

ملخص

في إطار إثراء معلوماتنا حول إحتباس الحرارة, هذا العمل المتواضع يتلخص في دراسة العنفة الغازية بدراسة عامة حول ديناميكية الحرارة لتقييم نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون المروحة من العنفة الغازية الذي يسبب الإحتباس الحراري.

Résumé

Dans le cadre d'enrichir notre informations sur l'effet de serre, alors l'objectif de ce travail est basé sur l'étude de turbine à gaz donc c'est l'étude générale sur la thermodynamique afin d'évaluer la quantité de gaz de carbone émise de turbine à gaz qui due à l'effet dessers.

Abstract

Within the framework to enrich our information on the effect serve, there fore the objective of this work is based on the study of gas turbine it is the general study on thermodynamics in order to evaluate the quantity of gas of carbon emitted of gas turbine which due to the effect serve.

SOMMAIRE

Remercîment

Dédicace

Résumé

Abréviation

Introduction générale

CHAPITRE I : DÉSCRIPTION DE CHAMP DE HASSI R'MEL

CHAPITRE I	1
I.1 Introduction	1
I.2 Gisement	1
I-2.1 Définition.....	1
I.2.2 Installations gazières de Hassi R'mel	2
I.2.3 Traitement du gaz	3
I.2.4 La déshydratation.....	3
I.2.5 La séparation gaz- liquides	3
I.2.6 La récompression.....	3
I.3 L'installation de production de HASSI R'MEL.....	3
I.3.1 Modules d'exploitation	3
I.3.2 Centre de traitement de gaz Djebel Bissa.....	4
I.3.3 Centre de traitement de gaz HR Sud	4
I.3.4 Station de récupération des gaz associés (SRGA)	4
I.3.5 Les Stations de Compression	4
I.3.6 Centre de stockage et de transfert par faciliter (CSTF).....	5
I.3.7 Centre national de dispatching de gaz (CNDG)	5
I.3.8 Les stations Boosting	6
I.3.9 Centres de traitement d'huile (CTH)	6
I.4 La description du procès.....	7
I.5 Développement final du champ de Hassi R'mel	8
I.6 Structure de la Division de Production (SH-DP-HRM)	8
I.7 Description générale de la station de compression sud.....	9
I.7.1 Généralités	9

I.7.2	Caractéristiques de fonctionnement de la station	10
I.7.3	Caractéristiques générales	10
I.7.4	Conditions de fonctionnement nominales.....	10
I.8	Composition du gaz à comprimer	10
I.9	Capacité de la station sud	11
I.10	Unité de compression	12
I.10.1	Turbocompresseur du 1 ^{er} étage	12
I.10.2	Turbocompresseur 2 ^{ème} étage	12
I.11	Composantes principales de la station.....	12
I.12	Description du système de gaz	12
I.12.1	circuit gaz de process	12
I.12.2	Section d'aspiration 1 ^{ier} étage et scrubbers	12
I.12.3	Unité de compression 1 ^{ier} étage	13
I.12.4	Réfrigérant de compression 1 ^{ier} étage	13
I.12.5	Séparateur 1 ^{ier} étage.....	13
I.12.6	Collecteur inter étage.....	13
I.12.7	Unité de compression 2 ^{ème} étage	14
I.12.8	Réfrigérant du gaz 2 ^{ème} étage.....	14
I.12.9	Collecteur final	14
I.12.10	Circuit de gaz combustible	15
I.12.11	Circuit gaz de démarrage.....	16
I.12.12	Système de torche	16
I.12.13	Unité de détente (Turbine à gaz)	17
I.14	Le principe de fonctionnement.....	17
I.15	Dispositifs de lancement des turbines à gaz	18

CHAPITRE II : LE DIOXYDE DE CARBONE ET SES EMISSIONS

II.	Les gaz à effet de serre.....	19
II.1	Introduction	19
II.2.1	Définition de l'Effet de serre.....	19
II.2.2	Principes.....	19
II.2.3	Les principaux gaz à effet de serre	20

II.2.4 les gaz qui font le plus d'effet de serre.....	20
II.2.5 la période de circulation des gaz dans l'atmosphère	22
II.2.6 La façon de comparaison entre ces gaz	23
II.3 Effets de toxicologie, écotoxicologie du CO ₂	23
II.4 Le Dioxyde de Carbone et ses émissions.....	25
II.4.1 Définition	25
II.4.2 Caractéristiques physiques	26
II.4.3 Solubilité du CO ₂	26
II.5 Utilisations	26
II.6 Les émissions de CO ₂	27
II.7 Types d'émission	27
II.7.1 Les émissions anthropiques	27
II.7.2 Les émissions naturelles	27
II.7.3 Les émissions mondiales	28
II.8 Surveillance des émissions	28
II.8.1 Le Protocole de Kyoto	29
II.9 Évolution des émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2004	29

CHAPITRE III : SOURCES DES ÉMISSION DU CO₂ DANS L'INDUSTRIE

III. Introduction.....	30
III.1 Combustion	30
III.1.1 Définition	30
III.1.2 Différents types de combustion.....	32
III.2 Énergie dégagée et pouvoir calorifique.....	32
III.2.1 Produits de la combustion	34
III.3 La section de combustion dans la turbine à gaz.....	36
III.3.1 Avantages et inconvénients des turbines à gaz	36
III.3.2 Présentation de la turbine à gaz MS5002B	36
III.3.3 Introduction	36
III.3.4 Caractéristiques de la turbine à gaz MS 5002B	37
III.3.5 Présentation de la turbine à gaz MS 5002 b.....	38
III.3.6 Description de la turbine à gaz MS 5002 b.....	38
III.3.7 Turbines avec étage à action et à réaction.....	38

III.3.8 Principaux composants de la turbine à gaz MS 5002 b	39
III.4 Le principe de fonctionnement.....	47
III.4.1 Cycle de brayton	48

CHAPITRE IV : CALCUL DE LA QUANTITÉ DU CO₂ ÉMISE

IV. Les données du problème.....	50
IV.1 Les paramètres opératoires.....	51
IV.1.1 Calcul du débit de combustible consommé par une turbine à gaz.....	52
IV.1.2 Détermination des paramètres nécessaires au calcul du débit du combustible Q_C	53
IV.1.3 Travail et puissance utile absorbés par le compresseur centrifuge pour une turbine BP.....	55
IV.2 Calcul du travail et de la puissance du compresseur axial.....	56
IV.2.1 Calcul du travail et de la puissance du compresseur axial au 16 ^{ème} étage.....	56
IV.2.2 Détermination du rendement du compresseur axial η_{CA}	56
IV.2.3 Détermination de la température de soutirage de l'air de refroidissement du 10ième étage du compresseur axial T_S	57
IV.2.4 Calcul du travail et de la puissance absorbés par l'air de refroidissement	58
IV.3 Détermination de l'enthalpie sortie gaz d'échappement H_4	58
IV.3.1 Détermination de l'enthalpie au point T_2	58
IV.3.2 Calcul de l'enthalpie du combustible	59
IV.4 Recalcul de l'enthalpie H_4 en tenant compte du débit de combustible (H'_4)	59
IV.4.1 Détermination du débit d'air stœchiométrique.....	59
IV.4.2 Détermination de la valeur de l'excès d'air	60
IV.4.3 Calcul de la chaleur spécifique des gaz d'échappement	62
IV.4.4 Calcul de l'enthalpie à T_4 en tenant compte du débit de combustible H'_4	62
IV.4.5 Détermination du débit d'air en excès pour 1kg de combustible.....	63
IV.4.6 Détermination des quantités massiques des gaz d'échappement.....	63
IV.4.7 Détermination de la quantité d'O ₂ émise par 1Kg de combustible.....	63
IV.4.8 Détermination de la quantité d'azote émise par 1Kg de combustible	64
IV.4.9 Détermination des quantités de CO ₂ et de H ₂ O émises	64
IV.5 Détermination de la concentration des gaz d'échappement	65

IV.5.1 Détermination de la température sortie chambre de combustion T_{3r}	65
IV.5.2 Détermination de l'enthalpie H_3	65
IV.5.3 Détermination de la température théorique T_{4th}	66
IV.5.4 Calculons δ au point T_3	66
IV.5.5 Détermination du rendement de la détente de la turbine	67
IV.5.6 Détermination du rendement global de la turbine	67
IV.5.7 Détermination du débit des fumées émis par 1 turbine	68
IV.5.8 Les différents paramètres qui influent directement et indirectement sur la quantité d'émission de CO_2	69
IV.5.9 Calcul de la quantité de CO_2 annuelle émise au niveau de la Station de CompressionSud.....	75
IV.6 Emissions de la Station de Compression Sud (année 2010).....	77
IV.6.1 Emissions de la Station de Compression Sud pour différentes années	78
IV.6.2 Comparaison entre les deux cas : été et hiver	79
IV.7 Estimation des quantités d'émission de CO_2 au niveau de la région de Hassi R'mel	80

CHAPITRE V : CALCULE DE LA QUANTITÉ DE CO_2 ÉMISE

V. Introduction	82
V.1 Solution (1).....	83
V.1.1 Réduction de l'émission du CO_2 par l'optimisation des paramètres de marche de la turbine à gaz	83
V.2 Solution(2).....	83
V.2.1 Cycle de turbine à gaz avec récupération de la chaleur des gaz d'échappement ... (installation d'un réchauffeur d'air).....	83
V.3 Solution (3)	84
V.3.1 Principe d'un cycle combiné	84
Conclusion générale	
Liste des figures	
Liste des tables	
Liste des graphes	
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

Figure (I .1): Représentation géographique de Hassi R'mel.....	1
Figure (1.2): Schéma synoptique des deux stations de compression de la région.....	5
Figure (I.3): Le centre national de dispatching du gaz.....	5
Figure (I.4): Schéma synoptique de la station boosting.....	6
Figure (I.5): Schéma synoptique des centres de traitement d'huile.....	6
Figure (I.6): Présentation géographique des installations gazières de Hassi R'mel.....	7
Figure (I.7): Position d'un turbocomprsseur K-901 de lastation Boostin.....	8
Figure (I.8): Structure de la Division de Production	9
Figure (I.9): Représentation d'une ligne.....	15
Figure (II.1): Répartition des contributions à l'effet de serre des différents gaz présents dans l'atmosphère	20
Figure (II.2):Les émissions de CO ₂ mondiales.....	28
Figure (II.3): Les pourcentages des permis européens d'émission de CO ₂	28
Figure (III.1): La turbine à gaz MS 5002B.....	37
Figure (III.2): Principaux composants de la turbine à gaz MS 5002 B.....	39
Figure (III.3): Système typique d'admission.....	40
Figure (III.4): Le compresseur axial.....	42
Figure (III.5): L'écoulement de l'air et du gaz dans la chambre de combustion de la turbine..	43
Figure (III.6): Schéma de la chambre de combustion.....	44
Figure (III.7): Dispositif des chambres de combustion.....	44
Figure (III.8): Les différentes étapes de fonctionnement de la turbine.....	46
Figure (IV.1): Schéma d'une turbine à gaz basse pression.....	50
Figure (IV.2): Cycles théorique et réel du fonctionnement d'une turbine à gaz.....	50
Figure (IV.3): Schéma du compresseur centrifuge.....	55
Figure (V.4): Schéma du compresseur axial.....	57
Figure(V.1): Cycle d'une turbine à gaz avec récupération de la chaleur.....	84
Figure (V.2):Schéma de principe du cycle combiné.....	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1) : La composition du gaz dans le cas design.....	10
Tableau (I.2) : Débit du gaz réinjecté donné par le constructeur.....	11
Tableau (I.3) : Composition du gaz actuelle.....	11
Tableau (II.1) : Composition et durée de vie des principaux GES.....	22
Tableau (II.2) : Pouvoir de réchauffement global des GES par rapport au CO ₂	23
Tableau (II.3) : Les caractéristiques physiques du dioxyde de carbone.....	26
Tableau (II.4) : Evolution des émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2004	29
Tableau (III.1) : PCI _i et C _p du gaz combustible à 15°C	33
Tableau (III.2):Les caractéristiques de la turbine et du gaz combustible utilisé.....	38
Tableau (IV.1): Paramètres de fonctionnement de la turbine MS 5002 B.....	51
Tableau (IV.2): Les conditions opératoires des turbines à gaz dans la Station.....	52
Tableau (IV.3) :Compositions et caractéristiques du gaz combustible.....	54
Tableau (IV.4) : Paramètres de marche du compresseur centrifuge.....	55
Tableau (IV.5) : Paramètres de marche de la turbine.....	55
Tableau (IV.6) :Masse de l'O ₂ nécessaire à la combustion d'1kg de combustible.....	60
Tableau (IV.7) :Le débit d'air en fonction de la température ambiante.....	61
Tableau (IV.8) : Quantités de CO ₂ et H ₂ O émises par les gaz d'échappement.....	64
Tableau (IV.9) : Centractions et poids moléculaire des gaz d'échappement.....	65
Tableau (IV.10) : Quantités des gaz d'échappement émises.....	69
Tableau (IV.11) : Quantités de CO ₂ et la température des fumées des différents paramètres... ..	69
Tableau (IV.12) : Débits des émissions des gaz d'échappement annuel de la Station.....	76
Tableau (IV.13) : Débit d'émissions calculé par an au niveau de la Station obten.....	77
Tableau (IV.14) : Comparaison entre deux cas de fonctionnement été et hiver.....	80
Tableau (IV.15) : Quantités des émissions de CO ₂ au niveau de la région de Hassi R'mel	81

LISTE DES GRAPHE

Graphe (IV.1): Variation de l'excès d'air en fonction de la température.....	62
Graphe (IV.2): Influence du taux de compression sur la consommation du combustible.....	70
Graphe (IV.3): Les émissions de CO ₂ en fonction du taux de compression.....	71
Graphe(IV.4): L'influence de la température ambiante sur la consommation du combustible.....	72
Graphe (IV.5): La variation du débit de combustible en fonction du PCI.....	73
Graphe (IV.6): La variation du débit de CO ₂ émis en fonction du PCI.....	74
Graphe (IV.7): Débit du CO ₂ émis par la Station en 2010.....	77
Graphe(IV.8): Débit annuel du CO ₂ émis par la Station de Compression Sud.....	78

Introduction générale

Avant d'évaluer les quantités de CO₂ émises vers l'atmosphère au niveau de la région de Hassi R'mel, il convient de comprendre leur ampleur sur l'environnement, le contexte de leur création, et la problématique temporelle de leur intensification.

Depuis la moitié du 19^{ème} siècle où le premier litre de pétrole a été découvert, nos développements économiques et technologiques.

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration du CO₂ atmosphérique est passée d'une valeur quasiment stable de 280 ppm (0,028 % en volume) à une valeur de 365 ppm, jamais atteinte dans les derniers 400 000 ans. Très fortement corrélée à la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, la température moyenne mondiale à la surface de la Terre s'est élevée de 0,6 °C au cours du XX^{ème} siècle. Les experts du GIEC prévoient qu'en l'absence de mesures fortes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne du globe pourrait s'élever de 1,4 à 5,8 °C supplémentaires entre 1990 et 2100.

Depuis ce temps, la sécurité énergétique est un enjeu majeur pour tous les pays. Comment imaginer un développement sans continuité de l'approvisionnement en énergie. Comment imaginer de bonnes conditions de fonctionnement des industries gazières et pétrolières pour limiter ces émissions.

Et pourtant, aujourd'hui se profilent devant nous deux limites à notre modèle actuel :

- D'une part nous savons que les ressources fossiles sont limitées, prédisant une déplétion des réserves inéluctable.
- D'autre part nous voyons se profiler de plus en plus nettement de nombreux troubles environnementaux dont un en particulier, l'effet de serre, qui menace notre climat à l'échelle mondiale.

De plus en plus conscient de ces deux limites qui hypothèquent notre avenir l'Algérie s'engage doucement dans les premières initiatives en la matière. D'un côté, au niveau international, le protocole de Kyoto est un premier pas qui vise à amorcer une dynamique mondiale contre l'effet de serre.

De l'autre, au niveau national, cette dynamique est relayée petit à petit de façon de plus en plus construite et contraignante en passant d'une démarche d'encouragement aux économies à la mise en place d'entraves concrètes.

Voilà en matière d'énergie les défis qui s'imposent à l'échelle de notre génération. Comment se développer durablement en créant des richesses sans détruire ou transformer sur le long terme, d'une façon qui nous est dommageable, la biosphère qui nous permet de vivre.

I. Description de la région industrielle de Hassi R'mel :

I.1 Introduction :

La région de **Hassi R'mel** possède environ **10 %** des ressources mondiales en gaz naturel, l'Algérie se place en septième rang des pays producteurs de gaz. Elle satisfait ses besoins et celle d'une partie de l'**EUROPE** en gaz sec, le **GPL** et le **condensât** qui sont des produits de qualité subissent des traitements aux niveaux des raffineries avant d'être vendu ou envoyés vers l'industrie pétrochimique.

Cette région est caractérisée par :

- *Un climat sec,*
- *Une humidité relative* moyenne de 19% en été et 34% en hiver.
- *La température* à Hassi R'mel varie entre 5C°et 45C°.
- *La Tempête de sable* : des vents violents soulevant le sable et les particules de poussières jusqu'à une altitude d'environ **110m** au-dessus du sol pendant plusieurs heures ce qui réduit la visibilité parfois jusqu'à **15m**. Les tempêtes de sables ont un pouvoir d'infiltration et d'érosion important. Les conditions climatiques influencent énormément le mode de fonctionnement des unités.

I.2 Gisement :

I-2.1 Définition : un gisement n'est autre qu'une couche de terrain compacte en forme d'anticlinal constitué par des Gers du tirais poreux et perméables ; les pores sont imprégnés d'hydrocarbures. On donne à une telle couche le nom de " roche magazine " ; cette couche étant surmontée d'une autre imperméable et étanche qui emprisonne les hydrocarbures.

Le gisement de **Hassi R'mel** s'étend sur une superficie de **3500km²** soit **70km** environ dans la direction Nord –sud et **50km** dans la direction Est- ouest. Les études du gisement ont prouvé que le réservoir contenait du gaz, du condensât et du GPL, les richesses initiales étaient de **200 g/m³** pour le condensât et de **80 g/m³** pour le GPL.

D'autres études ont mis en évidence la présence du pétrole brut tout au tour du gisement, mais plus particulièrement dans les parties « Est »et « Sud »du champ. On parle ainsi de présence d'anneau d'huile.

« Hassi R'mel est considéré comme le poumon de l'Algérie ».

