



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2025

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج. م. / ك.ع.ت//2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : INDUSTRIES PETROCHIMIQUES

Option: GENIE PETROCHIMIQUE

Thème

**Étude des performances de la turbine à gaz MS7121E
au niveau du complexe GL3/Z**

Présenté par: BENDANI Ghaouti Charef

Soutenu le 24/06/2025 devant le jury composé de :

Président: MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem
Examineur: BELARBI Ilhem	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur: DRIOUCH Aouatef	Pr	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, Je remercie Allah tout puissant de m' avoir donner le courage, la volonté et la patience d'achever ce modeste mémoire

C'est avec un plaisir particulier que je remercie Pr DRIOUCH

Aouatef qui a suivi de près mon travail et je la remercie pour son aide et sa disponibilité

Que tous les membres du jury puissent trouver ici l'expression de ma gratitude et ma reconnaissance, Dr.Mezouagh Amina pour avoir accepté de présidé ce jury et Dr.Belarbi Ilhem pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie très vivement le personnel du département de production qui m' a accueillis an sein du complexe GL3/Z, et pour leurs encouragements et leurs aides.

Je remercie très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
I.1 Introduction	2
I.2 Emplacement de l'usine	2
I.3 But du Complexe GNL3/Z.....	3
➤ Capacités de production annuelle.....	4
➤ Stockage	4
I.4 Description Générale des Unités et des Installations	4
I.5 Process de GNL.....	6
<i>I.5.1 Propriétés physico-chimiques du GNL.....</i>	<i>7</i>
<i>I.5.2 La Chaîne GNL</i>	<i>7</i>
I.6 Rôle de la turbine à gaz dans le GNL	11
I.7 Emplacement dans la chaîne GNL.....	11
I.8 Les turbines à gaz (TAG).....	11
I.9 Définition de la turbine à gaz	12
I.10 Les principaux éléments de la turbine à gaz.....	12
I.10.1 Le compresseur.....	13
I.10.2 La chambre de combustion	14
I.10.3 La turbine (ou section de détente)	15
I.11 Classification des turbines à gaz.....	16
I.11.1 D'après le mode de construction.....	16
a. Turbine mono-arbre.....	16
b. Turbine bi-arbre.....	17
I.11.2 D'après le mode de travail.....	17
a. Turbine à action.....	17
b. Turbine à réaction	18
a. Turbine à cycle simple :.....	19
b. Turbine à cycle avec régénération :.....	19
I.12 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz	19

I.13 Description et fonctionnement de la Turbine à gaz MS7121E	20
I.14 Description du passage du gaz	21
II.1 Introduction.....	24
II.2 Etude des cycles thermodynamiques d'une turbine à gaz.....	24
II.2.1 Le cycle de Brayton, Cas idéale	25
II.2.2 Cycle réel de Brayton	28
II.3 Paramètres opératoires de la turbine.....	30
II.4 Calcul des paramètres thermodynamiques de la turbine à gaz MS-7121E.....	31
II.4.1 Entrée d'air	31
➤ La masse volumique	31
II.4.2 Entrée du compresseur.....	31
➤ La température	31
➤ La pression	31
➤ La masse volumique	31
➤ Le débit massique de l'air à l'entrée du compresseur	32
II.4.3 Entrée de la chambre de combustion.....	32
➤ La pression	32
➤ La température	32
➤ Le débit massique du combustible	32
II.4.4 Entrée de la turbine	33
➤ La pression	33
➤ La température	33
II.5 Paramètres de performances de la turbine à gaz MS-7121E.....	33
II.6 Interprétation des résultats.....	35
II.7 Recommandations.....	39
❖ Propositions pour améliorer les performances face à l'augmentation de la température	39
II.8 Conclusion	40
Conclusion Générale.....	42

Liste des figures

Figure 1: Position du site GL3/Z.	2
Figure 2 : Vue 3D d'Ensemble du complexe GL3/Z.....	3
Figure 3 : Parcours gaz récupération jusqu'à l'expédition (cas usine GL3/z).	7
Figure 4: Complexe de liquéfaction du gaz naturel « SONATRACH – GL3/Z ».....	8
Figure 5: : Purification typique pour liquéfaction de gaz naturel	9
Figure 6 : Turbine à gaz.....	13
Figure 7: Disposition du carter de combustion MS7121E.....	15
Figure 8: Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre	16
Figure 9: Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.....	17
Figure 10: Schéma d'une turbine à action et à réaction.....	18
Figure 11: Turbine à gaz fram7 (MS7121E) du complexe GL3/Z	20
Figure 12: Sections principales de l'ensemble de la Turbine à gaz MS7121E.	21
Figure 13 : Description du système du passage de gaz.....	22
Figure 14: Cycle de Brayton d'une turbine à gaz	25
Figure 15: Débit massique d'air d'entrée du compresseur (Kg/s)	35
Figure 16: Masse volumique d'air d'entrée du compresseur (Kg/m ³)	36
Figure 17: Travail spécifique du compresseur (kj/kg)	37
Figure 18: Puissance nette MW	38
Figure 19: Le rendement thermique.....	39

Liste des tableaux

Tableau 2: Paramètres opératoires de la turbine	30
Tableau 3: Paramètres de fonctionnement de la turbine à différentes températures	34

Nomenclature

<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>	<u>Signification</u>
P	bar	Pression
T	K	Température réelle
Cp	$J.kg^{-1}.k^{-1}$	La chaleur spécifique de l'air
r	/	Taux de compression
η_c	/	Efficacité isentropique du compresseur
η_{comb}	/	Efficacité de la chambre de combustion
η_t	/	Efficacité isentropique de la turbine
η_m	/	Efficacité de transmission mécanique
Δp	%	Perte de pression a la combustion
Pt	MW	La puissance de la turbine
m_a	kg/s	Débit massique de l'air
CP _m	$J.kg^{-1}.k^{-1}$	La chaleur spécifique moyen
Mair	Kg/Kmole.	La masse moléculaire de l'air
Wcomp	KJ/KG	Le travail du compresseur
Wt	KJ/KG	Le travail de la turbine
Pc	KJ	La puissance du compresseur
Qh	KJ/KG	La quantité de chaleur dégagée dans la chambre de combustion
r'	/	Le rapport entre (pression d'entrée p3 et pression de sortie p4)
Wu	KJ/KG	Le travail utile
PCI	Kj/Nm ³	Pouvoir calorifique de chaque constituant

Résumé

Le complexe GL3/Z à Arzew, infrastructure clé pour la liquéfaction du gaz naturel en Algérie, repose sur des équipements comme la turbine à gaz General Electric MS7121E, essentielle au fonctionnement des compresseurs. L'étude menée vise à évaluer ses performances, en particulier son rendement, tout en identifiant les facteurs influents comme la température, la pression et le débit d'air. Il ressort que la température ambiante a un impact significatif : elle réduit la densité de l'air, limite la combustion et augmente la consommation énergétique interne, ce qui dégrade le rendement. L'analyse met en lumière l'importance d'optimiser l'exploitation de la turbine dans des conditions climatiques chaudes.

Abstract

The GL3/Z complex in Arzew, a key facility for natural gas liquefaction in Algeria, relies on equipment such as the General Electric MS7121E gas turbine, which is essential for driving the compressors. The study aims to assess the turbine's performance, particularly its efficiency, while identifying influencing factors such as temperature, pressure, and air mass flow. The results show that ambient temperature has a significant impact: it reduces air density, limits combustion, and increases internal energy consumption, thereby lowering efficiency. The analysis highlights the importance of optimizing turbine operation under hot climatic conditions.

المخلص:

يُعدّ مجمع GL3/Z في أرزيو من البنى التحتية الإستراتيجية في الجزائر لعملية تسيل الغاز الطبيعي، ويعتمد بشكل أساسي على التوربين الغازي من نوع General Electric MS7121E الذي يساهم في تشغيل الضواغط. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم أداء هذا التوربين، لا سيما من حيث المردودية، مع تحليل العوامل المؤثرة مثل درجة الحرارة، الضغط، وتدفق الهواء. وقد أظهرت النتائج أن درجة الحرارة المحيطة تؤثر بشكل كبير، حيث تؤدي إلى انخفاض كثافة الهواء، مما يحد من عملية الاحتراق ويزيد من استهلاك الطاقة الداخلية، وبالتالي يؤدي إلى تراجع في المردودية. وتبرز هذه الدراسة أهمية تكيف تشغيل التوربين مع الظروف المناخية الحار

Introduction Générale

L'Algérie, riche en ressources naturelles, est l'un des principaux exportateurs mondiaux de gaz naturel. Pour valoriser cette ressource, le pays s'est doté d'infrastructures de grande envergure, parmi lesquelles figure le complexe GL3/Z. Situé dans la zone industrielle d'Arzew, ce complexe est dédié à la liquéfaction du gaz naturel en vue de son transport maritime. Grâce à ses installations modernes, le GL3/Z joue un rôle stratégique dans l'approvisionnement énergétique international et dans l'économie nationale [1].

