pour séparer le CO₂ des gaz non-condensables à cette température tels que l'argon, l'oxygène ou encore l'azote.

Cependant, la séparation de l'oxygène de l'air obtenue principalement par la voie cryogénique est coûteuse et consommatrice d'énergie.

L'oxycombustion est particulièrement adaptée à une remise à niveau d'une installation existante. [8]

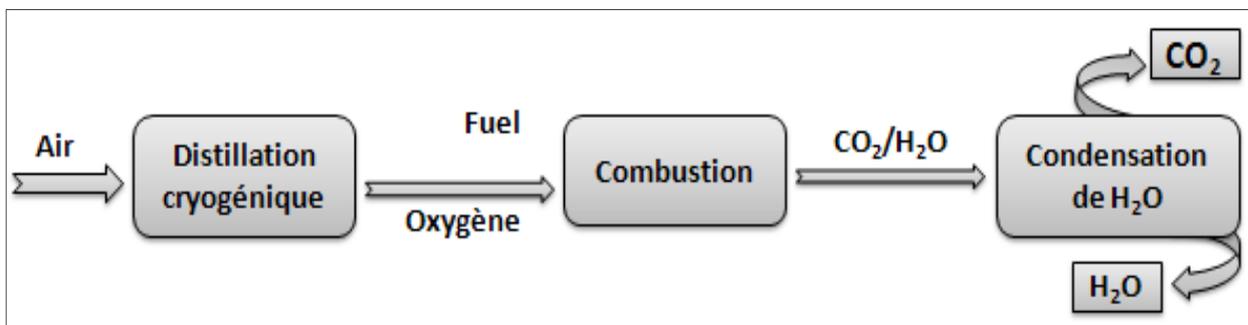


Figure 16: Captage par oxycombustion. [11]

11.3 Captage précombustion :

Capter le CO₂ avant la combustion offre quelques avantages. Le CO₂ n'est ainsi pas encore dilué dans l'air de combustion. Donc, des méthodes plus efficaces de séparation peuvent être appliquées.

Le combustible (charbon ou gaz naturel) est converti, avant le système de production d'électricité, en un gaz de synthèse composé de H₂, CO et CO₂. Il est alors possible de séparer le carbone de l'élément énergétique H₂ en amont de la chambre de combustion.

Dans le cas du charbon, la conversion du combustible se fait dans des gazéificateurs où se déroule la combustion partielle du charbon à l'oxygène. On parle alors de centrale Cycle Combiné à Gazéification Intégrée (IGCC). Dans le cas du gaz naturel, on fait appel à un four de reformage, procédé bien connu dans les usines de production d'ammoniaque et de

dihydrogène.

Le reformage du gaz naturel consiste en la conversion des hydrocarbures en gaz de synthèse contenant du CO et du H₂. Cette opération se déroule dans un four catalytique. Quand le reformage est associé au captage du CO₂, des réacteurs catalytiques de conversion shift sont utilisés pour convertir, en présence d'eau, le CO en CO₂ et H₂. Le gaz de synthèse est alors très riche en CO₂ et H₂. Dans la suite, on assimilera, pour simplifier les annotations, le gaz naturel au méthane, composant majoritaire.

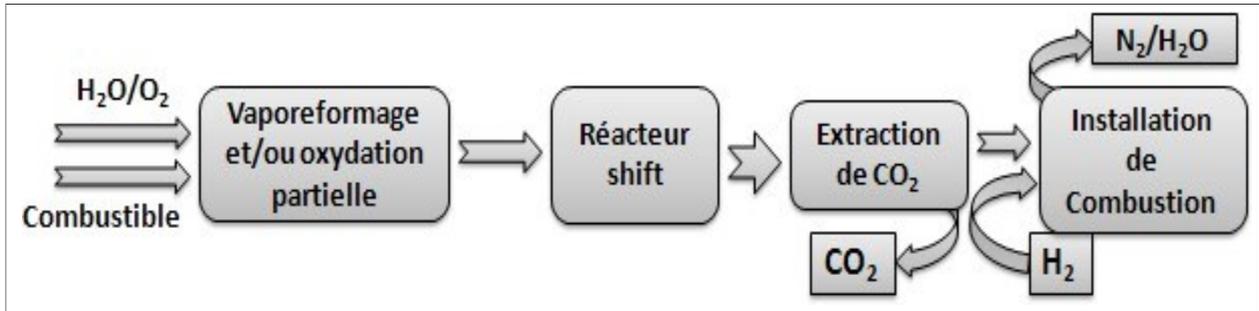


Figure 17: Captage précombustion. [11]