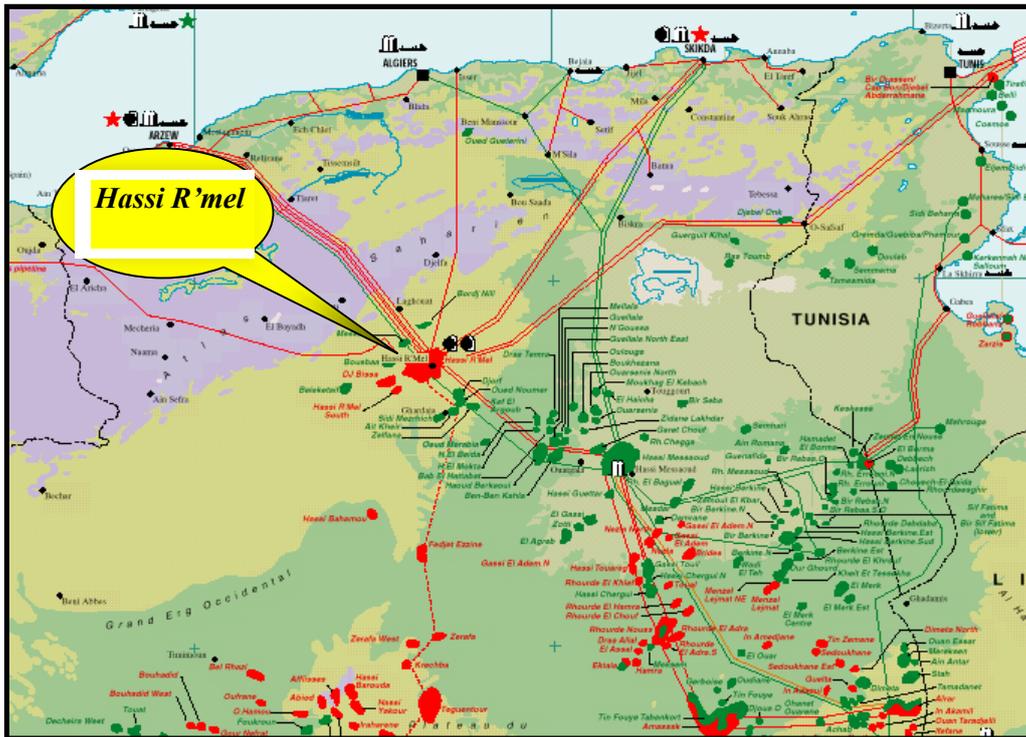


Figure (I.1) : Représentation géographique de Hassi R'mel

I.2.2 Installations gazières de Hassi R'mel :

Le plan d'ensemble des installations implantés à **Hassi R'mel** a pour but de réaliser une exploitation rationnelle des gisements.

Le champ **Hassi R'mel** possède plusieurs installations réparties sur trois secteurs :

Secteur centre : comprend :

- module 0.
- module 1 (MPPII)
- module 4 (MPPIV)
- CSTF
- SRGA
- CNDG

Secteur nord :

- Module 3 (MPPIII)
- Station de compression nord

Secteur sud :

- Module 2(MPPII)
- Station de compression sud (SCS)
- Djebel Bissa

- Hassi R'mel sud

I.2.3 Traitement du gaz

Le traitement de gaz s'effectué globalement en trois phases :

- La déshydratation.
- La séparation gaz-liquides.
- La stabilisation et le fonctionnement des liquides en condensât et GPL.

I.2.4 La déshydratation :

Elle consiste en injection en continu du **mono** ou **diéthylène glycol** à différents points du circuit du gaz pour éviter la formation d'hydrate au niveau des sections de refroidissement du procédé. Le glycol hydraté étant récupéré, régénéré puis réintroduit dans le circuit de déshydratation.

I.2.5 La séparation gaz- liquides :

Elle consiste en refroidissement, condensation et récupération des hydrocarbures liquides au niveau des ballons séparateurs.

I.2.6 La récompression :

La récompression des gaz moyenne pression provenant des différents séparateurs et du déethaniseur par turbocompresseur, permet d'expédier ces gaz avec le gaz de vente vers le **CNDG** ou les stations de réinjection.

I.3 L'installation de production de HASSI R'MEL :

I.3.1 Modules d'exploitation :

Le module : C'est le diminutif de « module Processing plant » qui désigne une unité de traitement. Il est constitué d'un ensemble d'équipements conçus et réalisés pour permettre un traitement spécifique du gaz, condensât et GPL, conformément à un procédé approprié et répondant aux spécifications commerciales.

Cinq modules sont implantés à Hassi R'mel (module 0, 1, 2, 3 et 4). Quatre ont une capacité unitaire de **60** millions de m³ /jour. Le cinquième est le module « 0 » qui a une capacité de **30** millions /jour.

Un sixième module dessert le petit gisement de « Djebel Bissa ». en rapport avec sa capacité modeste de **6** millions de m³/jour. Il est désigné par l'appellation de centre de traitement de gaz. Les modules de traitement de gaz sont reliés pour le stockage des liquides au centre de stockage CSTF.

Ces installations produisent :

- le Gaz sec.
- le GPL.
- le condensât.

I.3.2 Centre de traitement de gaz Djebel Bissa :

C'est un sixième module dessert le petit gisement de Djebel Bissa en rapport avec sa capacité modeste de 6 millions de m³ par jour, il est désigné par l'appellation "centre de traitement de gaz".

I.3.3 Centre de traitement de gaz HR Sud :

Ce projet comporte une unité de traitement de gaz naturel, destinée à traiter le gaz brut pour obtenir du gaz sec et la récupération des hydrocarbures liquides estimés à 2830 millions de tonnes/mois (à 2000 millions standard de m³ par jour), sa capacité est de 10 millions standard de m³/jour de gaz sec.

HR Sud comporte trois unités de traitement de gaz, une de 6 millions de m³/jour et deux de 2 millions de m³/jour pour chacune.

I.3.4 Station de récupération des gaz associés (SRGA) :

C'est une unité qui a démarré le 13 avril 1999 avec une capacité de 4000 m³/jour design. Elle comporte quatre turbocompresseurs avec une capacité unitaire de 1 million de m³/jour; Le gaz récupéré est envoyé dans le collecteur E2 du Module 4.

I.3.5 Les Stations de Compression :

Les deux stations de compression sud et Nord compriment le gaz sec (traités et non commercialisés) qui arrivent des unités au modules jusqu'à une pression de 350 bars et le réinjectent au niveau du gisement, à l'aide de 18 compresseurs centrifuge entraînés par des turbines à gaz pour chaque station, afin de :

- Maintenir la pression du gisement.
- Balayer le gaz humide pour bien extraire les hydrocarbures liquides.
- Optimiser la production en GPL et Condensât.

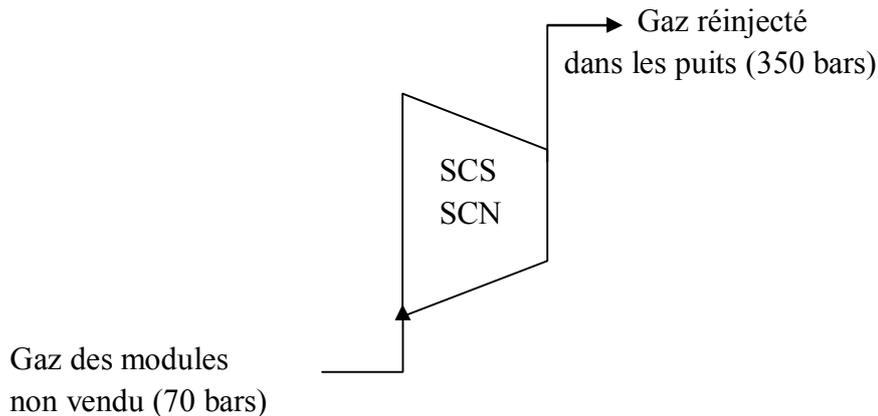


Figure (1.2) : Schéma synoptique des deux stations de compression de la région.

I.3.6 Centre de stockage et de transfert par faciliter (CSTF) :

Le condensât et le GPL, produits par tous les modules sont acheminés vers le centre de stockage et de transfert (CSTF) qui se trouve dans la zone centrale de Hassi R'mel, ils sont débarrassés des éventuelles quantités d'eau résiduelle et comptabilisée avant d'être expédié vers Arzew.

Le CSTF comprend trois bacs de 35000m³ et quatre bacs de 45000m³ chacune pour le stockage du condensât, douze sphères de 7000m³ chacune pour le stockage du GPL. Les vapeurs formées dans les sphères, sous l'effet de la température ambiante sont comprimées par des turbocompresseurs, condensées puis remises dans le stockage pour éviter le boil-off et l'envoi du GPL vers torche.

I.3.7 Centre national de dispatching de gaz (CNDG) :

Le CNDG (centre national de dispatching du gaz de Hassi R'mel) collecte la totalité de la production de gaz naturel en Algérie en vue de son acheminement vers les complexes de liquéfaction à Arzew et Skikda, les centre de consommation nationaux et les clients internationaux.

Il a également pour fonction le comptage des quantités expédiées ainsi que la régulation de pression de départ et le débit de chaque gazoduc.

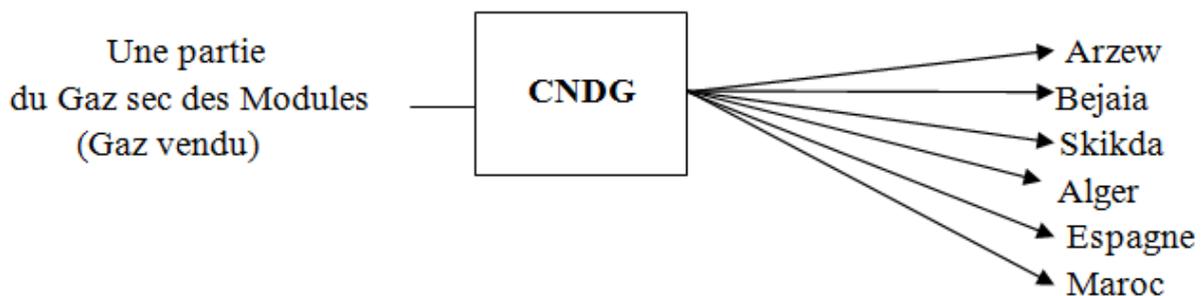


Figure (I.3) : Le centre national de dispatching du gaz.

I.3.8 Les stations Boosting :

Les unités de traitement de gaz sont conçues pour fonctionner à une pression d'entrée supérieure à 100 bars.

Suite à la diminution de la pression du gisement, l'unité de Boosting a été installée dans le but de maintenir la pression de gaz brut au dessus de 100 bars.

La station Boosting contient trois sections:

- Manifold.
- Séparation d'entrée : pour séparer la partie gaz de la partie liquide (élimination d'eau et récupération de condensât non traité qu'elle va envoyer vers les trains des modules).
- Compresseurs du Boosting : le gaz séparé va compresser au niveau des compresseurs pour augmenter sa pression d'entrée des modules (supérieur à 100 bars).

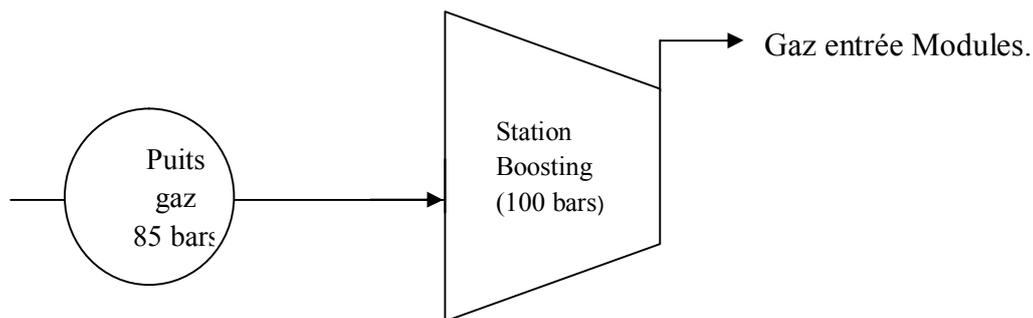


Figure (I.4) : Schéma synoptique de la station boosting.

I.3.9 Centres de traitement d'huile (CTH) :

Ces 5 centres de traitement (CTH₁, CTH₂, CTH₃, CTH₄, CTH_{sud}) sont exploités après la découverte d'un anneau d'huile qui a été mis en évidence sur le flanc Est du champ de Hassi R'mel en Mars 1979.

Le niveau de production est de :

- 4000 M₃/j d'huile,
- 900 M₃/J condensat,
- 8 Million M₃/j gaz.

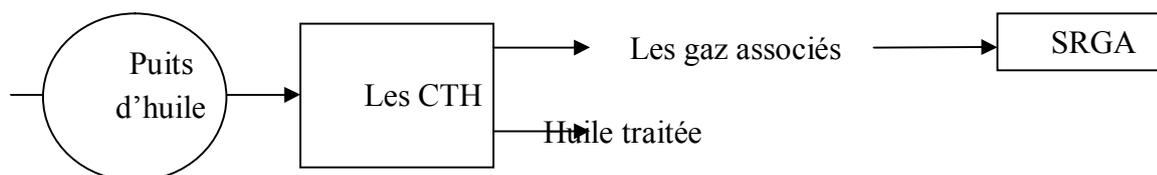


Figure (I.5) : Schéma synoptique des centres de traitement d'huile.

Le gisement de Hassi R'mel se divise en trois secteurs comme le montre la figure suivante

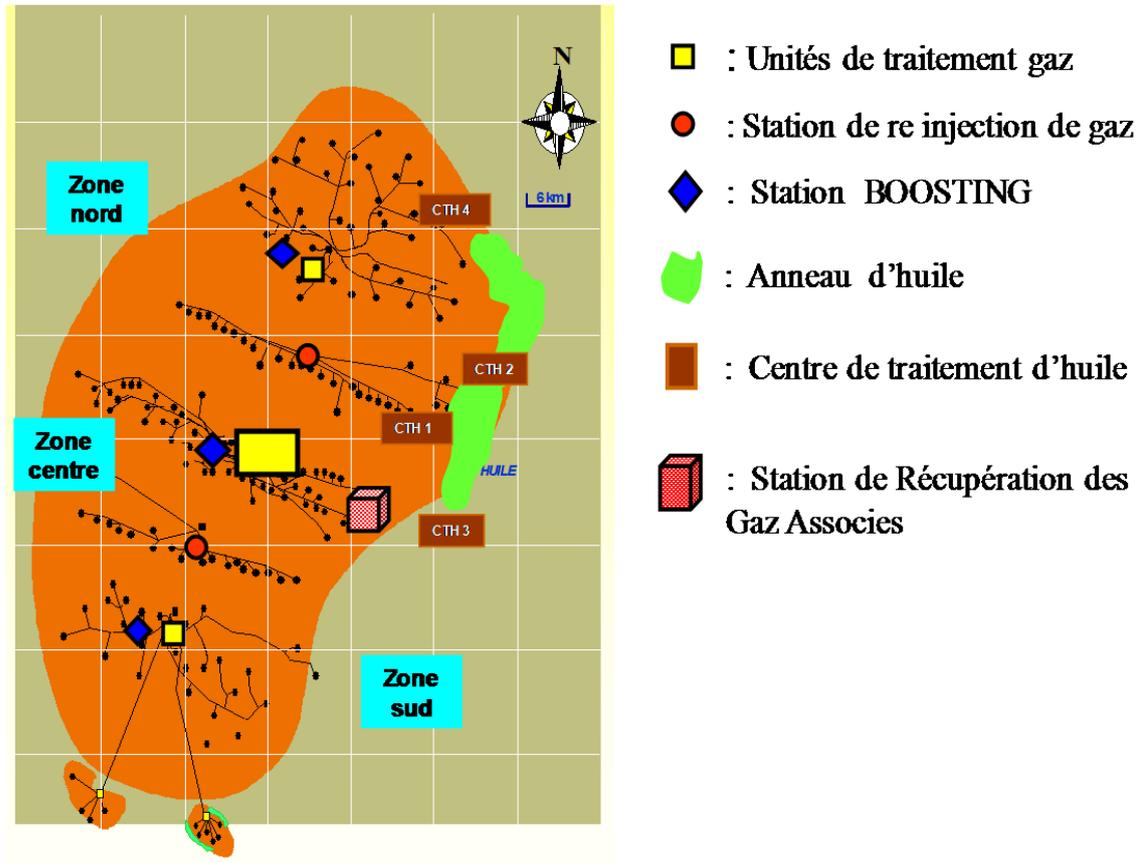


Figure (I.6) : Présentation géographique des installations gazières de Hassi R'mel

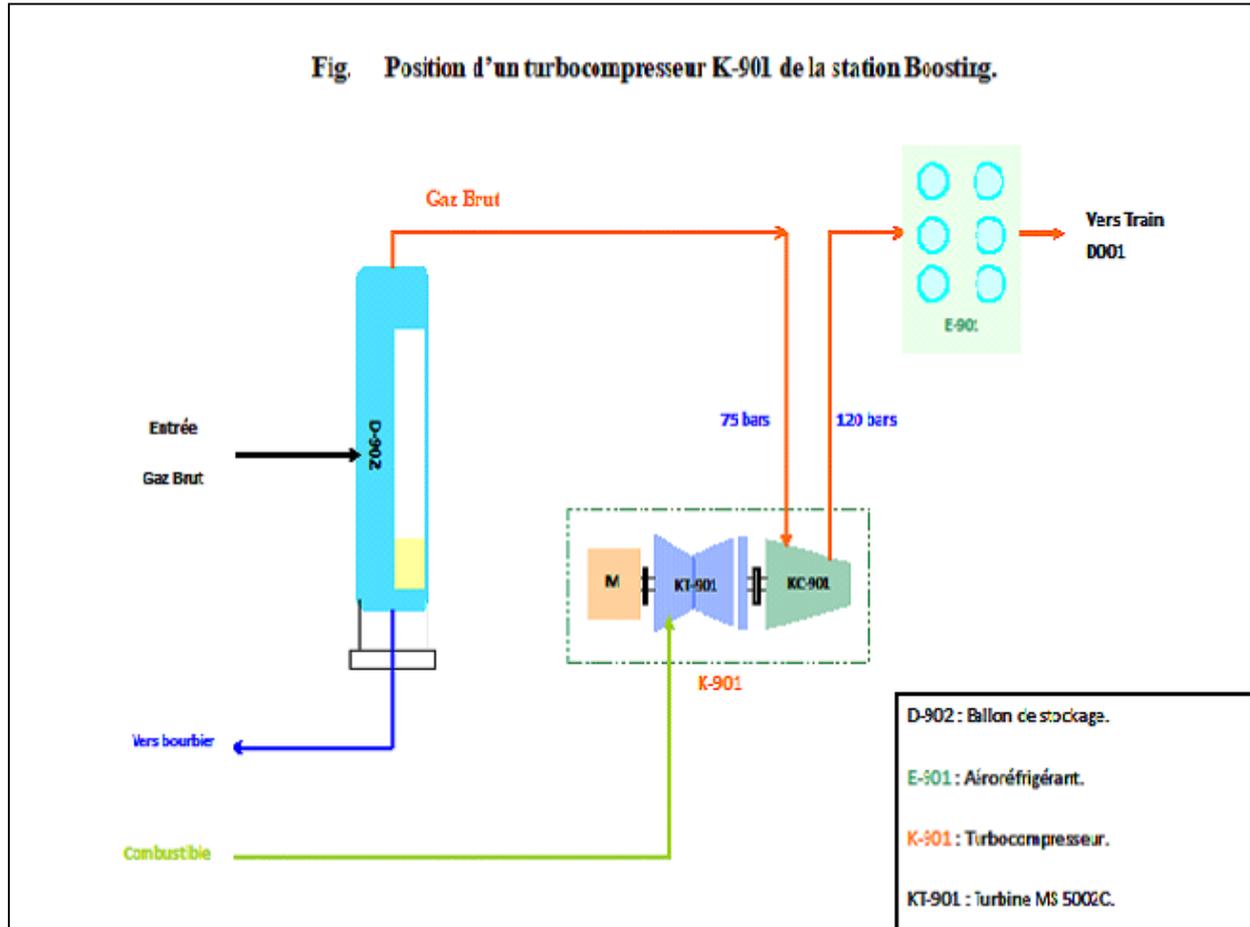
I.4 La description du procès :

Le gaz brut venant du **manifold** des modules à une pression inférieure à **100 bars** et une température de **60c°**, alimentant les séparateurs d'entrées **D901** .