Au cœur du processus de liquéfaction, plusieurs équipements industriels assurent les opérations de compression, de refroidissement et de traitement du gaz. Parmi ces équipements, la turbine à gaz occupe une place essentielle. Elle fournit l'énergie mécanique nécessaire à l'entraînement des compresseurs, élément clé du cycle de liquéfaction [2,3]. La fiabilité et l'efficacité de cette turbine conditionnent directement la performance globale de l'unité de production [4].

L'étude des performances de la turbine à gaz au niveau du complexe GL3/Z revêt donc une importance particulière. Il s'agit non seulement de garantir un fonctionnement optimal, mais aussi de maîtriser la consommation énergétique, de réduire les coûts d'exploitation et de limiter les émissions polluantes [5,6]. Cette étude vise à analyser le rendement de la turbine, à identifier les facteurs qui influencent son comportement, et à proposer des pistes d'amélioration pour optimiser son efficacité dans un cadre industriel exigeant. Parmi les paramètres influents sur le rendement de la turbine, on peut citer la température d'entrée des gaz, la pression, le débit massique d'air, ainsi que les conditions de charge [7,8].

La turbine étudiée est un modèle General Electric MS7121E. L'objectif principal de ce mémoire est d'effectuer une étude approfondie des performances de cette turbine au sein du complexe GL3/Z, en mettant un accent particulier sur l'influence de la température sur son fonctionnement [7,8]. Le mémoire est structuré en deux chapitres : le premier porte sur la description du complexe GL3/Z et de la turbine à gaz MS7121E, tandis que le second est consacré à l'analyse des performances de la turbine et à l'étude de l'effet de la température sur son fonctionnement.

Chapitre I

Description générale du complexe GL3/Z

I.1 Introduction

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL3/Z, situé dans la zone industrielle d'Arzew à environ 35 kilomètres à l'est d'Oran et à une soixantaine de kilomètres au nord-ouest de Mostaganem, est une infrastructure moderne exploitée par Sonatrach et mise en service en 2014 [9]. Équipé d'un méga train utilisant le procédé technologique C3-MR, il affiche une capacité annuelle de production de 4,7 millions de tonnes [10] de gaz naturel liquéfié (GNL), ce qui en fait un maillon stratégique de l'activité liquéfaction et séparation des hydrocarbures (LQS) du groupe. En plus du GNL, le complexe produit divers sous-produits tels que le propane (275 000 t/an), l'éthane (300 000 t/an), le butane (58 000 t/an), la gazoline (47 000 t/an), ainsi qu'un flux de gaz riche en hélium transféré vers le complexe Helios. Par son envergure et sa modernité, GL3/Z renforce la position de Sonatrach comme un acteur majeur sur le marché international du GNL et des gaz de pétrole liquéfiés (GPL).

I.2 Emplacement de l'usine

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL3/Z est situé sur la côte méditerranéenne, dans la zone industrielle d'Arzew El Djedid, à Bethioua, à l'est de la ville d'Arzew, dans la wilaya d'Oran (figure 1). Il s'étend sur une superficie de 54,6 hectares et bénéficie d'un emplacement stratégique à environ 35 kilomètres à l'est d'Oran et 450 kilomètres à l'ouest d'Alger.



Figure 1: Position du site GL3/Z.

Le site est bordé au nord par la mer Méditerranée et la route du port, et au sud par la route principale de la zone industrielle. À ses limites, on trouve l'usine de GP1Z à l'est, l'usine de dessalement KHARAMA et le complexe GL2Z à l'ouest. Grâce à sa proximité immédiate avec le port industriel d'Arzew, ce complexe est un point névralgique pour l'exportation maritime du GNL algérien vers les marchés internationaux.

I.3 But du Complexe GNL3/Z

Le complexe GL3/Z (Gaz Naturel Liquéfié 3Z) est une installation industrielle de liquéfaction du gaz naturel située à Arzew, en Algérie (figure 2). Il a été conçu dans le but principal de transformer le gaz naturel en gaz naturel liquéfié (GNL), afin de faciliter son transport, notamment par voie maritime. Ce complexe stratégique permet à l'Algérie d'augmenter sa capacité de production et d'exportation de GNL, tout en répondant à la demande croissante en énergie sur les marchés internationaux, en particulier en Europe et en Asie.

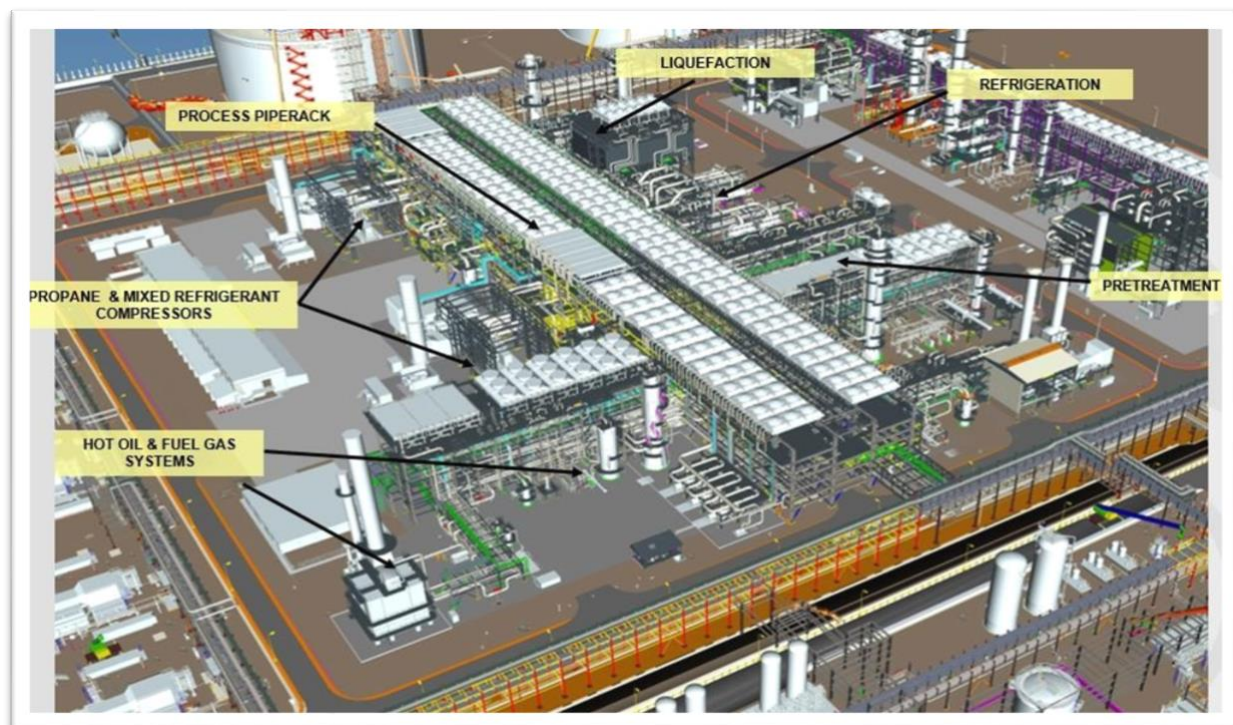


Figure 2 : Vue 3D d'Ensemble du complexe GL3/Z

Il contribue également à la valorisation des ressources naturelles nationales, générant d'importants revenus pour le pays et créant des opportunités économiques et d'emploi à l'échelle locale et nationale. Le complexe s'inscrit ainsi dans la stratégie énergétique de l'Algérie, qui vise à maintenir sa position parmi les grands exportateurs mondiaux de gaz naturel.

➤ **Capacités de production annuelle**

La capacité de production annuelle du train GL3/Z reflète l'importance stratégique du complexe :

- 4,7 millions de tonnes de GNL net (cargos),
- 275 000 tonnes de propane,
- 58 000 tonnes de butane,
- 47 000 tonnes de gazoline,
- 300 000 tonnes d'éthane.

En parallèle, un flux d'hélium brut est récupéré à la dernière phase du cycle de liquéfaction. Ce flux sera acheminé vers une future unité d'extraction d'hélium. Quant à l'éthane, il est majoritairement dirigé vers une usine d'hydrocraquage voisine, tout en couvrant également les besoins internes du train, notamment pour l'appoint en mélange réfrigérant et le gaz combustible.

➤ **Stockage**

Le GNL est stocké dans deux réservoirs à rétention totale chacun d'une capacité de 160,000 m³ et les produits du GPL sont stockés dans des réservoirs de rétention totale séparés respectivement de 56000 m³ pour C3 et 12000 m³ pour C4. La gazoline produite est stabilisée et stockée dans une sphère avec une capacité de 1800 m³. Le GNL est exporté par une nouvelle jetée, conçue à M7 et les jetées existantes par la roue du GPL M6 et D1. La structure de la torche est située 'offshore', accessible par une route sur digue, qui doit être construite.

I.4 Description Générale des Unités et des Installations

L'usine comprend un train de procédé, les utilités associées et l'installation off site. Le train de procédé comprend un compresseur de gaz d'alimentation, une section d'élimination du mercure, une unité d'élimination du CO₂ (sous licence de BASF), un système de déshydratation, une unité

de récupération et de fractionnement des NGL et un cycle de réfrigération au propane dédié, une section de liquéfaction et de réfrigération (C3SPLIT MR sous licence APCI).