11.4 Comparaison des différents procédés du captage :

D'un point de vue captage du CO₂, le procédé de référence dans le domaine de la postcombustion reste indubitablement le lavage des fumées par absorption chimique, réalisé en faisant appel à un solvant liquide du type amine (monoéthanolamine (MEA), méthyl diéthanolamine (MDEA)...). Cependant, à la différence du traitement du gaz naturel pour lequel cette opération permet d'éliminer simultanément les composés indésirables pour le transport en gazoduc (CO₂ et H₂S principalement), l'application de ce procédé à la récupération du dioxyde de carbone d'une fumée conduit à un coût prohibitif. Les travaux récents conduisent à un coût de captage de l'ordre de 60 \$/tonne CO₂, considéré comme trop élevé. Traduit en termes énergétiques, le lavage aux amines demande 4 milliards de Joules par tonne de CO₂ récupérée, dépensés principalement lors de la régénération du solvant.

D'autres voies que l'absorption chimique ne doit pas être négligée. L'oxycombustion ne s'applique pas directement au captage du CO₂ mais permet d'en faciliter la récupération. Le combustible est directement brûlé avec l'oxygène préalablement séparé de l'air. Cela permet d'augmenter la concentration du CO₂ dans les des fumées, augmentant l'efficacité du captage. Etant la grande concentration du CO₂ dans les fumées, un procédé frigorifique est indiqué pour liquéfier le CO₂ afin de séparer ce composé des autres constituants gazeux (azote, argon, oxygène...). La température minimale du procédé de captage est limitée par le point triple du CO₂ au-delà duquel ce constituant risque de se solidifier. Il est aussi envisageable de capter le CO₂ en amont du système de production électrique. Ce type de captage est appelée captage en

précombustion. Le reformage du gaz naturel ou la gazéification du charbon permettent de convertir ces combustibles en un gaz de synthèse riche en CO et H₂, qui constitue l'élément énergétique. Le CO est converti en CO₂ qui est alors séparé de l'hydrogène avant le système de production électrique.

Les différents procédés de captage ne sont pas équivalents d'un point de vue pureté du flux de CO₂. Les solvants chimiques ont une excellente capacité de séparation du CO₂ des autres constituants. La séparation avec les solvants physiques est généralement moins bonne. De même le fonctionnement d'un procédé de séparation frigorifique, utilisable avec l'oxycombustion, devra être adapté pour obtenir la pureté du flux de CO₂ désirée. [13]

12. Stockage du CO₂ :

Le CO₂ peut être emmagasiné principalement dans des gisements d'hydrocarbures, des veines de charbon non minières et dans les aquifères salins. Il faut noter que le stockage non géologique au fond des océans avait été envisagé, mais n'est plus retenu aujourd'hui, étant donné les risques pour les écosystèmes sous-marins. Ces réservoirs sont abondamment disponibles à travers le monde et les champs de pétrole et gaz sont bien connus. Ces réservoirs pourraient emmagasiner le dioxyde de carbone pour des milliers d'années. [14] [15]

Au niveau national un seul projet a été réalisé :

Projet d'In Salah (Krecheba):

Le site gazier d'In Salah, en Algérie, permet lui aussi d'étudier le stockage dans un aquifère salin, mais cette fois sur terre : tous les ans, 1,2 million de tonnes de CO₂, extraites du gaz naturel puisé sur le site, sont réinjectées dans un aquifère souterrain.