Ces séparateur séparent le gaz brut par différence de densité en trois produits : l'eau, condensât et gaz.

L'eau recueillie dans les appendices des **03** séparateurs **D901** est évacuée vers le **D413**, via **LV 904** pour une éventuelle séparation des traces de condensât .Le condensât est envoyé directement aux trois trains pour le traitement.

Le gaz sortant des séparateurs **D901** , saturée en eau est admis dans le collecteur commun d'aspiration puis dans les ballons d'aspirations pour éliminer toute trace de liquide , une fois dans le compresseur **BCL 606/3** il sera comprimé jusqu'à **120 kg/cm2** et a une température **80c°**, au refoulement des compresseurs ,le gaz est refroidi jusqu'à **60c°** en passant dans les aéroréfrigérants **E901** puis envoyer pour alimenter le module de traitement .



I.5 Développement final du champ de Hassi R'mel :

Le plan de développement du champ a permis d'atteindre les capacités de production suivantes :

- 100 Milliards de mètres cubes de gaz par an.
- 12 Millions de tonnes de condensât par an.
- 3.5 Millions de tonnes de GPL par an.
- 700 Millions de tonnes de pétrole brut par an.

I.6 Structure de la Division de Production (SH-DP-HRM) :

Le développement du champ de **Hassi R'mel** a nécessité des moyens humains et matériels considérables et pour maintenir la production dans les meilleures conditions tout en assurant la sécurité des travailleurs, la direction régionale de HRM est répartie à travers les directions et divisions suivantes:

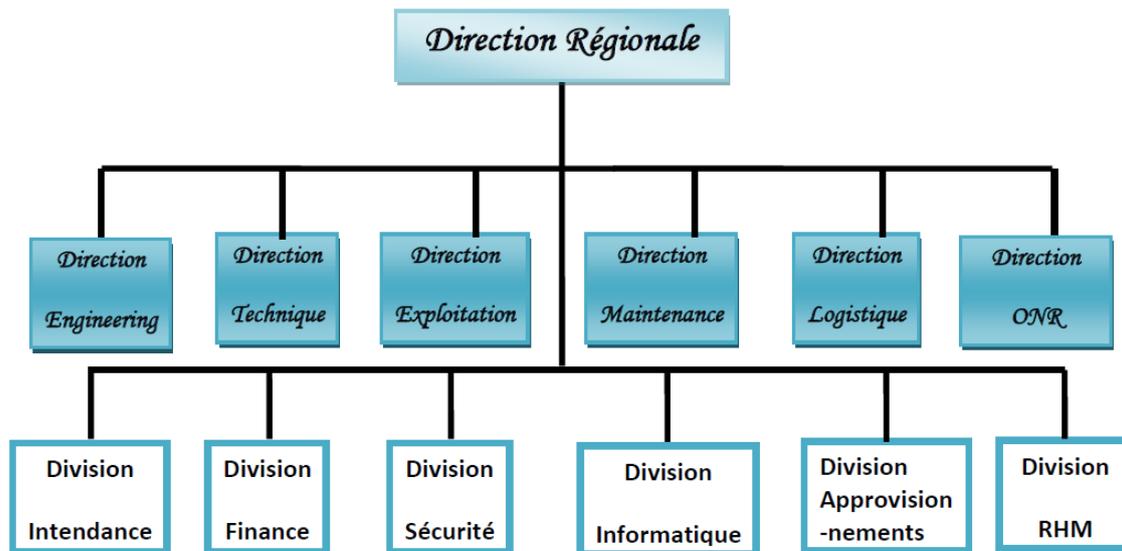


Figure (I.8) : Structure de la Division de Production

La Direction Exploitation (XP) a pour but :

- La planification, le développement, l'organisation et la mise en oeuvre des services d'exploitation liés aux besoins de la région.
- La préparation et la tenue à jour des programmes et des plannings de la région pour des révisions ou des modifications.
- L'exécution des services de l'exploitation nécessaire pour le bon fonctionnement de la région.

I.7 Description générale de la station de compression sud :

I.7.1 Généralités :

La station de compression est étudiée pour comprimer, jusqu'à 350 bars, le gaz naturel qui provient d'une installation de dégazoline et pour l'envoyer aux puits pour la réinjection dans le sous-sol. La compression est réalisée en deux étages avec un refroidissement intermédiaire à environ 160 bars. Chaque étage est réalisé en utilisant 9 compresseurs centrifuges du type "barrel" installés en parallèle.

Il est prévu un collecteur intermédiaire auquel sont reliés les refoulements des 9 compresseurs du 1^{er} étage (et les aspirations des 9 compresseurs du 2^{ème} étage), ainsi qu'un collecteur final recevant les refoulements des 9 compresseurs du 2^{ème} étage.

Chaque compresseur est entraîné par une turbine à gaz à 2 arbres, modèle MS 5002 B (construite par NUOVO PIGNONE sous licence General Electric) à travers un multiplicateur.

Les unités de compression sont installées dans des enceintes acoustiques pourvues d'un système de ventilation spécial pour enlever la chaleur produite par les machines. Ces unités sont groupées dans 4 salles des machines, en préfabriqué et aérées par des ventilateurs placés sur le toit.

I.7.2 Caractéristiques de fonctionnement de la station :

I.7.3 Caractéristiques générales :

- Altitude 760 m.
- Température ambiante :
 - Minimum en Hiver 0 °C
 - Max en été 40 °C
- Humidité relative 34 à 40 %

I.7.3 Conditions de fonctionnement nominales :

- Pression du gaz à l'entrée de la station 70 bars
- Température du gaz à l'entrée de la station 45 °C
- Pression du gaz à la sortie de la station 350 bars
- Température du gaz à la sortie de la station 100 °C (max)
- Le taux de compression 08

I.8 Composition du gaz à comprimer :

Le tableau (1) donne la composition du gaz dans le cas design :

Composants	Composition moléculaire %	Composition moléculaire %
N ₂	5,9	5,68
CO ₂	0,21	0,20
CH ₄	83,22	80,18
C ₂ H ₆	7,87	7,62
C ₃ H ₈	1,97	3,82
iC ₄ H ₁₀	0,28	0,90
nC ₄ H ₁₀	0,39	1,45
iC ₅ H ₁₂	0,06	0,06
nC ₅ H ₁₂	0,06	0,06
C ₆ H ₁₄	0,02	0,02
C ₇ ⁺	0,02	0,01
Poids moléculaire	18,84	20

Teneur en eau	≤ 50 p.p.m.	≤ 50 p.p.m.
---------------	-------------	-------------

Tableau (I.1) : La composition du gaz dans le cas design

I.9 Capacité de la station sud :

La capacité de la station, avec toutes ses unités de compression en marche (9 unités du 1^{er} étage et 9 unités du 2^{ème} étage donc 9 lignes) est la suivante :

A une température ambiante = 34°C

Poids moléculaire du gaz	18,84	20
La masse volumique kg/m ³ à 20°C	0,784	0,832
Débit réinjecté m ³ /h	3 787 884	3 787 884
Débit réinjecté kg /h	2 969 940	3 153 105

Tableau (I.2) : Débit du gaz réinjecté donné par le constructeur.

Débit réinjecté = 3 787 884 S m³ / h

Soit : 90 * 10⁶ S m³ / J qui vaut 30 Milliards Sm³ / an.

La régulation du débit se fait en variant le nombre de tours des unités de compression.

Cas actuel :

Pression d'aspiration de 2^{ème} étage: 150 bars.

Pression de refoulement : ne dépasse pas : 310 bars.

Moyenne de fonctionnement de la station année 2010 : 05 lignes (10 machines).

Température sortie station : 80 °C.

Débit réinjecté année 2010 : 20 Milliards S m³.

Taux de compression : 6,5

Composition actuelle :

Le tableau donne la composition du gaz actuelle qui est presque la même de celle donnée par le constructeur :

Composants	Composition mol %	
	Cas été	Cas hiver
N ₂	5,58	5,62
CO ₂	0,26	0,27
CH ₄	82,8	82,33
C ₂ H ₆	8,47	8,42
C ₃ H ₈	1,97	2,22
iC ₄ H ₁₀	0,28	0,36
nC ₄ H ₁₀	0,41	0,55
iC ₅ H ₁₂	0,08	0,08
nC ₅ H ₁₂	0,09	0,08
C ₆ ⁺	0,06	0,07
Poids moléculaire	18,75	19,07

Teneur en eau (ppm)	46	44
---------------------	----	----

Tableau (I.3) : Composition du gaz actuelle.

I.10 Unité de compression :

L'unité de compression comprend :

I.10.1 Turbocompresseur du 1^{er} étage :

- Turbine : Model MS 5002 B construite par NUOVO PIGNONE sous licence GENERAL ELECTRIC, cycle simple a 2 arbres (voir la description de la turbines).
- Multiplicateur : du type avec axes parallèles, construit par MAAG.
- Compresseurs : Modèle BCL 405 /a, construit par NUOVO PIGNONE.

I.10.2 Turbocompresseur 2^{ème} étage :

- Turbine : Identique à celle du 1^{er} étage.
- Multiplicateur : Identique à celui du 1^{er} étage.
- Compresseur : Mode 405/c, construit par NUOVO PIGNONE, du type BARREL pour de très hautes pressions.

I.11 Composantes principales de la station :

Se référant au plan SOK 57000/0, Planimètre générale de la Station, les composantes principales de la station sont :

- 01 préséparateur.
- 01 groupe de 4 séparateurs installés en parallèle pour le gaz de process.
- 09 turbocompresseurs 1^{er} étage (B.P).
- 09 turbocompresseurs 2^{ème} étage (H.P).
- 04 groupes d'aéroréfrigérants pour le refroidissement du gaz et de l'huile.
- 01 turbogénérateur.
- 01 unité de transfert et d'épuration de l'huile.
- 01 unité de la production d'air comprimé pour instruments et services.
- 01 groupe de traitement des eaux.
- 01 unité de refroidissement de l'eau.
- 02 unités de production du gaz inerte.
- Système anti-incendie par des agents chimiques.
- Système anti-incendie à eau.
- Système de torche.
- Système de distribution de l'énergie électrique.
- Bâtiments pour turbocompresseurs, tableaux et services.

I.12 Description du système de gaz :**I.12.1 circuit gaz de process :****I.12.2 Section d'aspiration 1^{ier} étage et scrubbers :**

Le gaz rentre dans la station à une pression de 70 bars, à travers deux connexions 36 “ qui se relie au collecteur d'aspiration 52 “.

Successivement le gaz rentre dans le récipient vide FA -201, qui sert de préséparateur pour séparer d'éventuelles grosses gouttelettes de liquide entraîné par le débit du gaz. Ce gaz rentre

dans les scrubbers à chicanes FA 202-203-204-205, placés en parallèle et capable de séparer les petites particules de liquide entraînées par le gaz. A la sortie des scrubbers, le gaz est envoyé aux machines.

Toutes les décharges des liquides séparés sont collectées dans le manifold des hydrocarbures 6" et envoyées à l'extrémité de la station pour une éventuelle récupération.

Toutes les décharges des soupapes de sécurité et des vannes de mis à l'air sont collectées dans la ligne 20" qui mène le gaz loin de la station, dans la clôture, ou le gaz est brûlé dans la torche. Il faut remarquer que le gaz pour des services spéciaux (gaz combustible et de démarrage du turbogénérateur TG 202, et du gaz aux pilotes des torches) est prélevé de la ligne 52" par la ligne 3".

I.12.3 Unité de compression 1^{er} étage :

Le gaz rentre dans le compresseur centrifuge où il est comprimé à une pression de 150 bars ; le compresseur est entraîné par la turbine à gaz, type MS 5002 b, à travers le multiplicateur à 02 axes horizontaux. Des connections avec des vannes manuelles de drainage sont installées sur la caisse du compresseur ; le gaz qui sort du réservoir de l'huile d'étanchéité est prélevé par la ligne 1" et ensuite envoyé dans le collecteur de traitement du gaz combustible.

I.12.4 Réfrigérant de compression 1^{er} étage :

Le gaz comprimé par le compresseur du 1^{er} étage est refroidi dans le réfrigérant inter étage (ex EA 221) ou l'élément de refroidissement est l'air ambiant. Le réfrigérant est du type "tirage induit" c'est-à-dire l'air est aspiré à travers le banc des tubes ailettes par les ventilateurs placés sur le faisceau tubulaire et ensuite est déchargé en haut grâce à des enceintes placées sur le faisceau et supportant les ventilateurs eux-mêmes. L'unité est constituée par 04 faisceaux tubulaires (en parallèles) formés par des tubes avec ailettes en aluminium encastrées, et par des manifolds tubulaires pour collecter le gaz. 03 ventilateurs sont installés sur chaque 02 faisceaux, pour un total de 06 ventilateurs pour l'unité de 4 faisceaux.

I.12.5 Séparateur 1^{er} étage :

En aval du réfrigérant 1^{er} étage, il y a le séparateur de refoulement 1^{er} étage, du type chicanes, pour la séparation de vapeur d'eau éventuelle, ou bien d'hydrocarbures et de condensats.

I.12.6 Collecteur inter étage :

Tous les refoulements des 9 compresseurs du 1^{er} étage sont reliés au collecteur inter étage 16" installé sur le rack, à côté du collecteur d'aspiration 52".

La décompression du collecteur inter étage en cas d'arrêt normal ou de secours est effectuée par la vanne de mise à la torche VV 201 qui évacue le gaz sur la ligne de torche 20". Les refoulements des compresseurs 2^{ème} étage sont reliés au collecteur final de la station.

I.12.7 Unité de compression 2^{ème} étage :

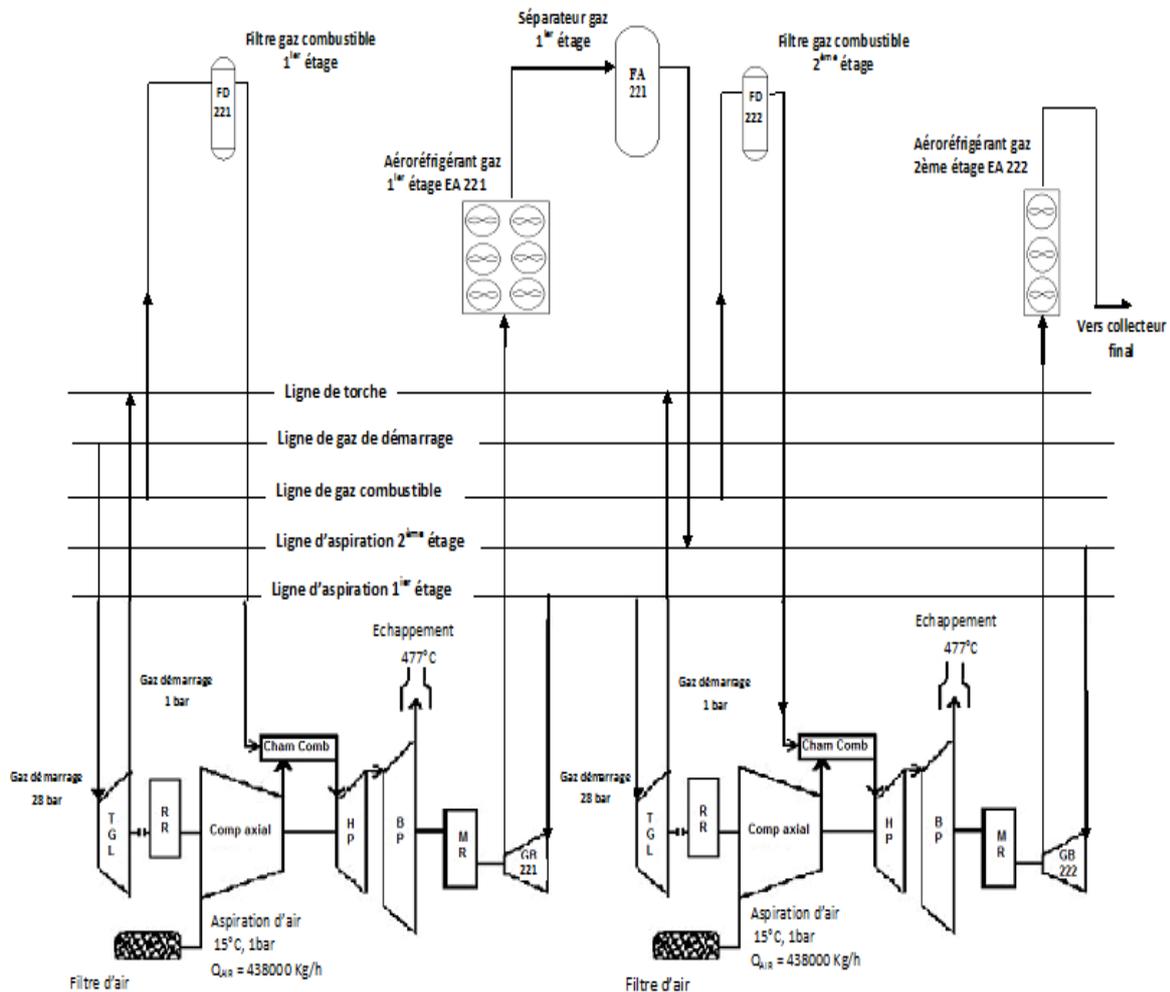
Le gaz rentre dans le compresseur du 2^{ème} étage où il est comprimé à une pression de 350 bars ; le compresseur est entraîné par une turbine à gaz identique à celle du 1^{er} étage grâce au multiplicateur à 02 axes horizontaux. Le compresseur du 2^{ème} étage est muni de drainage de caisse avec des vannes manuelles, et d'une ligne de récupération du gaz, qui évacue l'huile d'étanchéité vers le collecteur 3" qui est relié à l'unité de traitement du gaz combustible.