Les utilités et les installations off sites comprennent le système de génération d'énergie, le stockage et le chargement sur les cargos du GNL et du GPL, l'huile chaude, l'eau de refroidissement, l'air service/instrument, l'azote, le gaz combustible, les torches, le traitement des eaux usées, l'eau de service/potable, le diesel, le stockage du réfrigérant et de la gazoline Le procédé tout entier est effectué dans les unités opérationnelles suivantes :

- Unité 11 : Conditionnement du gaz d'alimentation
- Unité 12 : Elimination du gaz acide
- Unité 13: Déshydratation du gaz
- Unité 14 : Système du gaz combustible (Train 1)
- Unité 15 : Liquéfaction
- Unité 16 : Réfrigération
- Unité 17 : Récupération et fractionnement du GNL
- Unité 18 : Système de l'huile chaude
- Unité 19 : Système d'Eau de refroidissement

Utilité – Commune/Générale :

- Unité 01 : Installations d'entrée
- Unité 02 : Stockage du solvant de l'amine
- Unité 08 : Stockage de l'huile chaude
- Unité 51 : Génération de l'énergie électrique
- Unité 53 : Système du générateur diesel de Secours
- Unité 55 : Système gaz combustible commun
- Unité 56 : Système de l'air instrument et usine
- Unité 57 : Système de l'azote
- Unité 58 : Circuit de l'eau potable

- Unité 59 : Système de l'eau de service et déminéralisé
- Unité 64 : Traitement des eaux usées et Effluents

Off-site – Commune/Générale :

- Unité 71 : Produit de stockage et chargement du GNL
- Unité 72 : Produit de stockage et chargement du GPL
- Unité 75 : Système de la torche
- Unité 73 : Système de stockage propane éthane interne
- Unité 76 : Système de stockage de gazoline

Système anti- incendie off-site :

- Unité 63 : Système d'Eau Anti-incendie
- Unité 77 : Lutte Anti-incendie

I.5 Process de GNL

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est du gaz naturel transformé en liquide par un processus de refroidissement à très basse température, généralement autour de -162 °C . Cette liquéfaction réduit le volume du gaz d'environ 600 fois, ce qui facilite son stockage et son transport, notamment par bateau, vers des régions éloignées sans gazoducs. Le processus comprend plusieurs étapes : purification du gaz (pour éliminer l'eau, le CO_2 , le soufre, etc.), refroidissement progressif dans des échangeurs cryogéniques, puis stockage dans des réservoirs isothermes. Une fois arrivé à destination, le GNL est regazéifié pour être injecté dans le réseau de distribution (figure 3).

La première chaîne commerciale de GNL a démarré en 1964 avec la mise en service de la première usine de liquéfaction, la CAMEL, à Arzew en Algérie, et ce pour alimenter le terminal de CANVEY ISLAND en Grande Bretagne.

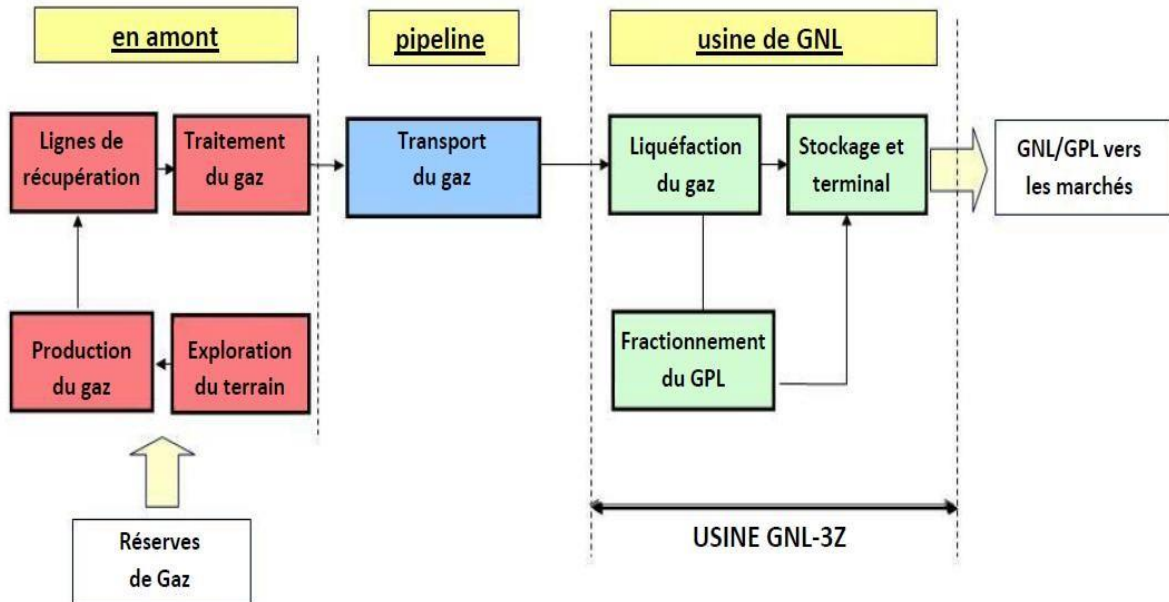


Figure 3 : Parcours gaz récupération jusqu'à l'expédition (cas usine GL3/Z).

I.5.1 Propriétés physico-chimiques du GNL

- Le GNL est principalement constitué de méthane (de 87% à 99% en moles) ;
- Le point d'ébullition du GNL varie avec sa composition, généralement -162 ° C à la pression atmosphérique ;
- Sous l'état liquide, il occupe environ 1/600ème de volume à l'état gaz tout en gardant son pouvoir calorifique ;
- Le GNL est incolore (ressemble à de l'eau), inodore, non corrosif et non toxique ;
- La masse volumique du GNL est entre 430 kg/m³ et 470 kg/m³, soit à moitié moins dense que l'eau ;
- Le GNL est non-inflammable à l'état liquide.

I.5.2 La Chaîne GNL

Trois (03) maillons composent la chaîne du GNL.

- a. Usine de liquéfaction ;
- b. Navire méthanier ;
- c. Terminal de regazéification.

a. Usine de liquéfaction

L'usine de liquéfaction constitue le point de départ de la chaîne GNL (figure 4). Elle est implantée à proximité des sites d'extraction de gaz naturel. Son rôle est de refroidir le gaz à très basse température (environ -162 °C) afin de le transformer en liquide. Cette transformation permet de réduire le volume du gaz d'environ 600 fois, ce qui rend le transport plus économique et plus sûr. Avant la liquéfaction, le gaz subit un traitement de purification pour éliminer les impuretés (eau, CO_2 , H_2S , etc.) qui pourraient endommager les équipements cryogéniques. Le GNL obtenu est ensuite stocké temporairement dans des réservoirs cryogéniques en attendant son chargement.



Figure 4: Complexe de liquéfaction du gaz naturel « SONATRACH – GL3/Z »

Le gaz naturel, à sa sortie du gisement, est un mélange d'hydrocarbures dont la teneur en méthane est supérieure à 80%. Il contient également des hydrocarbures lourds tels que l'éthane, propane, Butane, pentane mais quelques constituants non-hydrocarbures tels qu'He, N_2 , CO_2 , Hg et l' H_2O , ainsi que des impuretés sous forme de poussières. Dans l'unité de liquéfaction, le gaz naturel passe par plusieurs sections (figure 5) avant sa liquéfaction et qui sont :

- Section traitement ;
- Section séparation (fractionnement) ;
- Section liquéfaction.

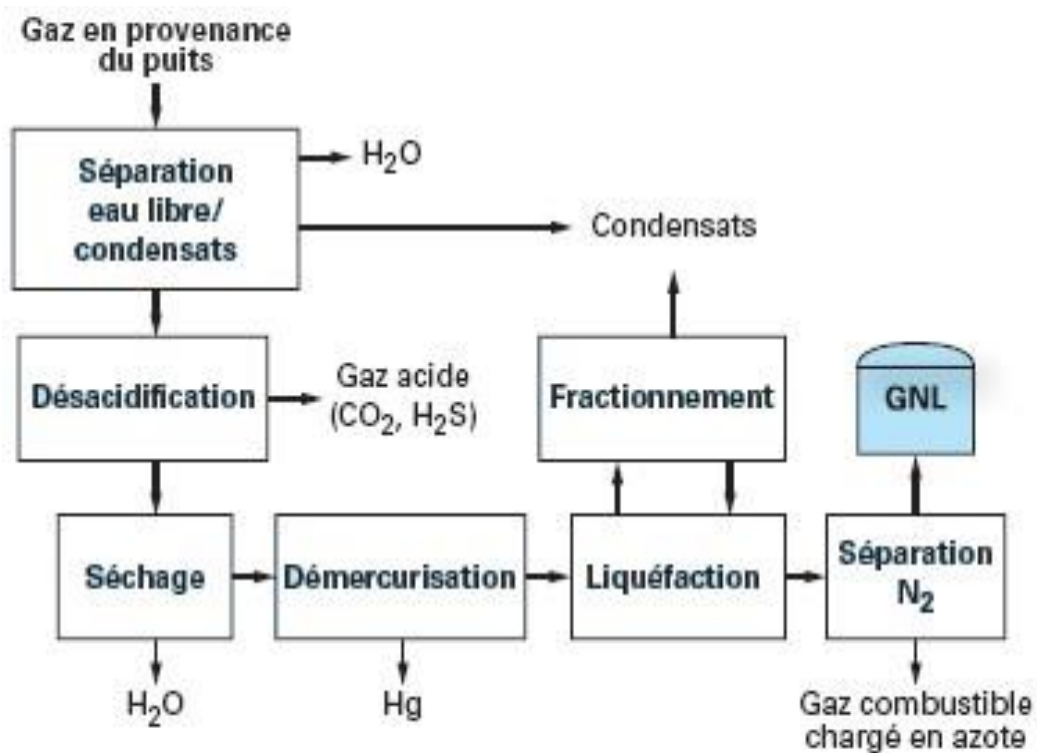


Figure 5: : Purification typique pour liquéfaction de gaz naturel .