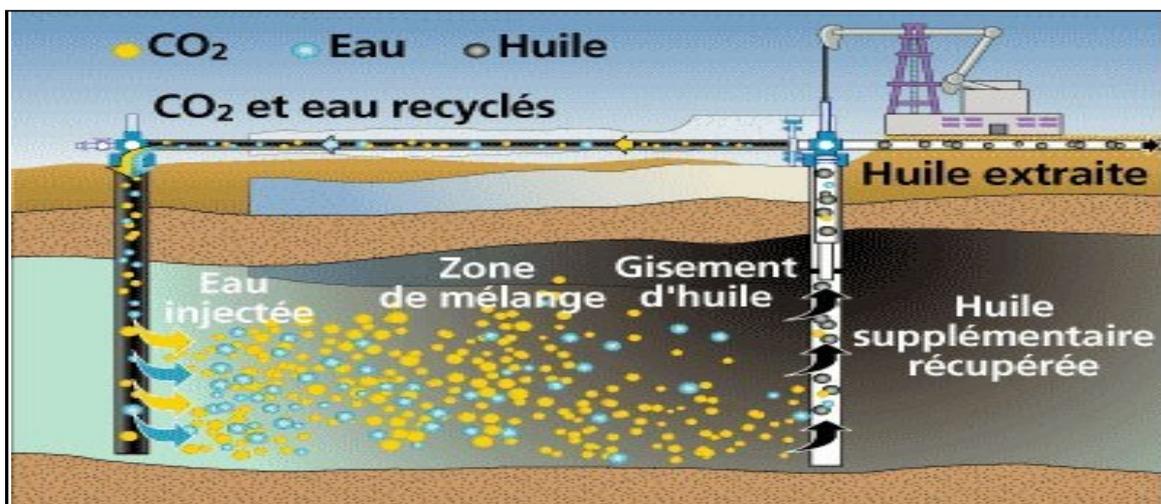


Figure 18: Stockage dans des réservoirs de Pétrole et du Gaz.

Conclusion Générale

La quantification des gaz à effet de serre (GES) par la méthode de l'empreinte carbone est devenue un outil essentiel pour évaluer et comprendre l'impact environnemental des activités humaines, des produits et des services. Cette approche permet de mesurer et de communiquer de manière cohérente les émissions de GES associées à une entité spécifique, qu'il s'agisse d'une entreprise, d'un produit, d'un événement ou même d'un individu. Malgré les limitations, la quantification de l'empreinte carbone reste un outil précieux pour sensibiliser, mesurer et gérer les émissions de GES. Elle contribue à la prise de décisions éclairées en matière de réduction des émissions, de transition vers des pratiques plus durables et de promotion de l'innovation en faveur du climat. En fin de compte, l'empreinte carbone joue un rôle essentiel dans la lutte contre le changement climatique en fournissant des informations clés pour orienter les politiques, les stratégies et les actions visant à construire un avenir plus durable et à faible émission de carbone.

Par ailleurs, l'objectif majeur de notre mémoire était l'établissement d'un inventaire des gaz à effet de serre qui est un processus de déclaration, Sur ce cas de synthèse, il est nécessaire de suivre à l'apport théorique et pratique de l'établissement d'un inventaire des gaz à effet de serre en matière de valeur ajoutée.

Les résultats des calculs des quantités de CO₂ émises par la méthode empreinte carbone montre qu'il faut Tous doivent être mobilisés pour lutter contre l'aggravation de la situation.

Références bibliographiques

- [1] Manuel opératoire du complexe GL2Z, 1993.
- [2] Soft traitement gaz - Service formation GL2Z.
- [3] «Basics of the Carbon Cycle and the Greenhouse Effect – The Earth's Atmosphere, National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) – Education and Outreach».
- [4] Myhre, «Ces valeurs sont calculées uniquement pour le forçage dû à l'effet de serre, et pas pour le bilan radiatif complet. Autrement dit, ces valeurs ne prennent en compte que l'absorption des « grandes » longueurs d'onde, soit les radiations infrarouge émises p,» [En ligne]
- [5] François-Marie, «Physicien-climatologue, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Université Paris-Saclay».
- [6] Comptabilisation des émissions de GES, Secteur d'énergie Février 2019 (ORAN, Arzew)
- [7] La norme ISO14064-1- Gaz à effet de serre, Partie 01 : Spécifications et lignes directrices, au Niveau des organismes pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions Des GES – 2ème Edition 2018-12
- [8] Empreinte carbone [archive] », Dictionnaire de l'environnement.
- [9] Chaudières à vapeur à combustible - Christophe Alleau - Edition du 08/02/07
- [10] GNL Informations Générales - software d'induction / consolidation élaboré par A.Teyar - Chef d'unité commerciale EST
- [11]-La Séquestration du CO₂ Par Claude Acket.