I.12.8 Réfrigérant du gaz 2^{ème} étage :

Le gaz comprimé par le compresseur de 2^{ème} étage est refroidi dans le réfrigérant final (ex. EA 222) où l'élément de refroidissement est l'air ambiant. L'unité est constituée par deux faisceaux tubulaires identique à celle du 1^{er} étage. Trois ventilateurs sont installés pour les 02 faisceaux, le débit d'air nécessaire au refroidissement peut être assuré par les 02 ventilateurs seulement en cas de panne du troisième. Même principe de description et de transmission du mouvement aux ventilateurs que le réfrigérant 1^{er} étage.

I.12.9 Collecteur final :

Les tuyauteries de refoulement des compresseurs de 2^{ème} et les tuyauteries d'amenée du gaz aux puits sont reliées au collecteur final de la station (20" de diamètre nominal). La décompression du collecteur final en cas d'arrêt normal ou de secours est obtenue par la vanne de mise à la torche VV 251 qui évacue le gaz sur la ligne de torche 20".



Figure(I.9) : Représentation d'une ligne

I.12.10 Circuit de gaz combustible :

Le gaz combustible pour l'alimentation des turbines à gaz est prélevé du collecteur d'aspiration des compresseurs grâce à deux tuyauteries 8" et envoyé à 2 groupes de réduction de pression. Un groupe alimente les turbines à gaz des deux premières bâtiments (8 turbines), le 2^{ème} groupe alimente les deux autres bâtiments (10 turbines).

Chaque groupe de réduction est constitué par 3 vannes de régulation en parallèle : deux en fonctionnement et l'autre de secours. Ces régulateurs maintiennent la pression en aval de 18,3kg/cm² et de 17kg/cm².

Les débits de gaz combustible sont enregistrés sur le tableau auxiliaire de la station par des enregistreurs à 2 plumes, un pour de faibles débits et l'autre pour des débits élevés. Actuellement ils ne fonctionnent plus.

En aval du débit mètre, le gaz récupéré des purgeurs automatiques de l'huile d'étanchéité des compresseurs est injecté pour une nouvelle utilisation.

Le gaz est ensuite envoyé dans un séparateur avec chicanes où des éventuelles gouttelettes d'hydrocarbures liquide sont séparées et purgées à travers le purgeur automatique dans le collecteur de drainage des hydrocarbures. Les soupapes de sécurité, la vanne automatique de régulation de pression en amont tarée à 19 kg/cm^2 qui maintient la pression d'alimentation des turbines en gaz combustible constante, les vannes de mise à la torche sont placées en aval du séparateur. Le gaz combustible est acheminé vers les collecteurs qui alimentent les machines.

Le gaz combustible pour certains services auxiliaires et pour le turbogénérateur de secours est prélevé en amont.

Le gaz est envoyé au séparateur avec chicane FA 210 où les particules d'hydrocarbures liquides sont séparées et drainées. En aval du séparateur, le débit de gaz est partagé en 2 parties :

- gaz aux torches.
- gaz combustible et de démarrage au groupe turbogénérateur de secours.

Le gaz est partagé en 2 débits : une partie à travers les vannes autoréductrices de pression. Le séparateur FA 211 et les filtres à cartouches FD 220 A/B fournissent le gaz combustibles à la turbine ; l'autre partie à travers les vannes autoréductrices de pression, et le séparateur FA 212 fournit le gaz de démarrage à la turbine.

I.12.11 Circuit gaz de démarrage :

Le gaz de démarrage, commun à toutes les turbines à gaz, est prélevé du collecteur d'aspiration des compresseurs, un groupe de réduction et de séparation alimente toutes les machines à travers un seul collecteur 6".

Le gaz est envoyé dans un séparateur avec chicane, où des gouttes éventuelles d'hydrocarbures liquides sont séparées ; le gaz est acheminé vers le collecteur 6", d'où chaque machine prélève le gaz au moment du démarrage.

I.12.12 Système de torche :

Le système de torche a été étudié pour faire face aussi bien au fonctionnement normal de la station, qu'à toute situation de secours (intervention des soupapes de sécurité, dépressurisation des unités de compression jusqu'à la dépressurisation totale de la station). Ce système est constitué par 5 collecteurs de torche qui acheminent le gaz vers 5 torches du type John Zink placées à 500 m environ de la station. Toutes les décharges des soupapes de sécurité, des vannes de dépressurisation de différents circuits, des vannes de régulation des circuits de gaz combustible et de démarrage et des turbines de lancement sont acheminées vers le collecteur de torche. Chaque torche est munie d'un pilote d'allumage placé dans une enceinte à 2,80 m environ de la torche elle-même.

I.12.13 Unité de détente (Turbine à gaz) :**Caractéristiques de fonctionnement et de construction :**

Les compresseurs sont entraînés par des turbines à gaz de construction NUOVO PIGNONE, sous licence General Electric Company (U.S.A). Il s'agit de machines de type classique, bi-arbre, du type MS 5002 B (série "5000" de la GECO, gamme 15.000 à 35,000 BHP). Ces turbines sont de conceptions générales identiques et étudiées pour délivrer une puissance unitaire de 35,000 BHP (26.100 KW) dans les conditions ISO c'est-à-dire pour :

- Une température ambiante de 15°C (59 °F).
- Une pression atmosphérique de 760 mm Hg (14.7 PSIA).

Sur site, et dans les conditions suivantes :

- Température ambiante 45° C (113 °F).
- Pression atmosphérique 750 mm Hg (14.5 PSIA).
- Perte de charge 4 mm H₂O à l'aspiration et 5 mm H₂O à l'échappement.

La puissance unitaire de ces turbines dans ces conditions est de 23,838 BHP (17.800 KW).

Ce type de turbine comprend 3 parties principales :

- Compresseur d'air, du type axial à 16 étages.
- Dispositifs d'admission du gaz combustible et chambres de combustion, dont le nombre est égale à 12.
- Turbine constituée essentiellement de deux roues (2 étage) dont l'aubage est réalisé en alliage spécial, particulièrement conçu pour des hautes températures.

Ces aubes reçoivent de l'air par intérieur, pour améliorer leur refroidissement, la 1^{ère} roue (haute pression) est calée sur l'arbre du compresseur axial auquel elle transmet la puissance ; la 2^{ème} roue (basse pression) est calée sur l'arbre de puissance au niveau de la sortie. Il existe donc deux ensembles : (A) arbre avec compresseur axial et roue de turbine HP, l'arbre est supporté par deux coussinets portants en alliage antifriction et pourvu d'un palier de butée ; (B) arbre avec roue de la turbine BP constituant l'arbre de puissance, qui est supporté par 2 coussinets portants en alliage antifriction et qui est pourvu d'un palier de butée.

I.14 Le principe de fonctionnement :

L'air ambiant extérieur entre (filtres d'aspiration d'air) à l'intérieur du compresseur et en sort pour y être mélangé au gaz combustible (chambres de combustion) où après la phase de combustion, l'énergie qui en résulte provoque la rotation de la turbine. Une partie de cette énergie est absorbée par le compresseur d'air tandis que l'autre est disponible à l'extrémité de l'arbre, pour l'entraînement de la machine réceptrice.

Les gaz brûlés sont évacués à l'atmosphère (conduit d'échappement de la turbine). La consommation d'une turbine en gaz combustible est de 6930 Nm³/h (soit 166300 Nm³/j).

I.15 Dispositifs de lancement des turbines à gaz :

Le lancement de ces machines nécessite d'un appareillage auxiliaire, monté sur le châssis de celles-ci et constitué par une petite turbine dite "de détente" type RLH-24.

Chacune de ces turbines est capable d'une puissance de 500 BHP à 3000 tr/min.

Le fluide moteur est constitué par le gaz dit "de démarrage" provenant de la ligne d'aspiration de la station située en aval des séparateurs FA201÷FA205.

Ce gaz entre dans la turbine à une pression de 28kg/cm², et en sort, après détente, à une pression de 0.7 kg/cm². La durée normale d'une opération de lancement est de 10 minutes et nécessite un débit de gaz de 4500 Nm³ par turbine.

II. Les gaz à effet de serre

II.1 Introduction :

L'atmosphère, c'est surtout de l'oxygène et de l'azote. Ces deux gaz laissent passer les rayonnements, visible et infrarouge. D'autres gaz laissent passer le visible, mais absorbent une partie des infrarouges et les soustraient ainsi au rayonnement terrestre repartant dans l'espace. Ce sont les gaz à effet de serre, responsables de l'effet de serre.

II.2.1 Définition de l'Effet de serre :

L'effet de serre, dont le principe est détaillé plus bas, est engendré par l'émission de GES (gaz à effet de serre). Bien souvent donné en GES équivalent CO₂, car le dioxyde de carbone n'est pas le seul GES anthropique (d'origine humaine) responsable de l'effet de serre mais le premier et le plus connu. Cette partie permet de poser les bases scientifiques et économiques des réflexions qui suivront en matière de réglementation. Comprendre la nature de ce phénomène et identifier les relations de causes à effet qui interagissent avec notre modèle de société actuel est une clef pour la compréhension et la bonne interprétation des mesures prises pour tenter de sauvegarder notre environnement.

II.2.2 Principes :

Environ 10 % du rayonnement qui nous vient du soleil parvient à pénétrer dans l'atmosphère pour se réfléchir sur le sol terrestre en réchauffant notre planète. Une fois « absorbé » par le sol, ce rayonnement se transforme et il est renvoyé sous forme « d'infrarouges ». Ce rayonnement avec une longueur d'onde plus courte restera en partie prisonnier à la surface de notre planète en fonction de la quantité de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère.

L'effet de serre à proprement parlé est un phénomène essentielle pour que la vie se développe sur terre. Sans ces gaz la température globale sur terre serait de -18°C au lieu de 15°C actuellement.

Le bilan thermique de la planète étant le résultat d'un équilibre fragile, le problème actuel est ne pas amplifier cet effet naturel à moins de courir le risque d'un changement brutal du climat.

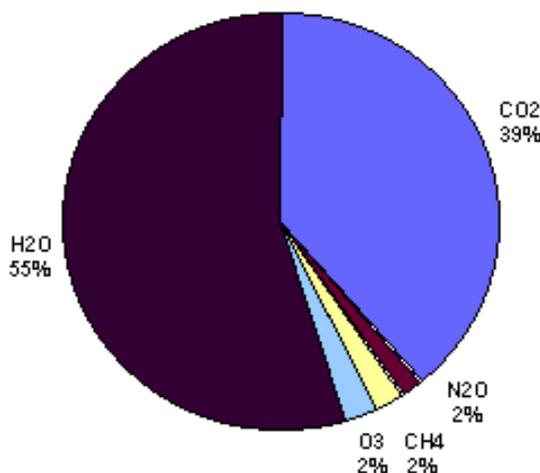
D'après les experts du GIEC (le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), d'ici 2100 et selon différents scénarios liés au développement de la société, le réchauffement pourrait atteindre 1,4 à 5,8°C et le niveau de la mer monter de 9 à 88cm, principalement sous l'effet de dilatation thermique de l'eau et de la fonte de calottes glaciaires. La hausse de température devrait provoquer des cycles hydrologiques plus vigoureux, c'est-à-dire des sécheresses (en Australie, Amérique Centrale et l'Afrique du sud), et des inondations plus sévères à travers une variation des précipitations de 5 à 20%. Une évolution rapide et soutenue du climat pourrait également modifier l'équilibre entre les espèces, et provoquer un dépérissement des forêts, qui sont notamment des puits de carbone.

II.2.3 Les principaux gaz à effet de serre sont :

- La vapeur d'eau (H_2O),
- Le dioxyde de carbone (CO_2),
- Le méthane (CH_4),
- Le protoxyde d'azote (N_2O),
- Les hydrofluorocarbures (HFC),
- Les perfluorocarbures (PHC),
- L'hexafluorure de soufre (SF_6).

II.2.4 les gaz qui font le plus d'effet de serre :

Le gaz qui fait le plus d'effet de serre est la vapeur d'eau qui représente 55% :



Figure(II.1) : Répartition des contributions à l'effet de serre des différents gaz présents dans l'atmosphère en 1992. Source : GIEC selon [15]

Mais si l'on se limite à l'effet de serre d'origine humaine, que l'on appelle parfois effet de serre "additionnel" (parce qu'il se rajoute à celui d'origine naturelle), ou anthropique, il est causé :

- pour 65% par le gaz carbonique. Il y a bien sûr des émissions naturelles (notre respiration, celle des animaux, une partie de la putréfaction, les incendies naturels...). Leur émission anthropique, provient essentiellement de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), certaines industries par exemple pour la production de ciment,.....
- pour 20% par le méthane. Le méthane est un gaz (c'est le fameux "gaz naturel") qui se forme dès qu'un composé organique (un animal, une plante) pourrit, particulièrement si cette putréfaction se passe sans air (en fait sans oxygène), par exemple au fond de l'eau ou sous terre.

Les réserves de gaz naturel ne se sont pas formées autrement que par la décomposition, il y a très longtemps, de plantes et d'animaux. Une partie du méthane présent dans l'atmosphère est donc d'origine parfaitement naturelle : ce n'est pas l'homme qui est responsable du pourrissement.

Mais l'homme y rajoute sa part. Le méthane d'origine humaine provient :

- De l'élevage des ruminants (vaches, moutons, chèvres,...), car leur digestion inclut de la putréfaction
- De la culture du riz, car les zones humides en général émettent du méthane (comme nos marécages : les feux follets ne sont rien d'autre que la combustion spontanée du méthane produit au fond des marécages, là où les plantes pourrissent sans air)
- Des décharges d'ordures ménagères (encore le pourrissement) et du compostage
- Des exploitations pétrolières et gazières, à cause des fuites de gaz naturel.
Pour 10% par les halocarbures (pas d'émissions naturelles). Ces gaz sont utilisés :
- Auparavant comme gaz propulseurs (les fameux CFC de nos bombes aérosol d'insecticide ou de "sent-bon"), maintenant progressivement interdits par la convention de Montréal car ils sont aussi responsables de la diminution de l'ozone en haute altitude.
- Actuellement comme gaz réfrigérants (dans les systèmes de climatisation et les chaînes du froid) ; les émissions proviennent désormais essentiellement des fuites et mise à la décharge des systèmes de climatisation.
- Dans certains procédés industriels (fabrication de mousses plastiques, mais aussi de composants d'ordinateurs).
- Pour 5% par le protoxyde d'azote (N_2O). Pour ce gaz il y a aussi des émissions naturelles qui proviennent essentiellement des zones humides (et aussi...des termites). La part "humaine" (anthropique) provient :
- De l'utilisation des engrais azotés en agriculture.
- De certains procédés chimiques.
- Pour environ 5% par l'ozone (O_3) troposphérique. L'ozone est une variante de l'oxygène (une molécule d'ozone comporte 3 atomes d'oxygène au lieu de 2 pour le gaz "oxygène" normal) qui est naturellement présent dans l'atmosphère. Selon l'endroit où il se trouve il nous intéresse beaucoup ou il nous est nuisible :
- Dans la haute atmosphère, où l'on parle d'ozone stratosphérique (la stratosphère est la couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km d'altitude), il arrête les ultraviolets du soleil ; il nous y est très utile (sans cette couche d'ozone stratosphérique la vie n'existerait peut-être pas sur Terre).
- Dans nos villes, il est un polluant local très agressif ; il n'y est donc pas souhaitable. L'ozone troposphérique (la troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère, celle qui "touche" le sol) est l'un des composants de la pollution locale, et provient indirectement de la combustion d'hydrocarbures. Ce terme de l'effet de serre est donc - outre le CO_2 - une conséquence du transport (terrestre, mais aussi aérien, on y revient plus loin).

Depuis le début de l'ère industrielle, c'est-à-dire depuis l'année 1750 environ, ce que nous avons mis dans l'atmosphère a pour effet d'introduire un "forçage radiatif" de l'ordre de 1% du rayonnement reçu.

Dit autrement, à travers ses émissions de gaz à effet de serre l'homme a modifié la situation "comme si" le soleil avait augmenté sa puissance de 1%. Cela peut paraître peu. Pourtant, compte tenu des énergies considérables qui sont en jeu, de la fragilité de certains équilibres naturels, et du

fait que ces effets agissent sur de longues périodes, c'est très significatif pour notre avenir, comme on le verra plus loin.

II.2.5 la période de circulation des gaz dans l'atmosphère :

Les gaz à effet de serre, une fois dans l'atmosphère, n'y restent cependant pas éternellement. Ils peuvent être retirés de l'atmosphère :

Soit par suite d'un phénomène physique. Par exemple la pluie (condensation), enlève de la vapeur d'eau de l'atmosphère.

Soit par suite d'un phénomène chimique. Par exemple la photosynthèse des plantes enlève du gaz carbonique de l'atmosphère.

Soit par suite d'un phénomène radiatif. Par exemple les rayons cosmiques (qui sont de même nature que les rayons émis par une source radioactive) "cassent" des molécules dans la haute atmosphère. Les halocarbures disparaissent de cette façon (ce sont généralement des molécules trop stables pour disparaître par réaction chimique dans l'atmosphère).

Mais la très mauvaise surprise, c'est que mis à part la vapeur d'eau qui s'évacue en quelques jours, les gaz à effet de serre mettent très longtemps à s'en aller de l'atmosphère. Ce n'est pas facile de savoir avec précision combien de temps est nécessaire, car l'atmosphère est un système très complexe, faisant intervenir tout un ensemble de phénomènes (physiques, chimiques, biologiques...), dont les scientifiques n'ont pas encore percé tous les mystères, même s'ils en savent assez pour nous mettre en garde. Cela étant, on a désormais une estimation de la durée de séjour, c'est-à-dire du temps qui est nécessaire à ce que le gaz en surplus disparaisse de l'atmosphère, pour les principaux d'entre eux.

Le tableau suivant donne la composition des gaz à effet de serre, leur durée de vie dans l'atmosphère :

Gaz à effet de serre	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère	Concentration préindustrielle	Concentration actuelle
Vapeur d'eau	< 1	3‰	3‰
Gaz carbonique	De 100 jusqu'à 200 ans	278 ppm	384 ppm
Méthane	12 ± 3 ans	0,7 ppm	1,7 ppm
Protoxyde d'azote	120 ans	0,275 ppm	0,311 ppm
Halocarbures	jusqu'à 50.000 ans	0	0,070 ppb

Tableau (II.1) : Composition et durée de vie des principaux GES selon [15]

On voit immédiatement ci-dessus que l'essentiel des gaz que nous émettons aujourd'hui, y compris le gaz carbonique que nous avons par exemple émis ce matin en venant travailler en

voiture, ou hier en faisant fonctionner la chaudière, sera encore au-dessus de la tête de nos petits-enfants dans 1 ou 2 siècles.

II.2.6 La façon de comparaison entre ces gaz :

Afin de pouvoir faire des comparaisons, on a la possibilité de calculer, pour chacun des gaz à effet de serre, un "pouvoir de réchauffement global" ou PRG, qui permet de savoir de combien on augmente l'effet de serre lorsque l'on émet un kg du gaz considéré.