- ❖ **La section de traitement** a pour objectif :
 - Éliminer le dioxyde de carbone (CO_2) du gaz naturel qui peut endommager les unités de liquéfaction en s'y solidifiant dans les sections basse température ;
 - Éliminer l'eau (déshydratation) pour éviter la formation d'hydrates et le gel dans les échangeurs cryogéniques ;

- Eliminer toute trace de mercure (Hg), élément toxique qui peut corroder les alliages en aluminium utilisés dans les échangeurs.

❖ **La section de séparation**, appelée fractionnement, est constituée d'une série de colonnes de distillation et a pour objectif :

- Séparer les hydrocarbures lourds du gaz léger ;
- Fractionner les hydrocarbures lourds en produit pure : l'éthane, propane, butane et Gazoline ;
- Quant au gaz léger, il devra répondre à certaines spécifications avant d'être envoyé vers la section de liquéfaction. Ces spécifications délimitent les teneurs en gaz acides, en eau et en hydrocarbures lourds.

❖ Dans **la section liquéfaction**, le gaz passe à travers un ou plusieurs échangeurs cryogéniques. Le gaz est ainsi refroidi, liquéfié et enfin détendu pour être stocké sous une pression atmosphérique et une température de -160°C.

Les usines de liquéfaction disposent également d'une zone de stockage et expédition où le GNL est stocké à pression atmosphérique puis expédié.

b Transport du GNL par méthanier

Le GNL stocké est ensuite chargé à bord de méthanier. Ces navires géants, spécialement conçus pour cet usage, sont munis d'une double coque avec un revêtement intérieur thermiquement isolant pour garder le gaz liquide à une température de -160°C. Pendant la traversée pour rejoindre les zones de consommation, le méthane qui s'évapore est récupéré pour être utilisé comme carburant et aider à la propulsion du navire.

c Terminal de regazéification du GNL

Une fois à destination, les méthaniers déchargent leur cargaison sur un terminal doté d'une installation de réception et de stockage GNL, similaires à ceux utilisés sur les sites de liquéfaction. Dans ces terminaux, le GNL est reconverti en un état gazeux au moyen d'un regazéifieur dont le gaz passe du GNL pour être réchauffé avec de l'eau de mer ou de l'eau chaude.

I.6 Rôle de la turbine à gaz dans le GNL

La turbine à gaz joue un rôle essentiel dans les usines de liquéfaction du gaz naturel, c'est-à-dire au tout début de la chaîne GNL. Elle est utilisée principalement pour entraîner les compresseurs qui font circuler le gaz dans les différentes étapes de traitement et de refroidissement. En effet, pour pouvoir liquéfier le gaz, il faut le comprimer, le refroidir progressivement, puis le faire circuler à travers des cycles thermodynamiques complexes. La turbine à gaz fournit la puissance mécanique nécessaire, souvent de plusieurs dizaines de mégawatts, pour ces opérations. Elle peut aussi produire de l'énergie électrique pour l'ensemble de l'installation.

I.7 Emplacement dans la chaîne GNL

La turbine à gaz se trouve dans l'usine de liquéfaction, juste après l'unité de traitement du gaz brut. Elle est couplée aux compresseurs de réfrigérant (dans les cycles de refroidissement utilisant du propane, de l'éthane ou du méthane) ou directement aux compresseurs de gaz dans certains procédés. Elle fait donc partie des équipements critiques pour maintenir la pression et assurer les températures requises à chaque étape du cycle de liquéfaction. Dans certaines conceptions, plusieurs turbines sont utilisées en parallèle pour garantir une redondance et une fiabilité optimale.

I.8 Les turbines à gaz (TAG)

Les turbines à gaz (TAG) ont connu au cours dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications industrielles. En particulier dans le domaine du transport et de réinjection du gaz.

I.9 Définition de la turbine à gaz

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne fonctionnant selon le cycle de Brayton. Elle est considérée comme un système autosuffisant, car elle comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, y injecte du carburant dans une chambre de combustion, puis fait circuler les gaz chauds en détente dans une turbine. Ce processus permet de convertir l'énergie thermique du mélange air-combustible en énergie mécanique utile. L'énergie produite est ensuite transmise à une machine réceptrice (comme un alternateur, une pompe centrifuge ou un compresseur de gaz), pour répondre aux besoins d'un processus industriel. Grâce à sa grande puissance, sa compacité et sa rapidité de mise en œuvre, la turbine à gaz est utilisée dans de nombreux secteurs : production d'électricité, entraînement de compresseurs (comme dans les usines de GNL), propulsion aéronautique, etc.

I.10 Les principaux éléments de la turbine à gaz

L'ensemble de la turbine à gaz (figure 6) est constitué par trois composantes essentielles :

- Le compresseur à écoulement axial.
- La chambre de combustion.
- La Turbine.



Figure 6 : Turbine à gaz

I.10.1 Le compresseur

Le compresseur constitue la première section d'une turbine à gaz. Sa fonction principale est de comprimer l'air atmosphérique entrant afin d'augmenter sa pression, condition essentielle pour assurer une combustion efficace dans les chambres de combustion. Cette élévation de pression améliore le rendement global de la machine.

Le compresseur est généralement de type axial, composé de plusieurs étages successifs formés d'aubes rotatives (rotor) et stationnaires (stator), disposées selon un profil aérodynamique. L'air est guidé à travers ces étages où il est progressivement accéléré puis comprimé. Les aubes du rotor transmettent l'énergie mécanique nécessaire à la compression, tandis que les aubes du stator réorientent le flux d'air afin qu'il pénètre le rotor suivant avec l'angle optimal.

La structure du compresseur comprend également :

- Des aubes orientables à entrée variable permettant d'ajuster le débit d'air selon les besoins de fonctionnement,

- Des aubes directrices de sortie pour canaliser l'air vers les chambres de combustion.

I.10.2 La chambre de combustion

La chambre de combustion est située juste après le compresseur. Elle constitue la zone où le carburant (gaz naturel, kérosène, etc.) est injecté et mélangé à l'air comprimé en provenance du compresseur. Ce mélange air-carburant est ensuite enflammé, générant des gaz chauds à haute température et haute pression, qui seront dirigés vers la turbine pour produire de l'énergie mécanique.

La conception de la chambre vise à maximiser la libération de l'énergie chimique du carburant tout en assurant une température uniforme à la sortie, afin de limiter les contraintes thermiques sur les aubes de la turbine. Elle doit également réduire au minimum les émissions polluantes, conformément aux normes environnementales en vigueur.

Le système de combustion adopté est généralement de type à écoulement inversé, ce qui permet de compacter l'installation. Les chambres de combustion sont disposées autour de la périphérie du carter de refoulement du compresseur. Elles sont numérotées dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'on les observe en aval et depuis le sommet de la machine.

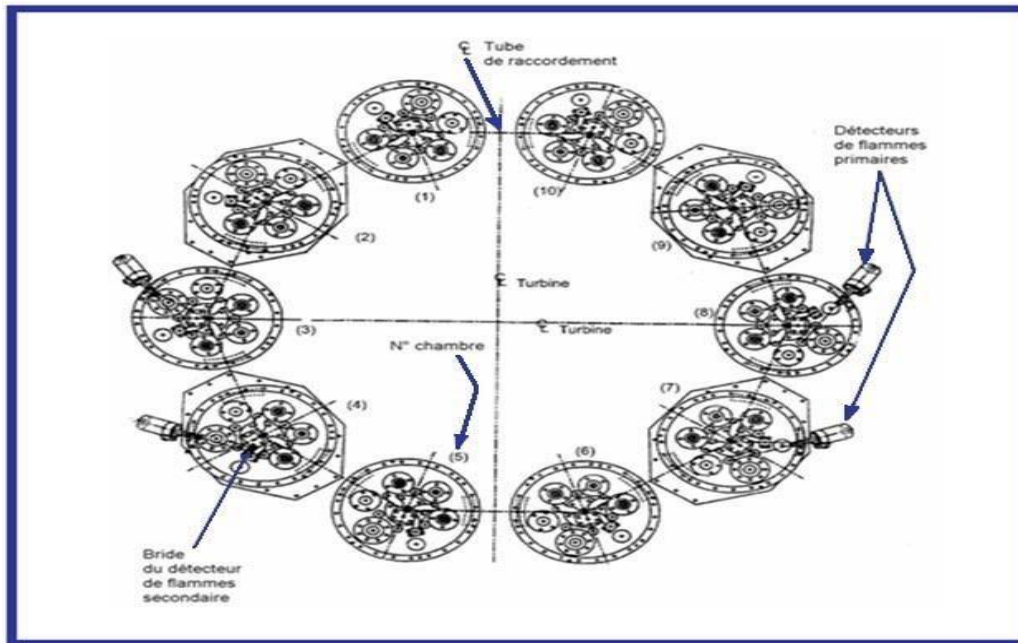


Figure 7: Disposition du carter de combustion MS7121E.