-La séquestration du CO₂ - Mathieu Cribellier, Alvaro, Lerma, Fabien Roche, Jorge Rodriguez, Florian Venant.

- Capturer et stocker le CO₂ pour lutter contre l'effet de serre L'action de l'IFP.
- [12] étude de procédés de captage du CO₂ dans les centrales thermiques, thèse Doctorat, Jean - Marc AMANN le 13 décembre 2007
- [13] Réduction des émissions de CO₂ - Technologies gaz, gaz-vapeur, charbon et cogénération D133 - Rapport Principal
- [14] La capture et le stockage du CO₂ en questions - Anne-Laure de Marignan - IFP 2005.
- [15] https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/013/42013962.pdf

Annexe

Pouvoirs calorifiques (hydrocarbures Algériens)

de	à	TEP	GJ
		Multiplier par	
1000 m ³ (standard) de GN		0,945	39,57
1 m ³ de GNL		0,575	24,07
Une tonne de condensat		1,132	47,40
Une tonne de pétrole brut		1,103	46,20
1 tonne de propane		1,106	46,33
1 tonne de butane		1,092	45,72
1 tonne de GPL*		1,099	46,02
1 tonne de GPL/ c**		1,104	46,21
1 tonne d'essence		1,069	44,75
1 tonne de kérosène		1,049	43,92
1 tonne de gas-oil		1,036	43,38
1 tonne de fuel-oil		1,007	42,18

Facteur d'émission pour le GN et le GNL

Combustible	Gaz Naturel		
Gaz à effet de serre	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
EF ID (identifiant unique du facteur d'émission selon la nomenclature du GIEC)	117642	117696	117750
Valeur	56100	1	0.1
Unité	kg/TJ	kg/TJ	kg/TJ
Upper uncertainty for 95% confidence limit:	58300	3	0.3
Lower uncertainty for 95% confidence limit:	54300	0.3	0.03
Combustible	GNL		

Gaz à effet de serre	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
EF ID (identifiant unique selon la nomenclature du GIEC)	117606	117660	117714
Valeur	64200	3	0.6
Unité	kg/TJ	kg/TJ	kg/TJ
Upper uncertainty for 95% confidence limit:	70400	10	2
Lower uncertainty for 95% confidence limit:	58300	1	0.2

Naphta	73 300	69 300	76 300	3	1	10	0,6	0,2	2	
Bitume	80 700	73 000	89 900	3	1	10	0,6	0,2	2	
Lubrifiants	73 300	71 900	75 200	3	1	10	0,6	0,2	2	
Coke de pétrole	97 500	82 900	115 000	3	1	10	0,6	0,2	2	
Intermédiaires des raffineries	73 300	68 900	76 600	3	1	10	0,6	0,2	2	
Autres types de pétrole	Gaz de raffinerie	57 600	48 200	69 000	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3
	Cires de pétrole	73 300	72 200	74 400	3	1	10	0,6	0,2	2
	White spirit et SBP	73 300	72 200	74 400	3	1	10	0,6	0,2	2
	Autres produits pétroliers	73 300	72 200	74 400	3	1	10	0,6	0,2	2
Goudron de houille	80 700	68 200	95 300	1	0,3	3	1,5	0,5	5	
Gaz dérivés	Gaz d'usine à gaz	44 400	37 300	54 100	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3
	Gaz de four à coke	44 400	37 300	54 100	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3
	Gaz de hauts fourneaux	260 000	219 000	308 000	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3
	Gaz de convertisseur à l'oxygène	182 000	145 000	202 000	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3
Gaz naturel	56 100	54 300	58 300	1	0,3	3	0,1	0,03	0,3	
Déchets industriels	143 000	110 000	183 000	30	10	100	4	1,5	15	
Huiles résiduelles	73 300	72 200	74 400	30	10	100	4	1,5	15	
Tourbe	106 000	100 000	108 000	1	0,3	3	1,5	0,5	5	