Ce PRG tient compte de deux données : les raies d'absorption dans l'infrarouge du gaz considéré (qui donnent la "puissance" instantanée) et sa durée de vie dans l'atmosphère (qui donne la durée sur laquelle il faut intégrer la "puissance" pour obtenir un impact énergétique à terme). Il s'exprime en Watts par mètre carré.

On a aussi coutume de tout ramener au gaz carbonique, et de parler alors de PRG relatif. Par définition le PRG relatif du gaz carbonique vaut 1, et on regarde ce qu'il vaut pour les autres gaz. On obtient le tableau suivant (les Perfluorocarbures et Hydrofluorocarbures sont des halocarbures particuliers).

Le tableau suivant montre le pouvoir de réchauffement des gaz à effet de serre :

Gaz	Formule	PRG relatif / CO ₂
Gaz carbonique	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	21
Protoxyde d'azote	N ₂ O	310
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	6500 à 8700
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	140 à 11700
Hexafluorure de soufre	SF ₆	23900

Tableau (II.2) : Pouvoir de réchauffement global des GES par rapport au CO₂ selon : [15]

Ce que signifie le tableau ci-dessus, c'est donc que si on met 1 Kg de méthane dans l'atmosphère, on fait 21 fois plus d'effet de serre que si on met 1 Kg de gaz carbonique.

Si on met 1 Kg d'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère, on fait 23.900 fois plus d'effet de serre que si on met un kg de gaz carbonique : pour l'effet de serre un kg de ce gaz "vaut" 23,9 tonnes de CO₂.

II.3 Effets de toxicologie, écotoxicologie du CO₂ :

Outre le fait que les émissions de CO₂ s'accompagnent généralement d'émissions de suies, de fumées, de métaux lourds, et d'autres polluants ayant des effets sur la plupart des organismes

vivants, les nanoparticules ont des effets encore très mal étudiés, mais qui semblent pouvoir être non négligeables.

- Chez l'animal:

Le CO₂, à la différence du monoxyde de carbone, n'est pas un toxique à faible dose, mais il tue par asphyxie à partir d'un certain seuil et d'une certaine durée d'exposition. Ses propriétés chimiques le rendent capable de rapidement traverser de nombreux types de membranes biologiques (il est environ 20 fois plus soluble dans les liquides biologiques de l'organisme humain que l'oxygène). C'est pourquoi il produit de rapides effets sur le système nerveux central.

- Chez l'homme :

Le CO₂ est toxique pour l'Homme à des doses relativement faibles et pour des temps d'exposition de quelques minutes seulement.

- 1000 ppm (0,1%) est la valeur maximale admise pour le dimensionnement des systèmes de conditionnement de l'air, à l'intérieur des bâtiments et maisons d'habitation.

- À partir de 0,1 %, (1000 ppm), le CO₂ devient un des facteurs d'asthme.

- Au dessus de 0,5% (5000 ppm), la valeur maximale d'exposition professionnelle retenue dans la plupart des pays, et la valeur maximale admise pour le dimensionnement des appareillages d'air conditionné dans les avions sont dépassées.

- Trois fois ce taux (1,5%, ou 15000 ppm) : est la valeur maximale d'exposition professionnelle sur une durée maximale de 10 minutes.

- Au delà de 4% de CO₂ dans l'air (40000 ppm) : le seuil des effets irréversibles sur la santé est atteint (c'est le seuil qui justifie une évacuation immédiate de locaux).

- A partir de 10% et d'une exposition dépassant 10 minutes, sans une action médicale de réanimation, c'est la mort.

Notre système respiratoire et circulatoire est très sensible au CO₂ : Une augmentation minime de la concentration en CO₂ de l'air inspiré accélère quasi-immédiatement le débit respiratoire qui est normalement de 7 litres/minute (sous 0,03% de CO₂ dans l'air inspiré), et qui passe à 26 litres/minutes (pour 5% de CO₂ dans l'air inspiré).

- Chez le végétal :

À faible dose, le CO₂ favorise dans un premier temps la croissance, mais des expériences en serre, et dans un environnement naturel enrichi en CO₂ ont montré que ceci n'était valable que jusqu'à un certain seuil, au delà duquel la croissance restait stable ou au contraire diminuait.

Ce seuil varie selon les espèces végétales considérées. On ignore de même si cet effet est durable ; après quelques années, des phénomènes d'acidification environnementale pourraient éventuellement agir en sens inverse.

Les écologues et les spécialistes de la chimie de l'atmosphère ont confirmé dans les années 1990 que l'excès de dioxyde de carbone (CO₂) était une forme de pollution. Le CO₂ répond à deux définitions officielles du polluant (altéragène chimique) et du polluant de l'air (substance introduite directement ou indirectement par l'homme dans l'air ambiant et susceptible d'avoir des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement dans son ensemble).

Le CO₂ est un gaz à effet de serre, qui augmente l'effet de serre et donc agit dans le processus de réchauffement climatique. Il contribue aux phénomènes de pluies acides et d'Acidification de l'océan.

II.4 Le Dioxyde de Carbone et ses émissions.

II.4.1 Définition :

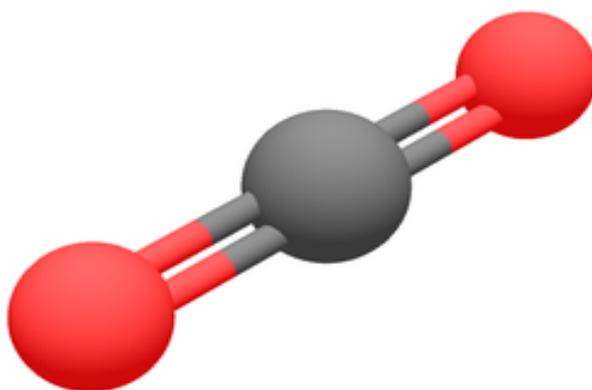
Le dioxyde de carbone (appelé parfois, de façon impropre « gaz carbonique ») est un composé chimique composé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène et dont la formule brute est : CO₂.

En 1776, le chimiste français Antoine-Laurent De Lavoisier mit en évidence que ce gaz est le produit de la combustion du carbone avec l'oxygène. Dès 1875 se répandirent les premières boissons artificiellement gazeuses grâce à l'invention des récipients pressurisés. Cette molécule linéaire a pour formule développée de Lewis : O=C=O.

Dans les conditions normales de température et de pression le dioxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et a la saveur piquante communément appelée gaz carbonique ou encore anhydride carbonique.

Il est présent dans l'atmosphère dans une proportion approximativement égale à 0,0375 % en volume, dans cette décennie (années 2000), soit 375 ppmv (parties par million en volume). Mais elle augmente rapidement, d'environ 2 ppmv/an, de par les activités humaines de consommation des combustibles fossiles : charbon, pétrole, gaz.

C'est un gaz à effet de serre. Il est produit notamment lors de la fermentation aérobie ou de la combustion des énergies fossile, et lors de la respiration des êtres vivants et des végétaux. Pour ces derniers, la photosynthèse piège beaucoup plus de CO₂ que sa respiration n'en produit.



Représentation 3D du Dioxyde de Carbone

II.4.2 Caractéristiques physiques :

Le tableau suivant illustre les propriétés et les caractéristiques physiques du CO₂ :

Formule chimique	CO ₂
Masse moléculaire	44.01 g.mol ⁻¹
Température critique	31,1°C
Pression critique	74 atm
Point triple	-56,6 °C à 519 kPa
Chaleur latente de vaporisation (0 °C)	234,5 kJ.kg ⁻¹
Chaleur latente de vaporisation (-16.7 °C)	276,8 kJ.kg ⁻¹
Viscosité	0.07 CP à -78 °C
Chaleur latente de vaporisation (-28.9 °C)	301.7 kJ.kg ⁻¹
Chaleur latente de fusion (à -56,6 °C)	199 kJ.kg ⁻¹
Température de fusion	-78,5 °C (195 K)
Solubilité	1,45 kg.m ⁻³
Densité	1,87 kg.m ⁻³ (gaz à 298 K 1 bar)
$\Delta_f H_{\text{gaz}}^0$	-393,5 kJ.mol ⁻¹

Tableau (II.3) : Les caractéristiques physiques du dioxyde de carbone.

II.4.3 Solubilité du CO₂ :

Le CO₂ dissous dans l'eau forme avec elle de l'acide carbonique (H₂CO₃). L'acide carbonique n'est que modérément stable et il se décompose facilement en H₂O et CO₂. En revanche, lorsque le dioxyde de carbone se dissout dans une solution aqueuse basique (soude, potasse...), la base déprotone l'acide carbonique pour former un hydrogénocarbonate (HCO₃⁻), aussi appelé bicarbonate, puis un carbonate (CO₃²⁻). Dans ce cas, la solubilité est énormément augmentée.

II.5 Utilisations :

Le CO₂ peut servir à beaucoup de choses dont le principal est l'extinction des feux. Beaucoup de datacenters (salles de serveurs d'ordinateurs) ou de salles des archives sont équipées d'un système qui, en cas d'incendie, remplit la salle de CO₂ ce qui a comme effet d'éteindre le feu. Il est aussi utilisé en aquariophilie pour une meilleure croissance des plantes. Il peut aussi être utilisé sous forme liquide.

- Forme liquide :

Sous forme liquide, il est utilisé comme :

- Réfrigérant pour congeler certains aliments.

- Réfrigérant dans l'industrie électronique.
- Agent d'extinction dans les extincteurs dits « au dioxyde de carbone », on parle parfois de neige carbonique parce que le CO₂ liquide se solidifie immédiatement à la sortie de l'extincteur en produisant une poudre blanche.
- Agent propulseur (et parfois également carbonatant) pour les boissons servies à la pression.

A noter : à pression atmosphérique, le dioxyde de carbone n'est jamais sous forme liquide. Il passe directement de la forme solide à la forme gazeuse (sublimation).

- Forme solide :

Le dioxyde de carbone sous forme solide ou glace carbonique appelée aussi Carboglace ou glace sèche est issue du CO₂ liquide sous forme de neige carbonique qui est ensuite compactée pour devenir glace carbonique. Cette glace carbonique se sublime en ne laissant aucun résidu et produit très rapidement une grande quantité de froid (150 fr/h/kg à -78,5 °C), l'homme lui a donc rapidement trouvé de multiples utilisations.

- Sous forme de "pellets" (de la taille d'un grain de riz 3 mm de diamètre) : essentiellement pour le nettoyage et le décapage cryogénique.
- En "sticks" (bâtonnet de 16 mm) : pour la conservation, le transport des produits sous température dirigée (produits pharmaceutique, transport de surgelés, transport d'échantillons etc.).
- Pour la recherche fondamentale ou appliquée.
- Pour la vinification : ralentit la fermentation et évite l'oxydation.
- En "Plaquette" ou en "blocs" pour le ravitaillement aérien (catering), les traiteurs, les pompes funèbres etc.
- En "pains" pour faire de la fumée épaisse (effets spéciaux, cinéma, vidéo).

II.6 Les émissions de CO₂ :

Les rejets de dioxyde de carbone ont deux origines, naturelle, et anthropique, la seconde étant en régulière et forte croissance depuis quelques décennies. Le taux actuel moyen de l'air oscille autour de 0,038% avec quelques variations jour-nuit, saisonnières ppm (pour partie anthropique) et des pics de pollution.

II.7 Types d'émission :

On distingue :

II.7.1 Les émissions anthropiques :

Ce sont les chauffages, véhicules, unités d'incinération et différents types de combustion ou fermentation. Les moteurs et unités de combustion normaux émettent des effluents gazeux (cheminées, pots d'échappement, réacteurs d'avions..) contenant en moyenne 20 % de CO₂, lequel se dilue rapidement dans l'air, sauf dans certaines zones confinées (garage..).

Ce CO₂ pourrait par ailleurs agir sur la santé et l'environnement en synergie avec d'autres polluants ; NO_x et certaines micro et nanoparticules notamment). A ceci il faut ajouter l'expiration de plus de six milliards d'habitants, qui correspond en fait à un très faible pourcentage du total).

II.7.2 Les émissions naturelles :

Qui sont d'origine volcanique, ou liée aux incendies de forêts, ou plus largement à la respiration animale et végétale et à celle des organismes du sol (fonge, bactéries, protozoaires..). Ce CO₂ représente la plus grande part, et il ne pose normalement pas de problème majeur de

toxicité, hormis dans quelques cas très particulier (accumulation de poche de CO₂ dans des creux, par exemple lors d'émissions brutales, d'origine géologique, de CO₂ issus d'un dégazage brutal de gaz piégé sous les sédiments de fonds de lacs africains ; dans ce cas des centaines de milliers d'animaux et des centaines d'humains peuvent mourir asphyxiés dans les vallées périphériques).

II.7.3 Les émissions mondiales :

Les émissions mondiales de dioxyde de carbone attribuables à l'utilisation des combustibles fossiles (1950-1994) sont représentées sur la figure suivante :

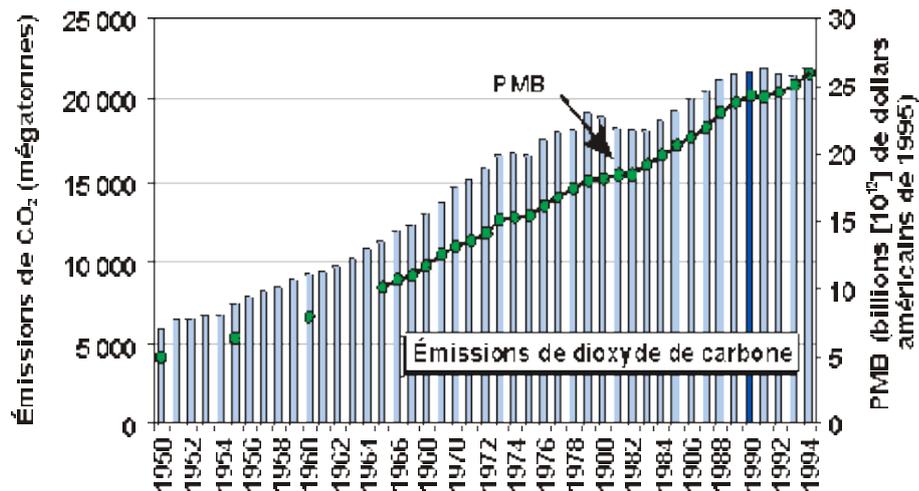


Figure (II.2) : Les émissions de CO₂ mondiales périodes (1950 – 1994) établi par GIEC selon : [16]

II.8 Surveillance des émissions :

Plusieurs pays (USA notamment) surveillent leur taux de CO₂. Le taux de CO₂, comme celui du dioxygène ne sont pas mesurés par les réseaux d'alerte et de mesure. Le protocole de Kyōto (1999) aujourd'hui signé par une majorité de pays a établi un calendrier de réduction des émissions de ce gaz.

La figure suivante donne les pourcentages des permis européens d'émission de CO₂

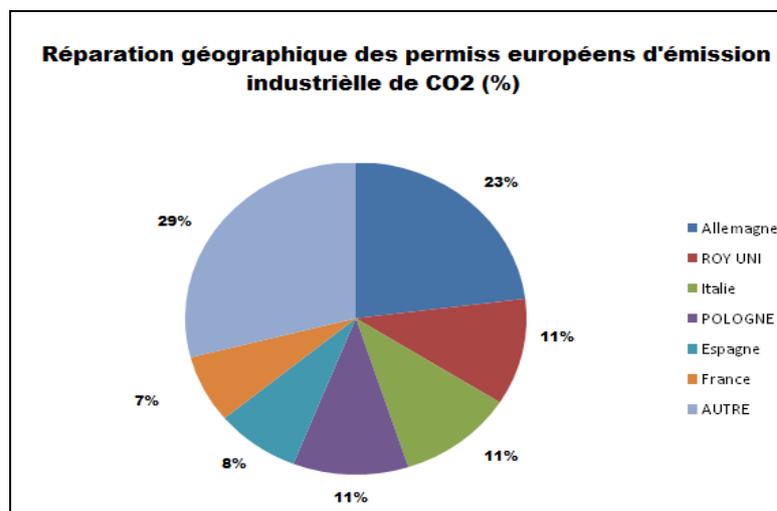


Figure (II.3) : Les pourcentages des permis européens d'émission de CO₂ selon [17]

II.8.1 Le Protocole de Kyoto :

La gouvernance internationale sur le climat repose sur trois traités internationaux fondamentaux : la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC ou UNFCCC en anglais), ouverte à ratification en 1992, et entrée en vigueur le 21 mars 1994, a été ratifiée à ce jour par 189 pays dont les États-Unis et l'Australie. Son traité fils, le protocole de Kyoto, a été ouvert à ratification le 16 mars 1998, et est entré en vigueur en février 2005. Il a été ratifié à ce jour par 172 pays à l'exception notable des États-Unis.

Tous les pays membres de la convention climat ont pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Ils se sont collectivement engagés à prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Concrètement, tous les pays ont l'obligation de publier des inventaires de leurs émissions de gaz à effet de serre, d'établir, de mettre en œuvre et de publier des programmes nationaux contenant des mesures visant à atténuer les changements climatiques. Le protocole de Kyōto va plus loin car il propose un calendrier de réduction des émissions des 6 gaz à effet de serre qui sont considérés comme la cause principale du réchauffement climatique des cinquante dernières années. Il comporte des engagements absolus de réduction des émissions pour 38 pays industrialisés, avec une réduction globale de 5,2 % des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990.

II.9 Évolution des émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2004 :

Voici représenté dans le tableau (II.4), l'évolution des émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2004, avec les objectifs nationaux de réduction des émissions pour la période 2008-2012 entre parenthèses :

Pays	% Réduction des émissions de CO ₂ d'ici 2012
Allemagne : -17 % (-21%)	-17 % (-21%)
Canada : +27 % (-6%)	+27 % (-6%)
Espagne : +49 % (+15%)	+49 % (+15%)
États-Unis d'Amérique : +16 %	+16 %
France : -1.7 % (0%)	-1.7 % (0%)
Grèce : +27 % (+25%)	+27 % (+25%)
Irlande : +23 % (+13%)	+23 % (+13%)
Japon : +6.5 % (-6%)	+6.5 % (-6%)
Royaume Uni : -14 % (-12.5%)	-14 % (-12.5%)
Portugal : +41 % (+27%)	+41 % (+27%)

Tableau (II.4) : Evolution des émissions de gaz à effet de serre de 1990 à 2004 et l'objectif à atteindre d'ici 2012 selon : [15]

III. Introduction :

La croissance des émissions de GES peut être directement attribuée à la hausse de la production pétrolière et gazière.

Les émissions fugitives du secteur amont des industries pétrolière et gazière proviennent des sources suivantes :

- production et traitement du gaz naturel (y compris les rejets de CO₂ brut, les évènements de gaine et la migration des gaz);
- transport du gaz naturel;
- production classique de pétrole;
- production de mazout lourd;
- torchage du gaz naturel;

Autres sources fugitives (mise en valeur des sables bitumineux, production de bitume brut, transport des produits liquides, valorisation du mazout lourd, forage et entretien des gisements de pétrole et de gaz, accidents et défaillances du matériel).