Ce système comporte également : des gicleurs de combustible, un système d'allumage de bougies, Des détecteurs de flammes et des tubes de raccordement.

I.10.3 La turbine (ou section de détente)

La turbine constitue le cœur de la machine, où se produit la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique. Les gaz brûlants et sous pression, issus de la chambre de combustion, y subissent une détente qui provoque une chute de pression et de température. Cette détente permet de générer une rotation mécanique, utilisée pour entraîner à la fois le compresseur (par l'intermédiaire d'un arbre de transmission) et, dans de nombreuses applications, une machine utile externe comme un alternateur, un compresseur ou une pompe.

La turbine est généralement composée de plusieurs étages d'aubes, conçus pour résister à des températures extrêmes. Dans le cas de la turbine à gaz MS-7121E, la section de la turbine comprend trois étages, dans lesquels l'énergie des gaz chauds est convertie en travail mécanique. Cette section est constituée de plusieurs éléments majeurs : le rotor de la turbine, le bâti

d'échappement, le diffuseur d'échappement, les gicleurs (ou distributeurs de gaz) et les capots assurant l'enveloppe et le guidage du flux.

I.11 Classification des turbines à gaz

I.11.1 D'après le mode de construction

a. Turbine mono-arbre

Le compresseur et les sections de la turbine de ces machines se composent d'un seul rotor simple (figure 8) , où la turbine produit l'énergie pour entrainer le compresseur ainsi que l'énergie pour entrainer la charge. Les turbines à un seul arbre sont favorables dans le cas où la charge est constante. Les turbines à gaz à un seul arbre sont aptes à l'entraînement des machines qui fonctionnent à vitesse constante. Telle que les alternateurs et, pour cette raison, sont employées dans la génération d'énergie électrique.

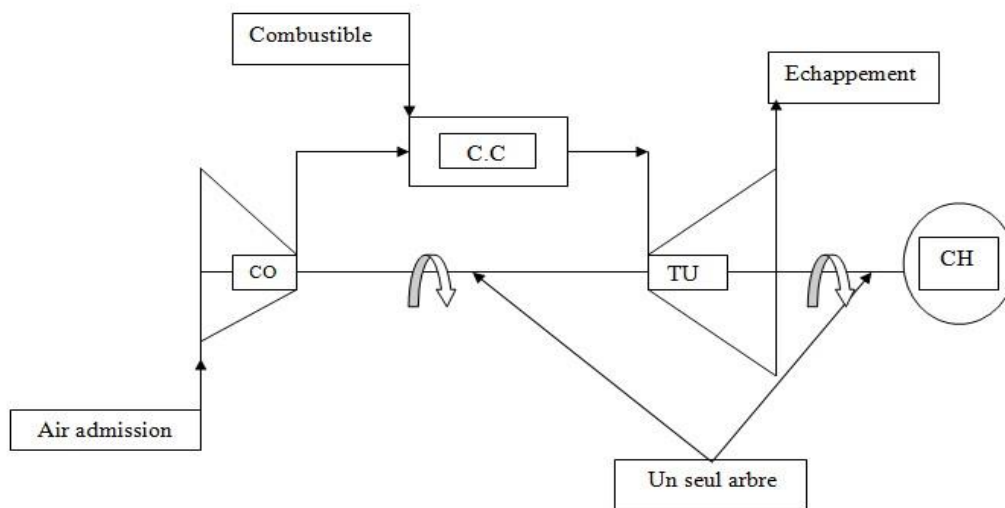


Figure 8: Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre

(CO : Compresseur axial. CC : Chambre de combustion. T : Turbine, CH:Charge)

b. Turbine bi-arbre

La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendantes mécaniquement (figure 9). La roue turbine HP entraîne le rotor du compresseur axial et les accessoires, tandis que la roue BP deuxième étage sert à entraîner l'organe récepteur (ex : les compresseurs). Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de l'organe récepteur.

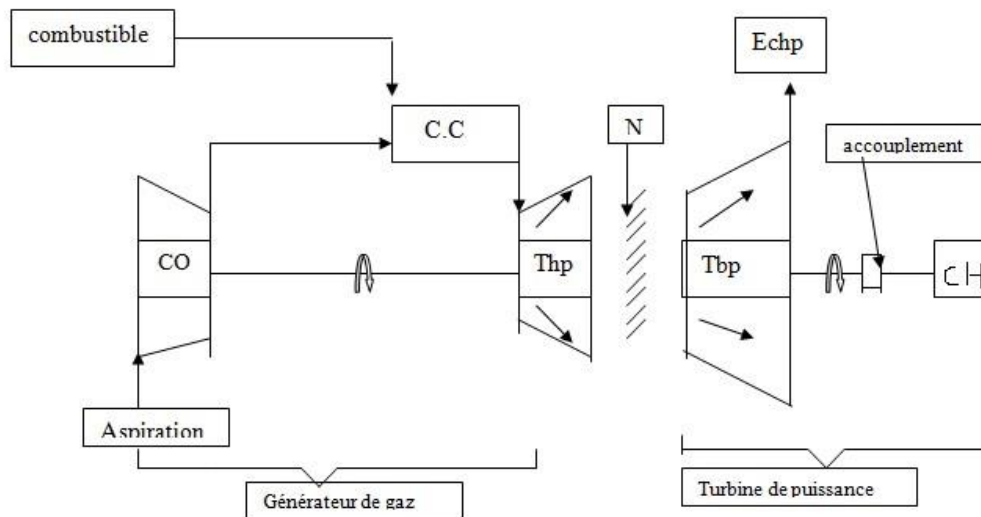


Figure 9: Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.

(CO : Compresseur axial, CC : Chambre de combustion, Thp : Turbine à haute pression, Tbp : Turbin à basse pression, N : Réducteur, CH : Charge)

I.11.2 D'après le mode de travail

a. Turbine à action

Le principe de fonctionnement d'une turbine à action, est que la transformation thermodynamique du fluide se fait uniquement dans la directrice (entre aubages fixes). Les aubes mobiles n'ont qu'un rôle à jouer, c'est de transformer l'énergie cinétique acquise. Par la détente ($P_1 > P_2$) en travail mécanique communiqué au rotor. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique ($P_1 = P_2$).

b. Turbine à réaction

Dans les turbines à réaction, nous savons que la détente se fait aussi bien dans les canaux fixes que dans les canaux mobiles, c-à-d qu'une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique ($P_1 > P_2 > P_3$).

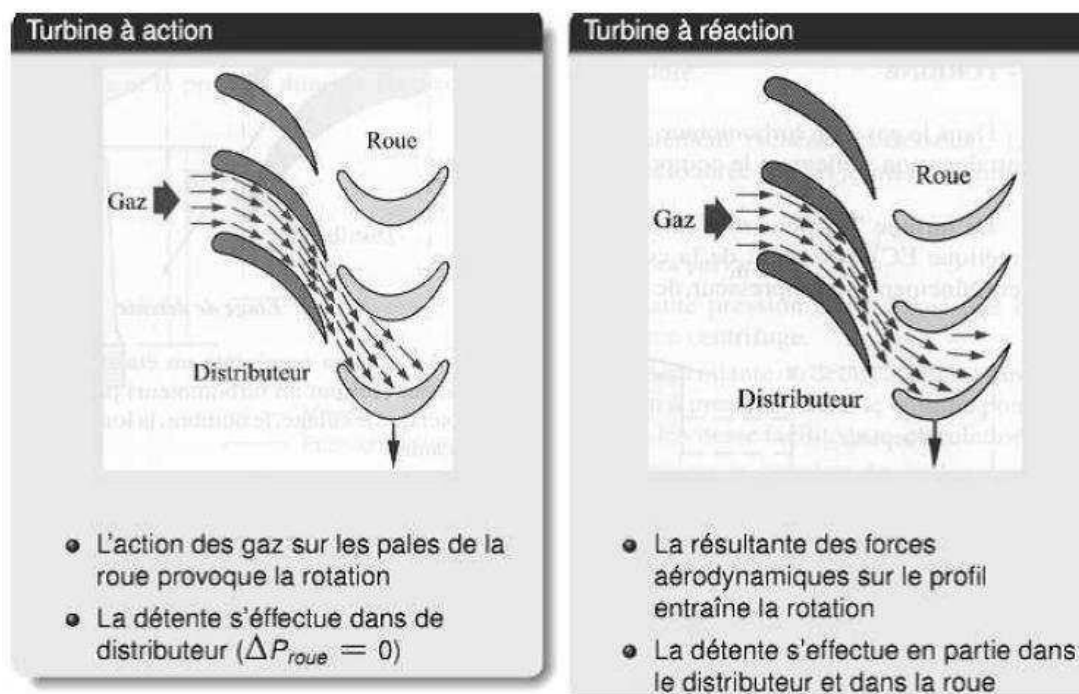


Figure 10: Schéma d'une turbine à action et à réaction

I.11.3 D'après le mode de fonctionnement thermodynamique

La turbine à gaz à cycle ouvert dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbines qui est le plus répandu se divise en deux classes : « Turbine à cycle simple et turbine à cycle avec régénération ou mixte ».

a. Turbine à cycle simple :

C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers la cheminée.

b. Turbine à cycle avec régénération :

Les pertes de chaleur causées par les gaz d'échappement sont les plus importantes dans l'installation de turbine à gaz. Pour cela le rendement des installations de turbine à gaz peut être augmenté, en conduisant les gaz d'échappement dans un échangeur thermique où ils réchauffent l'air sortant du compresseur avant son entrée dans les chambres de combustion. On récupère une partie de chaleur sensible de ces gaz qui se trouvait perdue dans l'atmosphère.