Les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles augmentent plus vite que prévu et de manière alarmante : +1,1% par an dans les années 90 à +3.3% par an pour la période 2005/2010. 75% des émissions humaines de CO₂ proviennent de la combustion de combustibles fossiles non renouvelables pour la production d'énergie électrique et mécanique principalement avec des turbines à gaz, chaudières, fours, torches.

Dans notre étude, on s'intéresse à la principale source d'émission du CO₂, qui est la combustion du fuel gaz dans les turbines à gaz.

III.1 Combustion :

III.1.1 Définition :

La combustion est une chimie exothermique d'oxydation. Lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme voire une explosion.

La réaction de combustion, comme toutes les réactions, est la rupture des liaisons entre les molécules de deux corps, et la création de nouvelles molécules plus stables chimiquement.

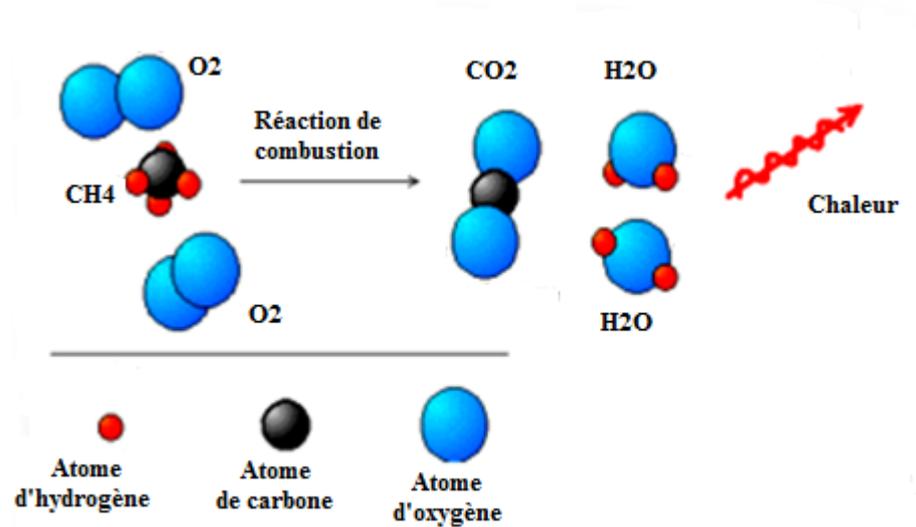
Exemple :

Combustion du méthane dans l'oxygène :



La combustion est une réaction d'oxydoréduction, en l'occurrence l'oxydation d'un combustible par un comburant ;

- le combustible est le corps qui est oxydé durant la combustion ; c'est un réducteur, il perd des électrons ;
- le comburant est le corps qui est réduit ; c'est un oxydant, il gagne des électrons.



Le **combustible** peut être:

- un gaz (butane, propane, gaz de ville, dihydrogène...)
- un liquide ou solide liquéfiable (essence, gasoil, huile, kérosène...)
- un solide (bois, papier, carton, tissu, plastique...).

Ce peut être un mélange de différents corps.

Le **comburant** est l'autre réactif de la réaction chimique. La plupart du temps, il s'agit de l'air ambiant, et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux, le dioxygène. En privant un feu d'air, on l'éteint.

Dans certains cas très particuliers (souvent explosifs comme avec l'aluminium), le comburant et le combustible sont un seul et même corps (par exemple la célèbre nitroglycérine, molécule instable comportant une partie oxydante greffée sur une partie réductrice).

La réaction est déclenchée par une **énergie d'activation**. La production de chaleur permet à cette réaction de s'auto-entretenir dans la plupart des cas, voire de s'amplifier en une réaction en chaîne.

L'énergie d'activation est le déclencheur du feu. Il s'agit généralement de chaleur. Par exemple, ce sera l'allumette que l'on frotte, le câble électrique qui chauffe, ou une autre flamme (propagation du feu), étincelle (de l'allume-gaz, de la pierre du briquet). Mais il y a d'autres façons de fournir l'énergie d'activation : électricité, radiation, pression... qui permettront toujours une augmentation de la température.

III.1.2 Différents types de combustion :

a. Rapide :

La combustion rapide est une forme de combustion au cours de laquelle de grandes quantités de chaleur et d'énergie sous forme de lumière sont relâchées, donnant naissance au feu. Elle est utilisée dans certaines machines telles que les moteurs à combustion internes.

b. Lente :

La combustion lente est une réaction se réalisant à des températures peu élevées. On peut citer le cas de la respiration cellulaire.

c. Complète :

Lors d'une combustion complète, le réactif brûlera en présence de dioxygène, ce qui limite les produits de la réaction. Quand un hydrocarbure brûle dans le dioxygène, les produits sont ainsi uniquement du dioxyde de carbone et de l'eau. Quand des éléments comme le carbone, l'azote, le soufre, et le fer sont brûlés, on remarque la production des oxydes les plus communs : dioxyde de carbone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, et l'oxyde de fer.

d. Chaude :

La combustion chaude est une combustion caractérisée par des flux de chaleur. Elle est souvent utilisée dans l'industrie (par exemple, les turbines à gaz, les moteurs diesel...) car la chaleur facilite l'opération de mélange entre le combustible et l'oxydant.

e. Incomplète :

La combustion incomplète a lieu quand il n'y a pas assez d'oxygène pour permettre au combustible (souvent un hydrocarbure) de réagir complètement avec le dioxygène pour produire du dioxyde de carbone et de l'eau. Quand un hydrocarbure brûle dans l'air, la réaction produira du dioxyde de carbone, de l'eau, du monoxyde de carbone, du carbone pur (suie ou cendres), mais aussi de nombreux autres composés tels que les oxydes d'azote.

La réaction incomplète de combustion est par conséquent la plus commune de toutes, et produira ainsi de très grandes quantités de produits secondaires, et, dans le cas de la combustion de carburant dans les moteurs automobiles, ces produits secondaires peuvent être plutôt mauvais pour la santé et endommagent l'environnement.

La qualité de la combustion peut être améliorée en étudiant les pièces impliquées dans la réaction, comme les brûleurs, et les moteurs à combustion interne. D'autres améliorations sont réalisables par des pièces post-combustion devrait être nécessaire dans des grands dispositifs de combustion.

III.2 Énergie dégagée et pouvoir calorifique :

La quantité d'énergie dégagée par la réaction est supérieure à la quantité d'énergie nécessaire à l'initier. La quantité d'énergie produite par la combustion est exprimée en joules (J) ; il s'agit de l'enthalpie de réaction. Dans les domaines d'application (fours, brûleurs, moteurs à

combustion interne, lutte contre incendie), on utilise souvent la notion de pouvoir calorifique, qui est l'enthalpie de réaction par unité de masse de combustible ou l'énergie obtenue par la combustion d'un kilogramme de combustible, exprimée en général en kilojoule par kilogramme (noté kJ/kg).

Les combustions d'hydrocarbures dégagent de l'eau sous forme de vapeur. Cette vapeur d'eau contient une grande quantité d'énergie. Ce paramètre est donc pris en compte de manière spécifique pour l'évaluation du pouvoir calorifique, et l'on définit :

a. Le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) :

« Quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée ».

b. Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) :

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible est définie comme étant la valeur négative de la chaleur de réaction dégagée par ce combustible lors d'une réaction complète tel que les réactifs entrent dans la chambre de combustion à l'état standard (25°C et 1 atm) et les produit en sortent au même état, donc c'est la chaleur maximale que peut dégager le combustible.

La composition du gaz combustible, son PCI et sa chaleur spécifique moyenne à 15°C sont représentés dans le tableau suivant :

Constituants du gaz	Y_i mol (%)	V_i %	PCI _i (Kcal/m ³)	$Y_{i\text{massique}}$	PCI _i *V _i	C _p (Kcal / kmol °c) à 15°C
CH ₄	83.54	2.18	20611.63	0,7	449.33	4,93
C ₂ H ₆	7.83	0.17	26707.64	0,14	45.403	2,26
C ₃ H ₈	1.82	0.37	26790.4	0,046	99.12	0,12
IC ₄ H ₁₀	0.25	0.32	32912.2	0,0086	105.32	-0,41
NC ₄ H ₁₀	0.33	0.34	32994.1	0,013	112.18	2,27
IC ₅ H ₁₂	0.06	0.16	39189.78	0,003	62.70	-0,42
NC ₅ H ₁₂	0.06	0.05	45388.13	0,003	22.69	3,23
C ₆ H ₁₄	0.03	0.01	51586.8	0,0025	5.16	3,62
CO ₂	0.16	22.56	14397.26	0,0058	3248.02	5,53
N ₂	5.92	71.63	8090.34	0,084	5795.11	6,9
TOTAL	100	100	/	1	9945.03	2.8

Tableau (III.1) : PCI_i et C_p du gaz combustible à 15°C

Pour calculer le PCI du combustible on a la relation suivante :

$$PCI = \sum_{i=1}^7 V_i * PCI_i$$

Avec :

PCI_i: Pouvoir calorifique des composants du combustible en Kcal/m³.

V_i : Fraction volumique.

Y_i[?] mol : La concentration molaire des composants du combustible (%).

La différence entre le PCI et le PCS est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (L_v) multipliée par la quantité de vapeur produite (m), qui vaut à peu-près 2 250 kJ·kg⁻¹ (cette dernière valeur dépend de la pression et de la température). On a la relation :

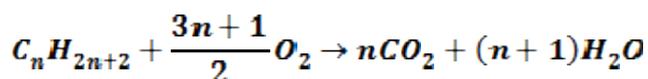
$$PCS = PCI + m \cdot L_v.$$

III.2.1 Produits de la combustion :

Deux produits essentiels résulteront de la combustion : du dioxyde de carbone (ou CO₂) et de l'eau (ou H₂O). C'est ce CO₂ dont on parle tant au niveau de la pollution atmosphérique à cause du réchauffement de la planète qu'il entraîne. Il est lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique. L'ordre de grandeur du CO₂ produit par 1kg de combustible utilisé vaut 2,56 kg, et 1,94 kg pour la vapeur d'eau produite.

Mais l'oxygène provient de l'air atmosphérique et celui-ci contient également de l'azote (N), qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées. En effet, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote NO, NO₂, N₂O, ... rassemblés sous la dénomination NO_x. Ceux-ci sont en partie responsables des pluies acides.

Les combustibles contiennent également des traces d'autres éléments dont la combustion est nocive pour l'environnement. Le principal est le soufre dont l'oxydation fournira du SO₂ et du SO₃. Ce dernier formera de l'acide sulfurique par combinaison avec de l'eau (par exemple, lors du contact entre les fumées et les nuages). C'est ce qui entraîne la formation de pluie acide. La réaction de combustion s'écrit de cette manière :



Alors pour trouver la masse de CO₂, la masse de la vapeur d'eau libérée avec la masse d'oxygène consommé on applique cette formule :

$$m_{\text{CO}_2} = (M_{\text{CO}_2} * n * Y_i) / M_i$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = (M_{\text{H}_2\text{O}} * (n+1) * Y_i) / M_i$$

$$m_{\text{O}_2} = (M_{\text{O}_2} * ((3n+1)/2) * Y_i) / M_i$$

$$Q_{\text{air}} = m_{\text{O}_2 \text{ consommé}} / Y_{\text{O}_2 \text{ (dans l'air)}}$$

$$M_{\text{N}_2} = Q_{\text{air en excès}} * Y_{\text{N}_2 \text{ (dans l'air)}} + Y_{\text{N}_2 \text{ (dans le gaz combustible)}}$$

$$M_{\text{O}_2 \text{ libéré}} = (Q_{\text{air en excès}} - Q_{\text{air stœchiométrique}}) * Y_{\text{O}_2 \text{ (dans l'air qui vaut 21\% molaire)}}$$

Sachant que :

$$M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ Kg/Kmol}, M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ Kg/Kmol}, M_{\text{O}_2} = 32 \text{ Kg / Kmol}$$

Y_i : la concentration massique du constituant i dans le mélange du gaz combustible (par exemple le méthane dans notre cas $Y_{\text{CH}_4} = 83 \%$ molaire).

M_i : Masse molaire du constituant i (exemple pour le méthane $M_{\text{CH}_4} = 16 \text{ Kg / Kmol}$).

Y_{O_2} : le % massique de l'oxygène dans l'air qui est égale à 23%.

Quantité d'air nécessaire :

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1 kg de combustible dépendra des caractéristiques de celui-ci. Mais il est bon d'avoir en tête un ordre de grandeur. "La combustion 1 kg de gaz naturel requiert environ 15,4 kg d'air à 15°C". A cette quantité "stœchiométrique", c'est-à-dire requise par l'équation chimique de la combustion, s'ajoute un excès d'air pour s'assurer que toutes les molécules de combustible soient bien en contact avec l'oxygène, et assurer aussi et le refroidissement de la chemise de la chambre de combustion, et la dilution de la flamme. En effet, il faut prévoir que certaines molécules d'oxygène vont traverser le foyer sans se lier au combustible. On travaille donc avec un excès d'air comburant qui s'élève par exemple pour la combustion du fuel gaz dans les turbines à gaz type MS 5002 b à environ 400 – 500 %. Il faut donc prévoir pour ce type de turbines environ 65 kg d'air pour brûler 1 kg de fuel gaz (d'après la réaction de combustion).

Lorsqu'une combustion se fait avec une arrivée insuffisante d'oxygène, on parle de combustion incomplète. Celle-ci se traduit par la production d'imbrûlés (suies qui encrassent les surfaces d'échange) ou d'éléments partiellement oxydés, pouvant encore brûler, comme le monoxyde de carbone (CO).

III.3 La section de combustion dans la turbine à gaz :

La section de combustion se compose d'un système comprenant douze chambres de combustion annulaires disposées symétriquement le long d'une circonférence ; ces chambres de combustion reçoivent et brûlent du combustible au moyen d'un nombre égal des brûleurs (un pour chaque chambre de combustion).

L'air entre dans chaque chambre dans une direction opposée à la veine intérieure des gaz chauds (pour cette raison, Ce courant extérieur d'air, qui s'écoule le long des chemises, sert à les refroidir. En outre, l'air qui n'est pas employé dans le processus de combustion, est employé pour refroidir les gaz chauds après la combustion ; en effet, il est introduit dans les chambres par les trous de mélange et refroidit le gaz à la température optimale d'admission de la turbine. La veine des gaz chauds du système de combustion à l'admission de la turbine traverse les pièces de transition qui transforment les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage.

Au début, le processus de combustion est déclenché par deux bougies d'allumage. Une fois déclenchée, la combustion continue sans interventions, aussi longtemps que les conditions d'alimentation de combustible et d'air de combustion sont maintenues.

III.3.1 Avantages et inconvénients des turbines à gaz :

Avantages :

- ✓ Une puissance élevée dans un espace restreint dans le quel un groupe diesel de même Puissance ne pourrait pas être logé.
- ✓ A l'exception de démarrage et arrêt, la puissance est produite d'une façon continue.
- ✓ Démarrage facile même à grand froid.
- ✓ Diversité de combustible pour le fonctionnement.
- ✓ Possibilité de fonctionnement à faible charge.

Inconvénients :

- ▼ Au-dessous d'environ 3000KW, prix d'installation supérieur de celui d'un groupe diesel.
- ▼ Temps de lancement beaucoup plus long que celui d'un groupe diesel ; à titre indicatif : 30 à 120 s pour une turbine, 8 à 20 s pour un groupe diesel.
- ▼ Rendement inférieur à celui d'un moteur diesel (cycle simple). À titre indicatif : 28 à 33 % pour une turbine de 3000 KW, 32 à 38 % pour un groupe diesel.

III.3.2 Présentation de la turbine à gaz MS5002B :

III.3.3 Introduction :

Les turbines à gaz au niveau du champ de Hassi R'mel sont de modèle MS 5002, elles sont utilisées pour entraîner des compresseurs centrifuges multi étages.

La turbine à gaz MS 5002C est une machine rotative à combustion interne, elle pressurise de l'air, le mélange avec un combustible et brûle ainsi le mélange dans des chambres de combustion.

Les gaz ainsi produits sont détendus au niveau des aubes d'une turbine de détente.

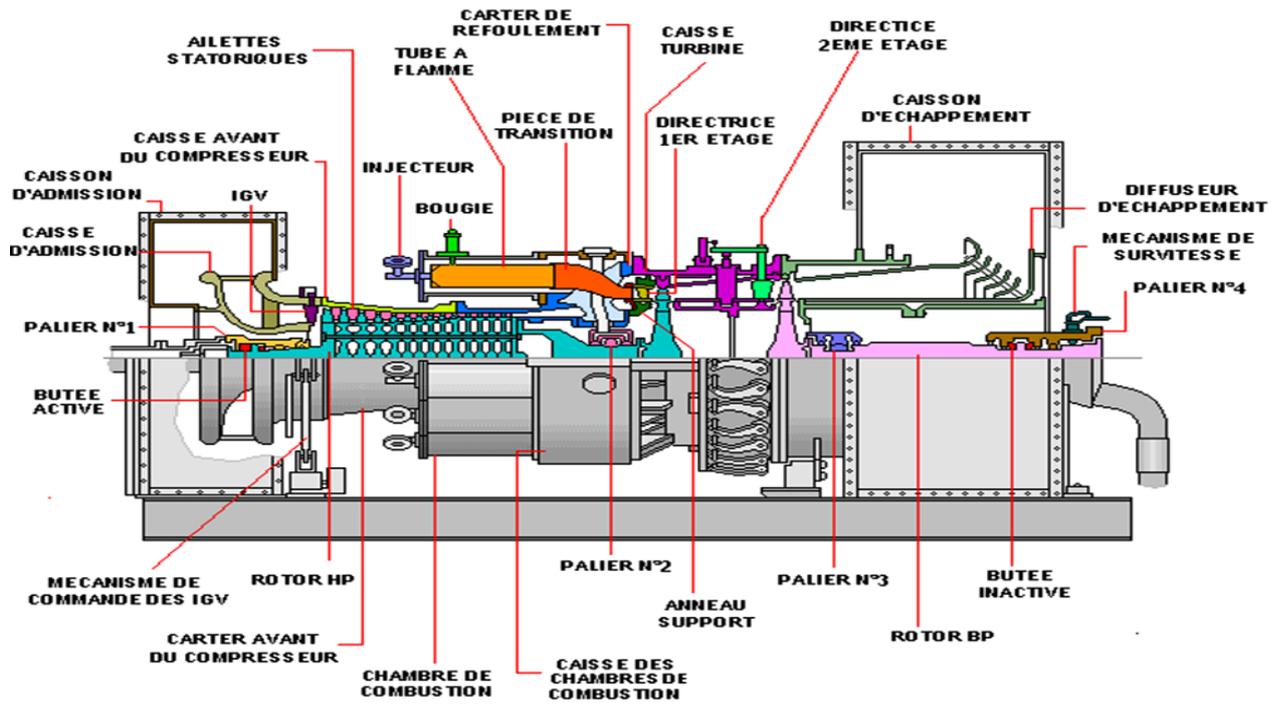


Figure (III.1) : La turbine à gaz MS 5002B

III.3.4 Caractéristiques de la turbine à gaz MS 5002B :

Une turbine à gaz de construction NUOVO PIGNONE sous licence (Général Electric Company USA) type MS 5002 b : série 5000, 2b: deux roues bi-arbres HP et BP ; ces caractéristiques sont les suivantes :

Nombre de roues de détente de la turbine	2
Vitesse de l'arbre HP (Tr/min)	5100
Vitesse de l'arbre BP (Tr/min)	4670
Compresseur axial	16 étages
Taux de compression	8
Température sortie chambre de combustion T ₃ (°C)	927
Température d'échappement T ₄ (°C)	525
Débit d'air (kg/h - lb/h)	438000 -966000
Débit d'air du 10 ^{ème} étage (kg/h)	12000
Excès d'air (%)	400
Puissance utile kw - hp conditions iso	26100 - 35000
Puissance utile kw - hp à 45°C, ΔP _{asp} = 4 mm H ₂ O, ΔP _{ref} =5 mm H ₂ O	18000 - 24000

Taux de chauffe (kj/kwh) - (btu/hph)	12 493 - 8 830
Système de démarrage	Turbine de lancement (TGL)
Vitesse de rotation TGL (Tr/min)	3000
Rendement thermique (%)	29%
Chambres de combustion	12 identiques
Bougies d'allumages	2
Débit de combustible kg/h	7200
PCI kcal/kg	10 835
Poids moléculaire (kg/m ³)	18,91

Tableau(III.2):Les caractéristiques de la turbine et du gaz combustible utilisé

III.3.5 Présentation de la turbine à gaz MS 5002 b :

III.3.6 Description de la turbine à gaz MS 5002 b :

La turbine à gaz MS 5002 b est une machine d'entraînement à deux arbres qui fonctionne suivant un cycle simple. Elle est employée pour faire tourner un compresseur centrifuge, elle possède deux roues indépendantes mécaniquement :

La roue du premier étage entraîne le rotor du compresseur d'air, du type axial à seize étages, qui entraîne lui même la partie accessoires (pompes de lubrification des paliers et d'étanchéité, etc.....).

La roue du second étage, entraîne le compresseur centrifuge.

Les deux roues de turbine ne sont pas liées, pour leur permettre de travailler à des vitesses différentes et s'adapter aux variations de la charge et donc la puissance demandée par le compresseur centrifuge.

Les paliers des deux roues sont refroidis par l'air extrait du 10ième étage du compresseur axial, et aussi il assure leur étanchéité.

III.3.7 Turbines avec étage à action et à réaction :

Un étage d'une turbine est constitué, d'aubes fixes et mobiles.

- **Etage à action** : La chute totale de pression se produit dans les aubes immobiles, la pression du fluide demeure constante lorsqu'il circule dans le canal inter aube, et l'enthalpie augmente grâce à l'irréversibilité de l'écoulement. Donc toute l'énergie potentielle disponible est transformée en énergie cinétique avant la roue.
- **Etage à réaction pure** : la chute totale de pression s'effectue lorsque le fluide circule entre les aubes mobiles, ainsi l'aube mobile agit comme une aube fixe, et le canal inter aube doit avoir un profil adéquat (convergent si la pression de sortie est supérieure à la pression critique, et divergent si la pression de sortie est inférieure à la pression critique). Dans un étage à réaction

pure, l'unique but de l'aube fixe est de diriger le fluide vers l'aube mobile à l'angle et à la vitesse appropriée.

- **Étage à réaction** : une partie seulement de la détente s'effectue dans les aubes fixes avant d'entrer au canal inter aube.

Pour les turbines utilisant un étage à action, on peut contrôler la puissance de sortie en ouvrant ou en fermant les aubes. Le principal avantage de l'étage à réaction est qu'on peut obtenir des rendements élevés à partir des faibles vitesses.

III.3.8 Principaux composants de la turbine à gaz MS 5002 b :

Les principaux composants de la MS 5002 b sont :

- La partie auxiliaire.
- La section de compression.
- Le système de combustion.
- La section turbine (HP, BP).

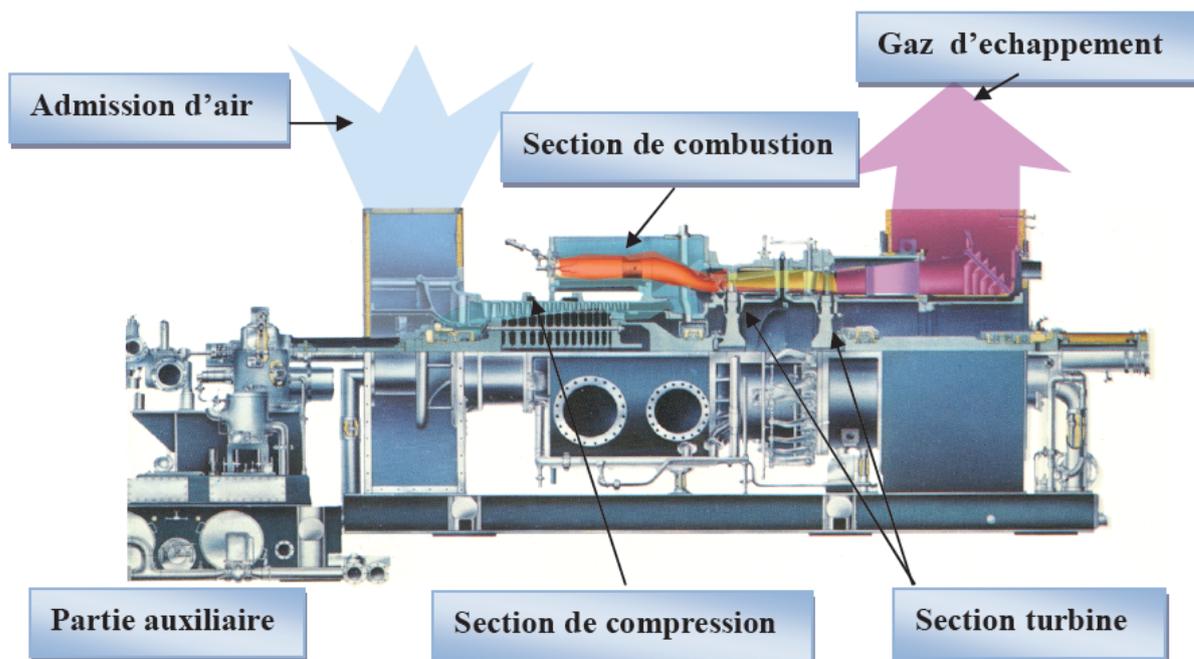


Figure (III .2): Principaux composants de la turbine à gaz MS 5002 B

1- La partie auxiliaire :

La continuité et la qualité de fonctionnement de la turbine, sa durée de vie, dépendent fortement de l'état des organes de cette partie ; de leur rapidité ainsi que leur temps de réponse. Cette partie se compose de :

Système d'admission :

Le système d'admission d'une turbine à gaz a pour but de diriger l'air vers la section d'admission du compresseur axial, il doit assurer :

- Une bonne filtration de l'air, pour le bon fonctionnement de la turbine :

Les particules solides contenues dans l'air admis peuvent se collées sur les bouts d'ailettes du compresseur, ainsi sur la base des aubes de stator par effets des forces centrifuges, provoquant une perte du rendement du compresseur axial, d'où une augmentation de la consommation spécifique de la turbine.

Des grains de sable non bloqués par les filtres pour le cas des turbines implantées au Sahara, causent une usure érosive surtout aux hautes vitesses de rotation, cela peut changer le profil aérodynamique des ailettes, et peut même aller jusqu'à leur arrachement du compresseur.

La présence des particules corrosives (aérosols acides), peut induire un dysfonctionnement des équipements de la turbine.

Un débit d'air admis régulier à fin de produire la puissance voulue. Le bouchage du filtre limite la quantité d'air aspirée, qui engendre une diminution de la puissance et une augmentation de la consommation spécifique.

Le système d'admission comprend un filtre, une conduite, un silencieux, un coude, un caisson d'admission et accessoires. L'air aspiré entre dans le filtre, traversant la conduite, le silencieux, le coude et le caisson d'admission pour atteindre le compresseur axial.

Les filtres à air utilisés comportant des éléments filtrant d'une forme conique (en deux morceaux), ils sont autonettoyants avec une grande efficacité (par rapport au filtre classique), et d'une durée de vie qui peut aller jusqu'à 3 ans.

La figure suivante montre le système d'admission d'air de la turbine :

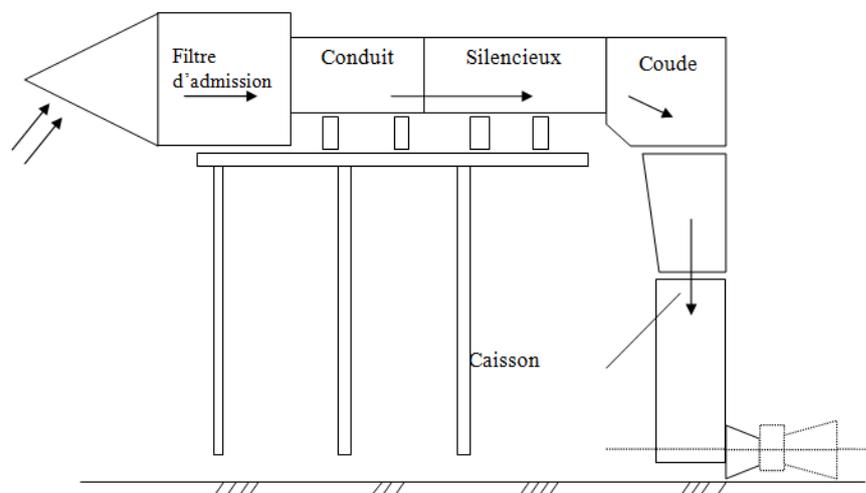


Figure (III.3): Système typique d'admission

Socle de la turbine :

Le socle de la turbine contient la machine et certains de ses auxiliaires, pour la MS 5002 b le socle contient que la turbine, le système auxiliaire à un socle indépendant, il sert comme une surface de montage des éléments de la turbine, et enferme le réservoir d'huile de graissage. La turbine est soutenue sur le socle par deux plaques souples, l'une se trouve sous la caisse d'admission, et l'autre sous la caisse d'échappement. Elle comporte 04 paliers principaux : 02 pour supporter la roue HP et 02 autres pour la deuxième roue BP.

2. La partie de Compression :

Le compresseur devra être du type axial. Le choix de ce type de compresseur dépend du fait que ce compresseur peut transporter quantités d'air d'échappement élevées et qui sont nécessaires à obtenir valeurs élevées de puissance utile avec dimensions réduites. L'on résumera ce concept ensuite, dans le moment de la description des rapports thermodynamiques principaux dans le cycle opérationnel d'une turbine à gaz.

Un compresseur est composé par une série d'aubes rotatives, qui augmentent la vitesse de l'air dans des termes d'énergie cinétique et qui sont suivies alternativement par aubes de stator qui transforment l'énergie cinétique en pression plus élevée. Le numéro de groupes de compresseurs est lié à la structure de la turbine à gaz et, surtout, au rapport de compression qu'il faut obtenir. Pour la turbine MS 5002 b le nombre d'étage du compresseur axial est égal à 16 avec un taux de compression de 08.

Dans le côté d'admission du compresseur, il y a les Aubes Guide Admission (ou IGV), dont la fonction principale est celle de diriger l'air transporté par le système de succion, vers le premier groupe d'aubes rotantes.

Une autre fonction importante des IGV est celle d'assurer un bon fonctionnement du compresseur dans des termes de dynamique du fluide, dans des conditions opérationnelles transitoires différentes (par exemple pendant le démarrage et l'arrêt).

Lorsque, à cause de différentes vitesses de fonctionnement opposées à la vitesse de fonctionnement normale, l'angle d'ouverture des IGV a changé: cela est utile pour la modification de la vitesse de transport de l'air et pour rétablir triangles de vitesse idéaux.

Enfin, dans les cycles combinés et dans le procédé de cogénération, la capacité de modifier la position géométrique des IGV permet l'optimisation des températures dans le côté d'échappement de la turbine et, par conséquent, d'augmenter l'efficacité du cycle de récupération en modifiant la vitesse du flux de l'air en entrée dans le compresseur. Dans le côté de sortie du compresseur il y a quelques groupes d'Aubes Guide Sortie ou EGV, nécessaire à l'obtention de la récupération de la pression maximale avant l'entrée de l'air dans la chambre de combustion.

Le compresseur a pour but aussi de fournir une source d'air nécessaire au refroidissement des parois des gicleurs, des aubes du rotor et des disques de la turbine, qui sont atteints au moyen de

canaux dans la turbine à gaz et au moyen de tuyaux externes de connexion. En outre, le compresseur fournit l'air d'étanchéité aux éléments étanches des labyrinthes des coussinets. La figure ci-dessous montre une vue globale du compresseur axial :



Figure (III.4) :Le compresseur axial. Selon [4]

3. Section de Combustion :

Dans la turbine à gaz, la section de combustion est composée par un système de douze chambres de combustion tubulaires (à flamme) d'une forme cylindrique placées de façon symétrique et presque en circonférence; avec douze tubes d'interconnexion permettent la propagation entre les chambres ; ces chambres reçoivent et brûlent le combustible au moyen d'un nombre pareil de brûleurs (un pour chaque chambre de combustion).

L'air après avoir été comprimé dans le compresseur axial, il entre dans chaque chambre avec un flux en direction contraire à celui des gaz chauds à l'intérieur (pour cette raison, cette méthode de distribution d'air est appelée "flux contraire"). Ce flux externe, qui touche marginalement les diverses chambres (refroidir leurs enveloppes), vise à leur refroidissement. En outre, l'air qui ne prend pas part au procédé de combustion est utilisé pour le refroidissement des produits de la combustion; en effet il est introduit dans les chambres au moyen de trous de "dilution" jusqu'à l'établissement des conditions de température optimale pour permettre au mélange gaz/air d'entamer la section de la turbine.

Le passage de l'air de la section de combustion proprement dite vers l'entrée de la turbine à gaz a lieu dans les collecteurs appelés "pièces de transition": ici les gaz qui s'écoulent des chambres de combustion sont menés jusqu'à la formation d'un profil annulaire continu, égal à celui qui est mené dans le premier groupe de bagues des gicleurs.

D'abord, le processus de combustion est allumé par deux bougies d'allumage, pour amorcer la combustion, placées dans les tubes à flamme 1 et 12, et deux détecteurs de flamme afin d'assurer

que la combustion s'y produise dans chaque chambre, placés dans les tubes à flamme 3 et 10. Une fois que se sont allumées, la combustion continue de façon autosuffisante sans l'aide des bougies d'allumage, jusqu'à ce que les conditions de transport du combustible et de l'air de combustion soient satisfaites. Une portion de 22% de l'air comprimé participe à la combustion, tandis que 10% sert à refroidir le tube à flamme, et 68% restant sont utilisés pour diluer les gaz très chauds (1800°C), afin d'abaisser leur température, qui ne doit pas dépasser les 927°C.

Dans le cas de turbines construites pour l'industrie aéronautique (LM, PGT16 et 25), la section de combustion est composée par une seule chambre de forme toroïdale, avec refroidissement à flux direct et non pas contraire; en effet, cela permet des dimensions du diamètre externe réduites, puisqu'une section frontale plus petite est nécessaire de façon à opposer la moindre résistance au mouvement de l'avion.

Pour la même raison, cette chambre de combustion ne demande pas des pièces de transition séparées. Les autres principes opérationnels sont les mêmes des ceux décrits pour les chambres tubulaires.

La figure suivante montre l'écoulement d'air dans la chambre de combustion après sa sortie du compresseur axial :

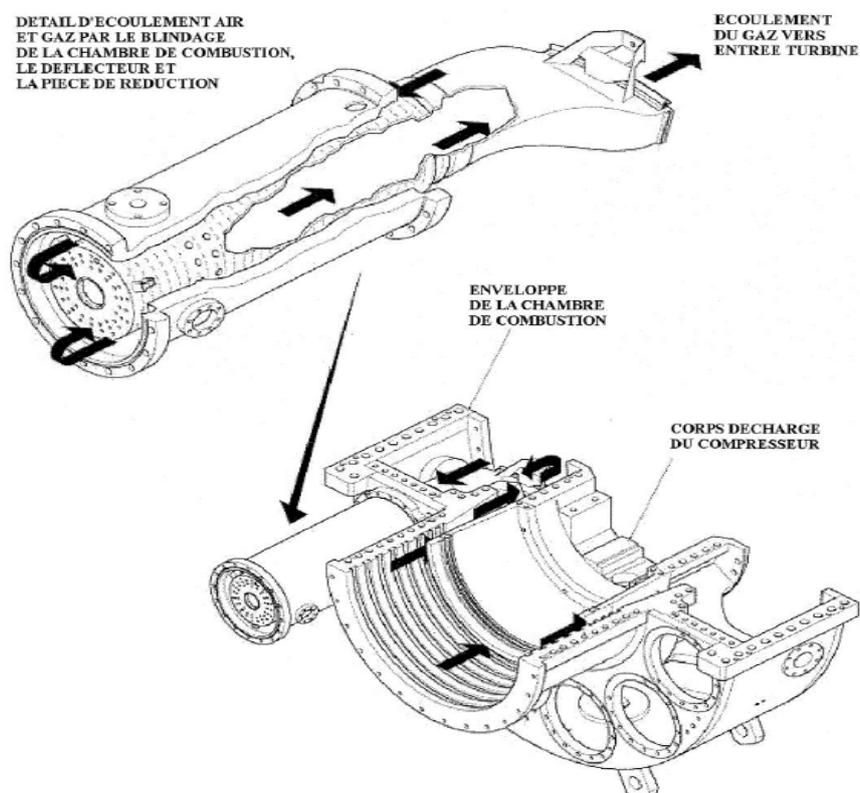


Figure (III.5) : L'écoulement de l'air et du gaz dans la chambre de combustion de la turbine.