I.12 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- a. Elle extrait de l'air du milieu environnant (aspiration) ;
- b. Elle le comprime à une pression plus élevée par le compresseur (compression) ;
- c. Elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion (gaz chaud) ;
- d. Elle achemine de l'air comprimé et chauffé vers la chambre de combustion ; les **fumées chaudes résultant de la combustion** actionnent ensuite les étages de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre (expansion) ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine et, de l'autre côté à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement comme par exemple un alternateur ou un compresseur centrifuge ;
- e. Elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus (échappement).

I.13 Description et fonctionnement de la Turbine à gaz MS7121E

Le méga-train GL3/Z est équipé de 9 compresseurs qui sont propulsés par des turbines à gaz de différentes Frames (5, 6 et 7). La turbine à gaz GE MS7121E, aussi connue sous le nom de Frame 7EA, est une machine industrielle à combustion interne de classe E, développée par General Electric, capable de produire environ 85 à 91 MW en cycle simple. Elle se compose d'un compresseur axial à 17 étages, d'un système de combustion can-annular à 10 chambres, et d'une turbine à 3 étages dotée d'aubes refroidies de type BLE (Blunt Leading Edge) avec 12 trous de refroidissement pour une meilleure durabilité et performance (figure 11). Fonctionnant au gaz naturel ou aux carburants liquides, elle est utilisée dans la production d'électricité, la cogénération ou comme source d'énergie mécanique pour entraîner des équipements industriels, notamment dans les complexes de liquéfaction de gaz naturel (GNL). Robuste, fiable et adaptable, elle représente une solution éprouvée dans les environnements industriels exigeants.



Figure 11: Turbine à gaz fram7 (MS7121E) du complexe GL3/Z

L'ensemble de la turbine à gaz MS7121E comprend six sections ou groupes principaux :

- L'entrée d'air
- Le compresseur
- Le système de combustion

- La turbine
- Les systems de support (halper).

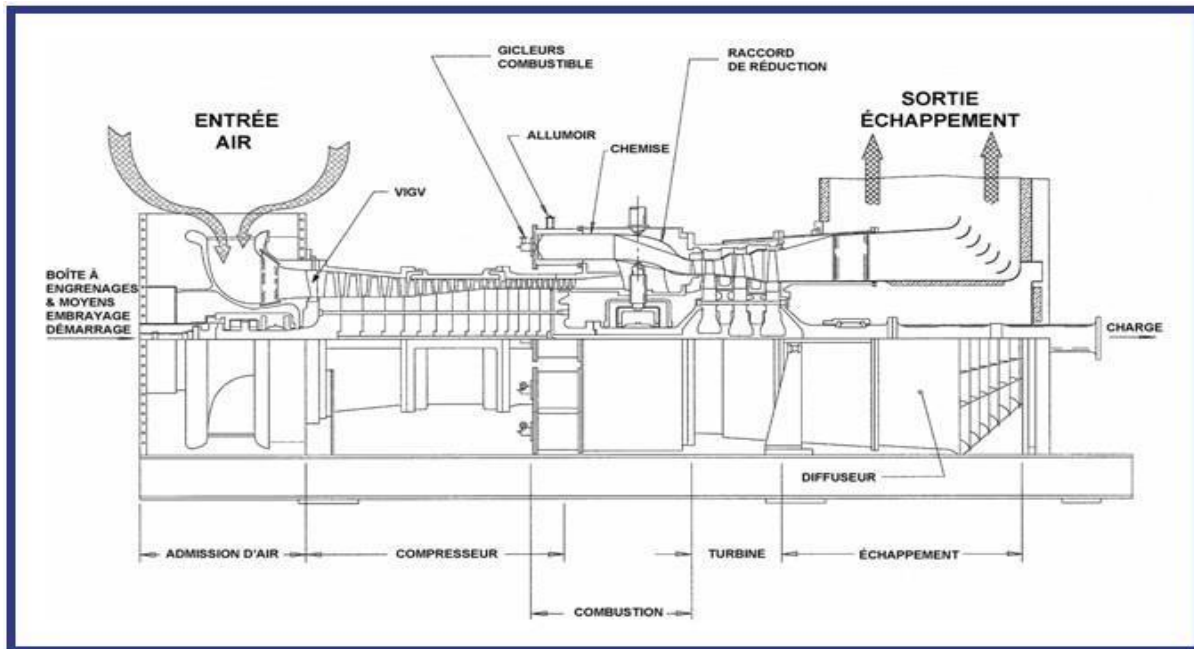


Figure 12: Sections principales de l'ensemble de la Turbine à gaz MS7121E.

I.14 Description du passage du gaz

Le passage du gaz est la voie par laquelle les gaz circulent à travers la turbine à gaz de l'entrée d'air à l'échappement de la turbine en passant par le compresseur, la section de combustion et la turbine, comme indiqué sur le schéma du flux, Figure 13.

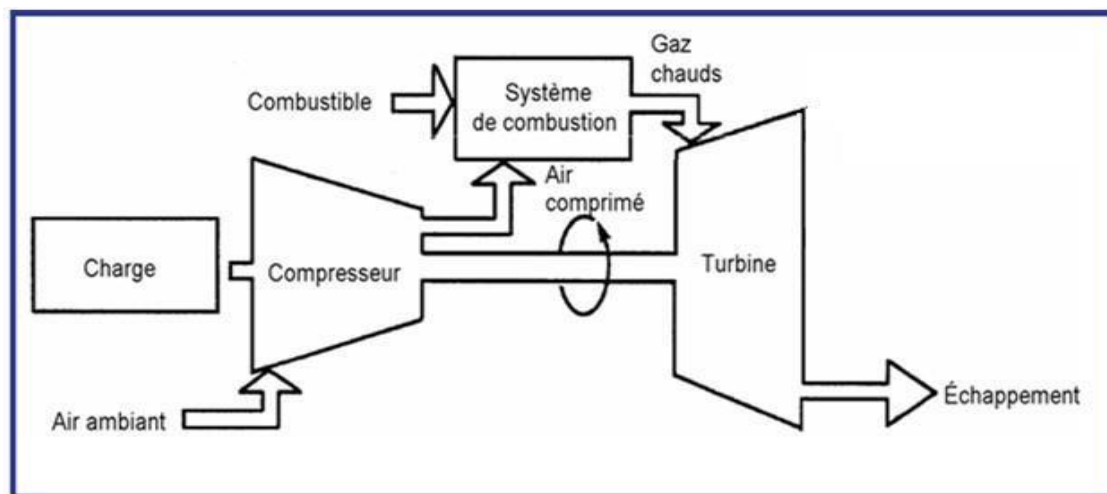


Figure 13 : Description du système du passage de gaz

Sur des unités de turbine à gaz équipées de régénérateur facultatif, le passage du gaz est prévu du compresseur au régénérateur, à travers la tuyauterie externe, pour un réchauffement supplémentaire, puis il retourne vers la chambre de combustion. Les rapports fonctionnels et les positions des sections principales de la turbine à gaz MS7121E sont montrés sur la Figure 13.