La figure suivante représente le flux d'air dans la chambre de combustion et la sortie des gaz d'échappement :

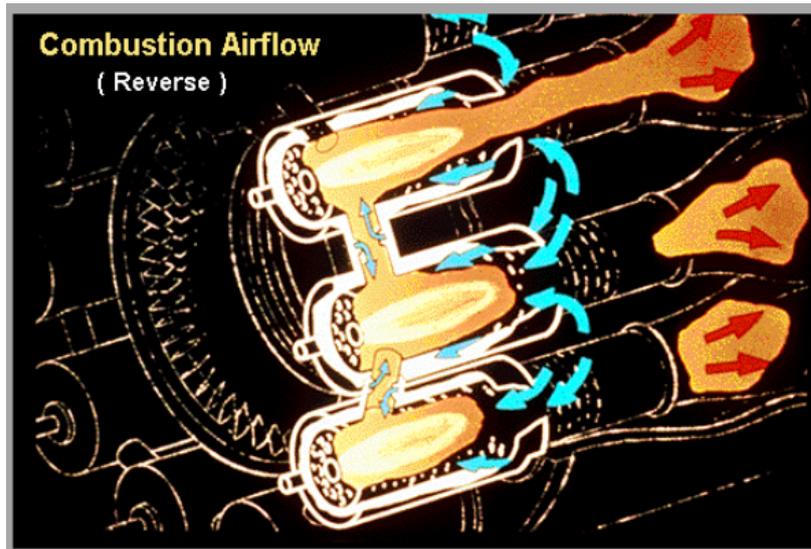


Figure (III.6) : Schéma de la chambre de combustion. Selon [4]

La figure suivante donne une vue sur la partie extérieure de la chambre de combustion :



Figure (III.7) : Dispositif des chambres de combustion. Selon [4]

4. Section Turbine (détente) :

Dans le cas de turbine MS 5002 b, la section turbine comprends deux d'ensembles, chacun composé par un ensemble stator (gicleur distributeur); dans cet ensemble les gaz à haute température et à haute pression transportés par les pièces de transition sont accélérés et dirigés vers l'ensemble du rotor des aubes montées sur un disque relié avec l'arbre de commande. La conversion de l'énergie thermique et de la pression à l'énergie cinétique a lieu dans l'ensemble stator.

L'ensemble du rotor complète cette conversion, puisque dans ce dernier l'énergie cinétique est transformée en une énergie qui déplace l'arbre en générant la puissance demandée pour la mise en fonctionnement du compresseur (travail de compression axial), et pour faire fonctionner la machine réceptrice de l'énergie (le compresseur centrifuge) reliée à la turbine à gaz au moyen d'un coupleur.

L'énergie des gaz alimentés par le système de combustion peut être modifiée en changeant la vitesse de transport du combustible. De cette façon, on peut régler les valeurs de la puissance utile nécessaire au procédé technologique duquel la turbine à gaz est le moteur.

Au niveau de la station de compression sud, et après la combustion, les gaz chauds comprimés entrent dans la section turbine dite section de détente, pour céder une grande partie de leur énergie emmagasinée, ils trouvent dans leur trajectoire, la première directrice fixe, son rôle est d'augmenter la composante cinétique des gaz, en réduisant leurs énergies thermiques et de pression, les gaz accélérés dans la directrice affrontent par la suite la 1^{ère} roue HP, leur trajectoire est tangentielle au profil des intrados des aubes afin d'éviter les chocs (perte d'énergie) et d'avoir un couple résultant maximal.

La directrice fixe se compose d'un ensemble d'éléments appelés segments, chaque segment regroupe trois aubes, ces segments sont placés l'un à côté de l'autre de telle façon qu'ils forment un anneau permettant d'orienter et d'accélérer les gaz.

La roue HP se compose d'un ensemble d'aubes indépendantes les unes par rapport aux autres, elles ont une forme aérodynamique étudiée avec soin pour récupérer le maximum de couple ; elles sont creuses afin de réduire leurs masses et les forces centrifuges qui peuvent aller jusqu'à l'arrachement de ces dernières. En plus cette forme permet de créer une turbulence entre la tête de l'aube et l'anneau du stator environnant pour empêcher le gaz de passer à travers. Ces aubes sont placées sur la circonférence de la roue (disque). La roue HP liée directement au rotor du compresseur axial, la détente des gaz dans cette roue sert à l'entraîner, ce rotor est supporté par deux paliers lisses, l'un avant le compresseur, et l'autre avant la roue.

Une deuxième détente se produit dans la deuxième roue BP, après la sortie des gaz de la roue HP, ils traversent la directrice mobile (ou les nozzles), pour la conversion d'une partie de leur énergie thermique et de pression en une énergie cinétique servant à faire tourner la roue BP. Les deux arbres sont indépendants, et les gaz sortants de la roue HP sont véhiculés à travers un diaphragme pour atteindre la roue BP.

Du fait que les gaz ont perdus une partie de leur énergie après leur passage dans la roue HP, la deuxième roue est d'un diamètre plus grand, avec des aubes plus longues, afin de maximiser la surface de contact (plus de couple). Les aubes sont soutenues des deux extrémités pour éviter leur flexion. Les gaz quittant la roue BP sont envoyés à l'atmosphère, et le couple résultant sert à faire tourner la charge qui est généralement variables, où la variation du couple s'effectue grâce à la directrice mobile. La deuxième roue est aussi supportée par deux paliers lisses, un après la roue et l'autre avant la charge.

Un palier de butée est utilisé pour résister contre les vibrations axiales et limite la position axiale du rotor pour éviter le frottement avec les pièces du stator lors du fonctionnement, il est placé du côté du premier palier porteur, et il est de type à patins.

La figure ci-dessous illustre les différentes phases de fonctionnement de la turbine MS 5002 b :

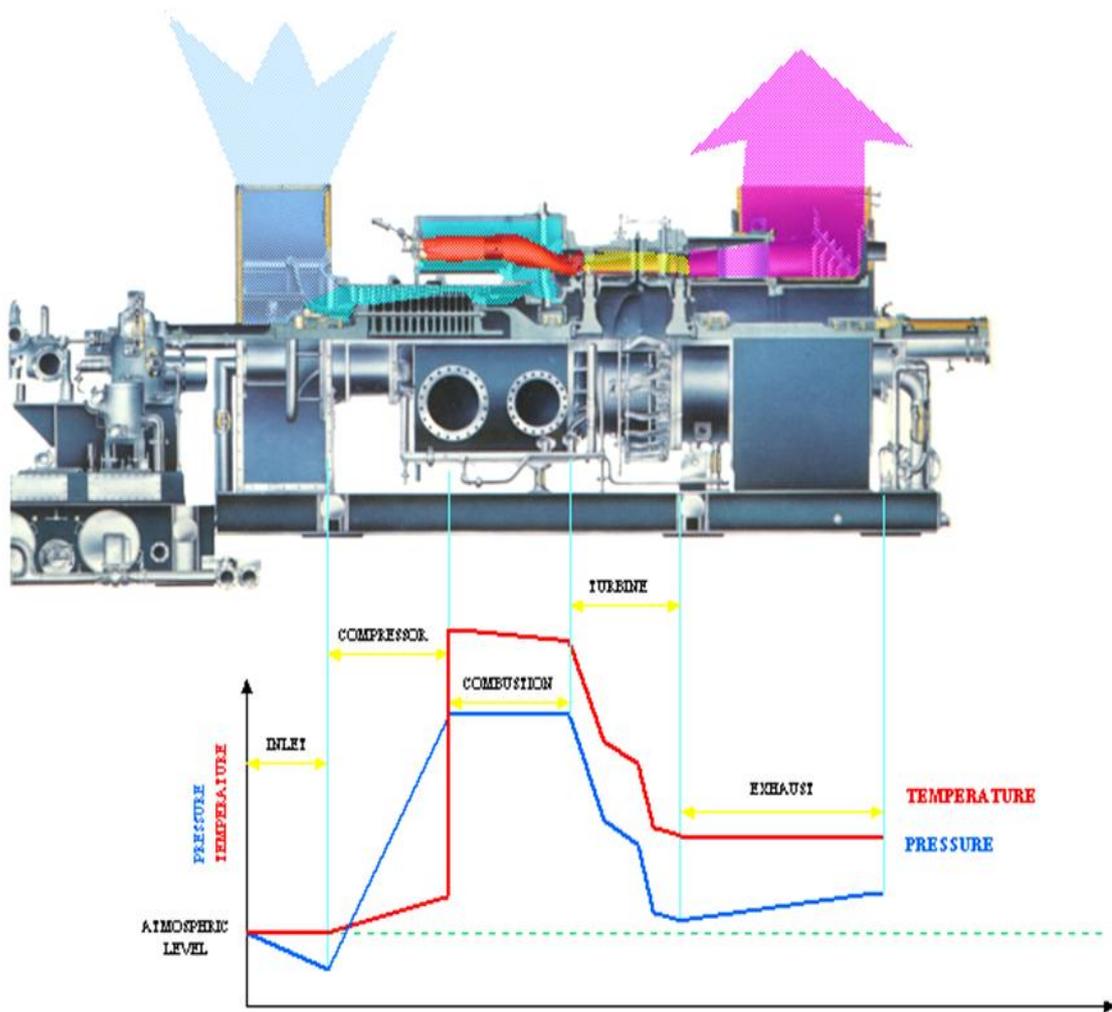
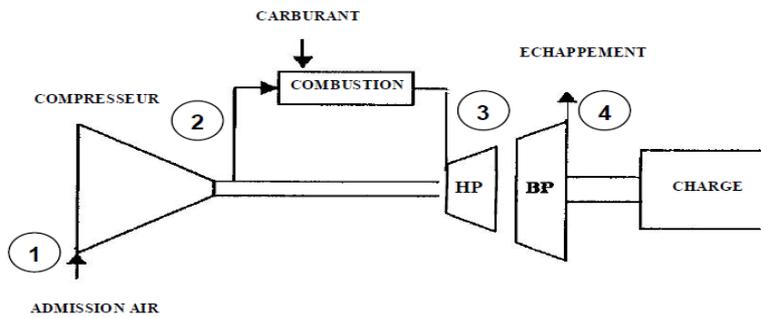


Figure (III.8) :Les différentes étapes de fonctionnement de la turbine. Selon [3]

III.4 Le principe de fonctionnement :



Le rotor du compresseur axial est tout d'abord lancé à 20% de sa vitesse normale par un dispositif de démarrage (turbine de lancement).

L'air entre dans le compresseur dans l'endroit (1), qui représente les conditions d'air ambiant. Ces conditions sont classées selon la pression, la température et les valeurs relatives d'humidité.

Ensuite, l'air est comprimé dans le compresseur duquel il sort dans la condition indiquée dans le point (2). Pendant le procédé de conversion de (1) à (2), il n'y a aucun relâchement de chaleur vers l'externe. Toutefois, la température de l'air augmente, à cause de la compression polytropique, jusqu'à une valeur variable dépendante du modèle de la turbine à gaz et de la température ambiante.

Après que l'air sort du compresseur, il entre dans la zone de combustion, en pratique dans les mêmes conditions de pression et de température du point (2) (excepté pour toute perte qui a lieu le long du parcours du côté compresseur à l'entrée de la chambre de combustion, qui est comprise entre 3 et 4% de la valeur absolue de la pression d'amenée). Le combustible est injecté dans la chambre de combustion au moyen d'un brûleur et la combustion a lieu à une pression en pratique constante (6 bars).

La conversion entre les points (2) et (3) représente la combustion. En effet, la température du procédé de combustion proprement dit, qui a lieu dans des conditions virtuellement stœchiométriques, atteint des valeurs excessivement élevées (environ 1800°C) localement dans la zone de combustion à côté du brûleur, à cause de la résistance des matériaux en aval.

Donc, la température finale de la conversion, relative au point (3), est plus basse, puisqu'elle est le résultat de gaz primaires qui se mêlent avec l'air de refroidissement et de dilution et que l'on a décrit auparavant.

La transformation suivante, comprise entre les points (3) et (4) de la Figure 17, représente l'expansion des gaz à travers la section de la turbine, qui, comme l'on a déjà mentionné, transforme l'énergie thermique et de pression en une énergie cinétique et, grâce aux évolutions de

l'arbre de puissance, le travail externe utile s'y produit, en raison de la connexion avec une machine réceptrice.

Plus de 50% de l'énergie développée par la détente dans la turbine à gaz est absorbée par le compresseur axial pour son travail de compression. En aval de la section (4), les gaz s'échappent vers l'atmosphère.

III.4.1 CYCLE BRAYTON :

Le cycle thermodynamique grâce auquel une turbine à gaz travaille est connu comme Cycle de Brayton. Ce diagramme est utile pour comprendre plus aisément le signifié du cycle thermodynamique.

En particulier, remarquer les transformations de la compression et de l'expansion, qui bien sur ne sont pas isentropiques. A ce propos, on a :

Le travail de compression spécifique W_c , de (1) à (2), est exprimé avec une bonne approximation par le rapport suivant:

$$W_c = C_{pm}(T_2-T_1) \cdot (T_2-T_1) \quad (\text{Kj} / \text{Kg}_{\text{asp.air}})$$

Le travail d'expansion spécifique W_e , de (3) à (4) est exprimé par:

$$W_t = C_{pm}(T_3-T_4) \cdot (T_3-T_4) \quad (\text{Kj} / \text{Kg}_{\text{gaz}})$$

La chaleur Q_1 , fournie à la chambre de combustion de (2) à (3) est exprimée par:

$$Q_1 = C_{p(T_3)}(T_3)(Q_{\text{air}}+Q_C) - C_{p(T_2)}(T_2) (Q_{\text{air}}) \quad (\text{Kcal} / \text{h})$$

Le cycle de la turbine à gaz termine idéalement avec la transformation de (4) à (1), qui correspond au refroidissement des gaz d'échappement, dans lesquels la chaleur Q_2 est aspirée dans l'atmosphère qui est considérée un réfrigérant de capacité infinie. Le rapport thermodynamique qui décrit le procédé de refroidissement des gaz échappés est le suivant:

$$Q_2 = C_{pm}(T_4-T_1) \cdot (T_4-T_1) \cdot (Q_{\text{air}}+Q_C) \quad (\text{Kcal} / \text{h})$$

Les différentes valeurs pour C_{pm} , exprimées dans les rapports précédents, représentent la chaleur moyenne spécifique à pression constante entre les valeurs extrêmes de température dans l'intervalle examiné, Q_{air} et Q_C sont respectivement les débits d'air et de combustible contribuant à la combustion exprimés en Kg/h.

Pour une évaluation plus rigoureuse, il serait nécessaire de procéder au moyen de calculs avec les intégraux. Une fois que Q_1 , Q_2 et W_1 sont connus, il est possible d'obtenir les valeurs pour les paramètres significatifs suivants:

Efficacité thermodynamique $\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1$

Ce rapport signifie que, à parité de chaleur Q_1 , introduite dans la chambre de combustion par le carburant, l'efficacité augmentera lorsque Q_2 diminue, "dissipée" dans l'atmosphère. Cette chaleur est récupérée partiellement dans les cycles combinés et dans le cycle de régénération.

Le travail utile W_U fourni à la machine menée = $(Q_C + Q_{air})W_t - Q_{air} W_c$

Dans les applications, où la génération de la puissance est obtenue au moyen de la variation de la vitesse de la machine menée, l'on utilise en général turbines à gaz à deux arbres (voir le diagramme dans la figure 19; dans ce cas, la turbine est divisée en deux sections séparées du point de vue mécanique:

- Une section à haute pression, qui fonctionne à vitesse constante dans une gamme ample de puissances et mène exclusivement un compresseur axial.
- Une section à basse pression, reliée à la machine fonctionnant au moyen d'un coupleur; cette section peut varier sa vitesse de fonctionnement indépendamment de la section turbine à haute pression.
- Cette configuration, en outre d'autres éléments que l'on décrira dans le Chapitre 4, est utilisée pour le réglage de la vitesse de la machine menée sans demander la variation de la vitesse du compresseur axial; par conséquent ce dernier peut continuer à fonctionner à sa vitesse préétablie par projet, avec une efficacité optimale.

Les rapports décrits sont en général valables pour tous les types de machine. Le concept classique de thermodynamique permet de formuler une évaluation correcte du Cycle de Brayton et de l'influence de paramètres tels que pressions, températures, chaleurs spécifiques, etc.

Conclusion générale

Suite à cette étude, on peut tirer les conclusions suivantes :

Facteurs influant le fonctionnement de la turbines :

Plus la température ambiante augmente, plus le débit d'air massique soutiré par le compresseur axial diminue, ce qui entraîne une augmentation de la consommation du débit de combustible, pour compenser le manque du débit d'air engendrant une diminution des émissions du CO₂.

L'élévation du taux de compression du compresseur axial entraîne l'augmentation du rendement de la détente de la turbine.

L'augmentation du taux de compression permet aussi une diminution de la consommation du fuel gaz, la température d'échappement, et des émissions du CO₂.

L'augmentation du PCI de combustible permet une consommation en combustible moins importante grâce à l'apport de chaleur important, une température des fumées plus basse, et des émissions de CO₂ plus grandes.

L'installation d'un réchauffeur est une technique avérée et efficace, permettant d'améliorer le rendement de l'installation et diminuer les émissions du CO₂.

le cycle combiné permet d'améliorer le rendement énergétique tout en réduisant les émissions atmosphériques du CO₂.

Dans une perspective de croissance continue de la consommation d'énergie, la réduction du taux d'émissions de CO₂ constitue un défi technologique majeur pour les années à venir. Les technologies développées des turbines à gaz visent, en particulier, à obtenir des rendements optimums tout en réduisant au maximum l'émission du CO₂

Des solutions existent pour réduire ces émissions. En particulier, la capture et la séquestration géologique du CO₂ apparaissent comme une voie prometteuse pour le futur.

BIBLIOGRAPHIE:

- [1] Thermodynamic and physical propriety data volume.
" Carl. Yaws "
- [2] Applied Hydrocarbon Thermodynamics volume 1.
" UNGIK LEE "
- [3] Manuel de formation de la turbine MS 5002 b.
" Nuovo pignone – Florence - (1987) ".
- [4] General Electric. Gas turbine principles volume (1).
" GE International Sale & services, Schenectady, New York (1988) ".
- [5] Gas Turbine Engineering Handbook.
" Meherwan P. Boyce ".
- [6] Standard Hand Book of petroleum (Natural gas engineering, volume 01 et 02)
" William C.Lyons volume 01 "
- [7] Machine Transformatrices d'énergie (Tomes 1et 2).
" G. Lemasson ".
- [8] Compressors (Selection & sizing).
" Royce N. Brown ".
- [9] Applied process design (For Chemical & Petrochemical. Plants volume (3),
Second Edition). " Ernest E. Ludwig ".
- [10] Technique de l'ingénieur Machines hydrauliques & thermiques :
" Environnement : BL2 – B 44 25 "
" Turbomachines : BL 3 – B 44 00, B 44 10, BM 48 00 ".
- [11] Reciprocating compressors.
" Heinz. P. Bloch & John. J. Hoefner ".
- [12] Thermodynamique appliqué des Turbines à Gaz.
" SH / DP / MN ".
- [13] Energétique et turbomachines (691 / IGM).
" G. Danieus ".
- [14] « http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_%C3%A0_gaz »
- [15] « http://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre »
- [16] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Rejets_de_CO2#Sources_anthropiques_et_effet_de_serre>
- [17] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Rejets_de_CO2>
- [18] « http://fr.wikipedia.org/wiki/Protocole_de_Ky%C5%8Dto »
- [19] <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpgaum.htm>>