Lorsque le système de démarrage de la turbine est actionné et l'embrayage est engagé, l'air ambiant est aspiré à travers l'ensemble du plénum d'admission d'air, filtré et comprimé dans le compresseur à plusieurs étages et à flux axial. Pour la protection contre les pulsations pendant le démarrage, les vannes de décharge du compresseur sont ouvertes et les aubes directrices en position fermée

L'air comprimé provenant du compresseur passe dans l'espace annulaire environnant les chemises de combustion, à partir duquel il passe dans les espaces entre les carters de combustion externes et les chemises de combustion, puis il entre dans la zone de combustion à travers des orifices de mesure dans chacune des chemises de combustion. Lorsque le combustible est enflammé dans une chambre de combustion, la flamme se propage à travers les tubes de raccordement et se dirige vers toutes les autres chambres de combustion. Les gaz chauds des chambres de combustion passent à travers des raccords de réduction séparés, joints à l'extrémité arrière des chemises de la chambre de combustion, puis ils coulent depuis ce point-là jusqu'à la section du troisième étage de la turbine. Après le passage dans les aubes du troisième étage, les gaz sont dirigés vers le diffuseur d'échappement. Les gaz passent ensuite dans le plénum d'échappement et sont envoyés dans l'atmosphère à travers la cheminée d'échappement

Chapitre II

Etude des performances de la turbine à gaz

II.1 Introduction

Les performances d'une turbine à gaz sont fortement influencées par les conditions climatiques, en particulier par la température ambiante. En effet, une élévation ou une baisse de cette température peut modifier significativement le rendement global et la puissance fournie par la machine. Dans ce cadre, la turbine MS-7121E, exploitée par la société pétrolière Sonatrach sur le site d'Arzew pour le processus de réfrigération du propane, a été analysée du point de vue thermodynamique. Cette étude s'appuie sur les données techniques réelles fournies par l'entreprise, décrivant les caractéristiques des principaux composants de la turbine.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence de la température ambiante sur le fonctionnement de la turbine et de déterminer dans quelle mesure cette variation impacte son rendement énergétique, afin de proposer des pistes d'optimisation adaptées aux conditions d'exploitation réelles.

II.2 Etude des cycles thermodynamiques d'une turbine à gaz

Dans le complexe GL3/Z situé à Arzew, la turbine à gaz joue un rôle essentiel dans le fonctionnement global de l'unité, notamment pour la production d'énergie mécanique et parfois pour entraîner les compresseurs de gaz naturel. Cette turbine fonctionne selon le cycle de Brayton (Figure 14), où l'air est d'abord comprimé, puis mélangé au combustible (généralement du gaz naturel) dans la chambre de combustion. La combustion génère des gaz chauds à haute pression qui se détendent dans la turbine, produisant ainsi de l'énergie mécanique. Cette énergie est utilisée soit pour entraîner directement des équipements industriels (comme les compresseurs), soit pour produire de l'électricité. L'efficacité de la turbine à gaz est cruciale pour assurer la continuité du processus de liquéfaction du gaz naturel, qui est le cœur de l'activité du complexe GL3/Z.

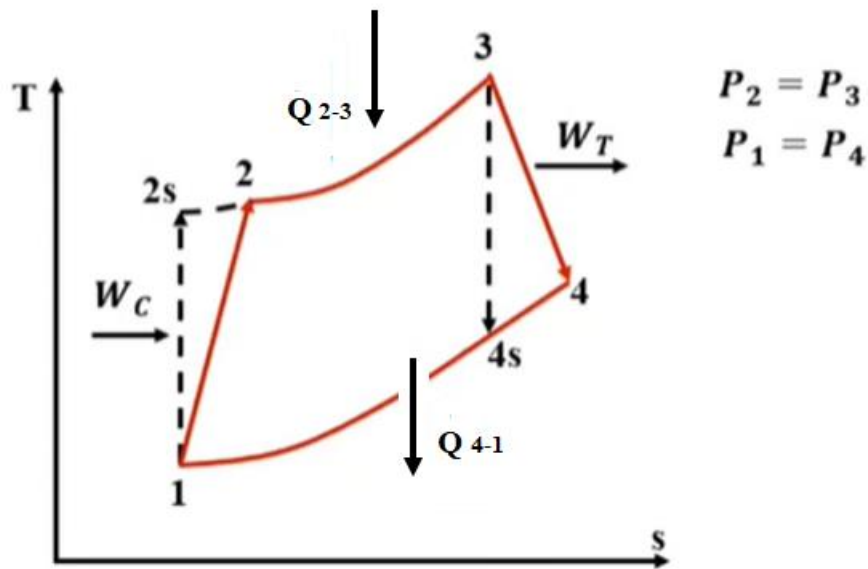


Figure 14: Cycle de Brayton d'une turbine à gaz

II.2.1 Le cycle de Brayton, Cas idéale

Le cycle de Brayton, dans sa version idéale, est composé de deux transformations isobares et de deux transformations isentropiques. Les transformations isobares correspondent à la combustion du carburant ainsi qu'au rejet de chaleur vers l'atmosphère. Quant aux transformations isentropiques, elles représentent les phases de compression de l'air et d'expansion dans la turbine. La figure 14 présente une illustration du cycle de Brayton idéal .

- 1 à 2 : compression isentropique de l'air (compresseur).
- 2 à 3 : combustion isobare (échangeur de chaleur).
- 3 à 4 : détente isentropique (turbine).
- 4 à 1 : refroidissement isobarique (échangeur de chaleur).

- **Hypothèses:**

- Le fluide de travail est un gaz parfait (air).
- Les transformations sont idéales :

- Adiabatiques et isentropiques (réversibles) pour la compression et la détente.
- Isobares pour l'ajout et le rejet de chaleur.
- Les capacités calorifiques C_p et $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ sont constantes.
- Le travail mécanique net est la différence entre travail de détente et travail de compression.
- **Performances du cycle idéal**

L'application de la première loi de la thermodynamique au cycle de Baryton de la figure 14 donne les relations suivantes :

❖ Travail du compresseur

Le travail du compresseur W_c par kg de fluide est donné par l'expression suivante :

$$W_c \left(\frac{KJ}{Kg} \right) = h_{2s} - h_1 = C_{p(1-2s)} (T_{2s} - T_1) \quad (1)$$

la température T_{2s} Pour une évolution isentropique ($1 \rightarrow 2s$) s'écrit :

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_C-1}{\gamma_C}} \quad \rightarrow \quad T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

Avec :

- T_1 : température d'entrée au compresseur.
- P_2 / P_1 : rapport de compression.
- γ : rapport des capacités calorifiques.

Le rendement isentropique du compresseur s'écrit :

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

Finalement le travail sera exprimé par:

$$W_c = C_{p_c} \times T_1 \times \left(\eta_c^{\frac{\gamma_C-1}{\gamma_C}} - 1 \right) \quad (4)$$

❖ Chaleur par combustion Q_{CC} fourni au fluide moteur

La quantité de la chaleur par combustion par kg de mélange est donné par l'équation suivante:

$$Q_{CC} [Kj/Kg] = h_3 - h_{2s} = Cp_{cc}(T_3 - T_{2s}) \quad (5)$$

Avec T_3 la température de fin de combustion.

❖ Travail de la turbine

Le travail de la turbine W_T par kg de fluide est donné par l'équation suivante

$$W_T \left(\frac{Kg}{KJ} \right) = (h_3 - h_{4s}) = Cp_T(T_3 - T_{4s}) \quad (6)$$

la température T_{4s} Pour une évolution isentropique est exprimé selon l'équation:

$$T_{4s} = T_3 \times \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma_T}{\gamma_T}} \quad (7)$$

Le travail de la turbine sera donc exprimé pour un cycle idéal par l'équation:

$$W_T = Cp_T \times T_3 \left(1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma_T}{\gamma_T}} \right) \quad (8)$$

❖ Travail utile à la sortie

Le travail utile W_u de la turbine à gaz par kg de fluide pour un cycle idéal est exprimé par l'équation:

$$W_u = W_T - W_C \quad (9)$$

Avec:

W_T : Travail de la détente

W_C : Travail du compresseur

❖ Rendement thermique du cycle

Le rendement thermique du cycle est défini comme étant le rapport entre le travail utile W_U de la machine et la quantité de chaleur fournie par la combustion (Q_{CC}) exprimé par l'équation suivante:

$$\eta_{th} = \frac{W_U}{Q_{CC}} \quad (10)$$

II.2.2 Cycle réel de Brayton

Le cycle réel de Brayton est une version pratique du cycle idéal, prenant en compte les pertes et les irréversibilités qui surviennent dans les machines thermiques réelles. Contrairement au cycle idéal qui suppose des transformations isentropiques et sans pertes, le cycle réel intègre les rendements non parfaits du compresseur et de la turbine, les pertes de charge dans les conduits, ainsi que la combustion imparfaite. Ces facteurs réduisent le rendement global du cycle. De plus, dans la pratique, les températures et pressions atteintes sont limitées par les contraintes matérielles et de sécurité. Ainsi, le cycle réel de Brayton reflète de manière plus fidèle le fonctionnement des turbines à gaz industrielles, permettant une évaluation plus précise des performances et de la consommation de carburant dans des conditions opérationnelles réelles.

- **Performance du cycle réel**

- ❖ **Travail du compresseur**

Le travail du compresseur par Kg est exprimé selon l'équation suivante:

$$Wc = (h_2 - h_1) = Cp_{1-2} \times (T_2 - T_1) \quad (11)$$

En tenant compte des équations (11) le travail peut s'écrire :

$$Wc = Cp_{1-2} \times T_1 \left(\frac{(\eta_c)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}}}{\gamma_c} \right) \quad (12)$$

- ❖ **Quantité de chaleur Q_{CC}**

La quantité de chaleur fournie par combustion Q_{CC} par kg de mélange s'écrit :

$$Q_{CC} = (h_3 - h_2) = Cp_{CC} \times (T_3 - T_2) \quad (13)$$

En combinant les équations (3), la température réelle T_2 à la sortie du compresseur peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$T_2 = \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_c} + T_1 \quad (14)$$

Et en remplaçant la formule de T_2 dans l'équation (14), la quantité de chaleur sera calculée par :

$$Q_{CC} = Cp_{CC} \times (T_3 - \left(\frac{T_{2s}-T_1}{\eta_c}\right) + T_1) \quad (15)$$

Et finalement on aura l'équation finale en remplaçant T_{2s} par son expression.

$$Q_{CC} = Cp_{CC} \times \left(T_3 - \left(\frac{T_1 \times (\eta_c)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} - T_1}{\eta_c} \right) + T_1 \right) \quad (16)$$

❖ Travail de la turbine

Le travail de la turbine par Kg de fluide est:

$$W_T = (h_3 - h_4) = CP_T(T_3 - T_4) \quad (17)$$

La température T_4 peut être calculer en utilisant l'équation () et l'équation ():

$$T_4 = \eta_T \times (T_{4s} - T_3) + T_3 \quad (18)$$

Et finalement le travail sera exprimer selon l'équation suivante:

$$W_T = CP_T \times T_3 \times \eta_T \left(1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma_T}{\gamma_T}} \right) \quad (19)$$

❖ Travail utile à la sortie

Le travail utile généré par la turbine à gaz par kg de fluide pour un cycle réel est exprimé par l'équation:

$$W_u = W_T - W_C \quad (20)$$

Avec:

W_T : Travail de la détente

W_C : Travail du compresseur

❖ Rendement thermique du cycle

Le rendement thermique du cycle est défini par l'équation suivante:

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q_{CC}} \quad (21)$$

II.3 Paramètres opératoires de la turbine

Le tableau 2 nous montre les données relatives aux différents organes de la turbine à gaz MS-7121E:

Tableau 1: Paramètres opératoires de la turbine

Puissance fournie (kW)	82900
Rendement mécanique (%)	98
Débit volumique de l'air (m^3/s)	233.569
Perte de pression dans le système d'admission d'air (%)	1%
Taux de compression du compresseur π_c	12,2
Pression d'admission avant le filtre (bar)	1,013
Rendement isentropique du compresseur (%)	87
Rendement isentropique de la turbine (%)	87
Pression d'échappement (sortie turbine) (bar)	1,1617
Nombre de tubes pour la CC	10
Pouvoir calorifique inférieur du combustible (kJ/kg)	25796,77
Rapport débit massique du combustible par débit massique d'air f	0,034
Rendement de combustion (%)	98
Perte de pression dans la chambre de combustion (%)	2
C_{pc} (J/kg. K)	1005,8
γ_c	1,4
γ_t	1,33
C_{pcc} (J/kg. K)	1149,2
C_{pt} (J/kg. K)	1,2226

II.4 Calcul des paramètres thermodynamiques de la turbine à gaz MS-7121E

II.4.1 Entrée d'air

➤ La masse volumique

Comme l'air est un gaz parfait, on applique l'équation des gaz parfaits pour le calcul de la masse volumique de l'air d'admission :

$$\rho_a = \frac{P_a}{r.T_a} \quad (22)$$

$$\rho_a = \frac{101,3}{287 \times 298,68}$$

Avec la constante des gaz parfaits pour l'air $r=287$ J/kg.K.

$$T_a = T_{amb} = 298,68K \quad \text{et} \quad P_a = P_{atm} = 1,013 \text{ bar} = 101,3 \text{ KPa}$$

$$\rho_a = 1,18173 \text{ kg /m}^3$$

II.4.2 Entrée du compresseur

➤ La température

$$T_1 = T_a = 298,68K$$

➤ La pression

A cause des pertes de pression dues à la filtration d'air, la pression à l'entrée du compresseur devient :

$$P_1 = 0,99 . P_a$$

$$P_1 = 0,99 \times 101,3$$

$$P_1 = 100,287 \text{ KPa}$$

➤ La masse volumique

On applique l'équation (22) pour trouver la masse volumique de l'air d'admission et donc :

$$\rho_1 = \frac{P_1}{r.T_1} \quad (23)$$

$$\rho_1 = \frac{100,287}{287 \times 298,68}$$

$$\rho_1 = 1,1699 \text{ kg /m}^3$$

➤ **Le débit massique de l'air à l'entrée du compresseur**

Pour fournir la quantité nécessaire de l'air entrant dans le compresseur, Sonatrach fonctionne la turbine MS-7121E avec un débit volumique Q_v constant, et donc le débit massique de l'air est :

$$\dot{m}_a = \rho_1 \cdot Q_v \quad (24)$$

$$\dot{m}_a = 1,1699 \times 233.569$$

$$\dot{m}_a = 273,252 \text{ kg/s}$$

II.4.3 Entrée de la chambre de combustion

➤ **La pression**

Le taux de compression est donné par :

$$\pi_c = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow P_2 = \pi_c \cdot P_1 \quad (25)$$

$$P_2 = 12,2 \times 100,287$$

$$P_2 = 1223,501 \text{ KPa}$$

➤ **La température**

D'après l'équation (2) on trouve :

$$T_{2is} = 610,372 \text{ K}$$

L'équation (14) donne la température à l'entrée de la chambre de combustion T_2 :

$$T_2 = 656,946 \text{ K}$$

➤ **Le débit massique du combustible**

On sait que rapport entre le débit du combustible et le débit d'air est caractérisé par la constante f et donc :

$$\dot{m}_f = f \times \dot{m}_a \quad (26)$$

$$\dot{m}_f = 9,2905 \text{ Kg / S}$$

II.4.4 Entrée de la turbine

➤ La pression

La pression d'entrée de la turbine en tenant compte des pertes de pression dans la chambre combustion devient :

$$P_3 = \pi_{cc} \cdot p_2 \quad (27)$$

$$P_3 = 0,98 \times 1223,501$$

$$P_3 = 1199,03 \text{ KPa}$$

➤ La température

Pour une évolution isentropique, la température de sortie de la turbine est :

$$T_{4is} = 694,478 \text{ K}$$

Et la température réelle de sortie de la turbine devient :

$$T_4 = 780,085 \text{ K}$$

II.5 Paramètres de performances de la turbine à gaz MS-7121E

➤ Travail du compresseur

D'après l'équation (4) on trouve le travail spécifique réel du compresseur :

$$W_C = 411,72 \text{ kJ/kg}$$

➤ Puissance du compresseur :

$$\dot{W}_C = \dot{m}_a \times \frac{W_C}{\eta_m} \quad (28)$$

$$\dot{W}_C = 114,799 \text{ MW}$$

➤ Quantité de chaleur dégagée par combustion :

La quantité de chaleur fournie par la combustion Q_{cc} par kg de mélange :

$$Q_{cc} = 799,904 \text{ kJ/kg}$$

➤ Le travail de la turbine

Le travail spécifique réel de la turbine est :

$$w_T = 632,693 \text{ kJ/kg}$$

➤ **La puissance de la turbine :**

$$\dot{W}_T = (1 + f) \cdot \dot{m}_A \times \eta_m \cdot W_T \quad (29)$$

$$\dot{W}_T = 175,187 \text{ MW}$$

➤ **Le travail net du cycle :**

Le travail utile fourni par la turbine à gaz :

$$W_U = 220,973 \text{ kj/kg}$$

➤ **Puissance nette du cycle**

$$W_{nette} = P_T - P_C \quad (30)$$

$$W_{nette} = 60,388 \text{ MW}$$

➤ **Rendement thermique du cycle**

Le rendement thermique du cycle est :

$$\eta_{th} = 27,62\%$$

Le calcul précédent nous a permis de tracer les différentes courbes de performances pour une plage de température ambiante entre 15 °C et 28 °C :

Tableau 2: Paramètres de fonctionnement de la turbine à différentes températures

Paramètres	Température					
	288,15K	293,15K	297K	298,68K	300K	301,15K
\dot{m}_a (kg/s)	283,225	278,393	274,793	273,252	272,037	271,0147
ρ_1 (kg /m ³)	1,2126	1,19191	1,1765	1,1699	1,1647	1,16032
W_C (kj /kg)	397,204	404,097	409,404	411,72	413,539	415,125
Q_{cc} (kj/kg)	869,041	834,567	820,239	799,904	775,882	738,499
w_T (kj/kg)	649,995	641,110	639,239	632,693	624,275	610,247
W_U (kj/kg)	252,791	237,013	229,835	220,973	210,736	195,122
W_{nette} (MW)	71,753	66,103	63,201	60,388	57,294	52,787
η_{th}	29,08%	28,39%	28,02%	27,62%	27,16%	26,42%

II.6 Interprétation des résultats

Les performances de la turbine à gaz sont directement influencées par les conditions climatiques, notamment par la température ambiante. La figure 15 montre que lorsque la température ambiante augmente, le débit massique d'air à l'entrée du compresseur diminue de manière significative. Cette baisse est principalement due à la diminution de la densité de l'air, comme le confirme le figure 16, qui illustre la réduction progressive de la masse volumique de l'air en fonction de la température. En effet, un air plus chaud est moins dense, ce qui entraîne une diminution de la masse d'air aspirée pour un même volume.

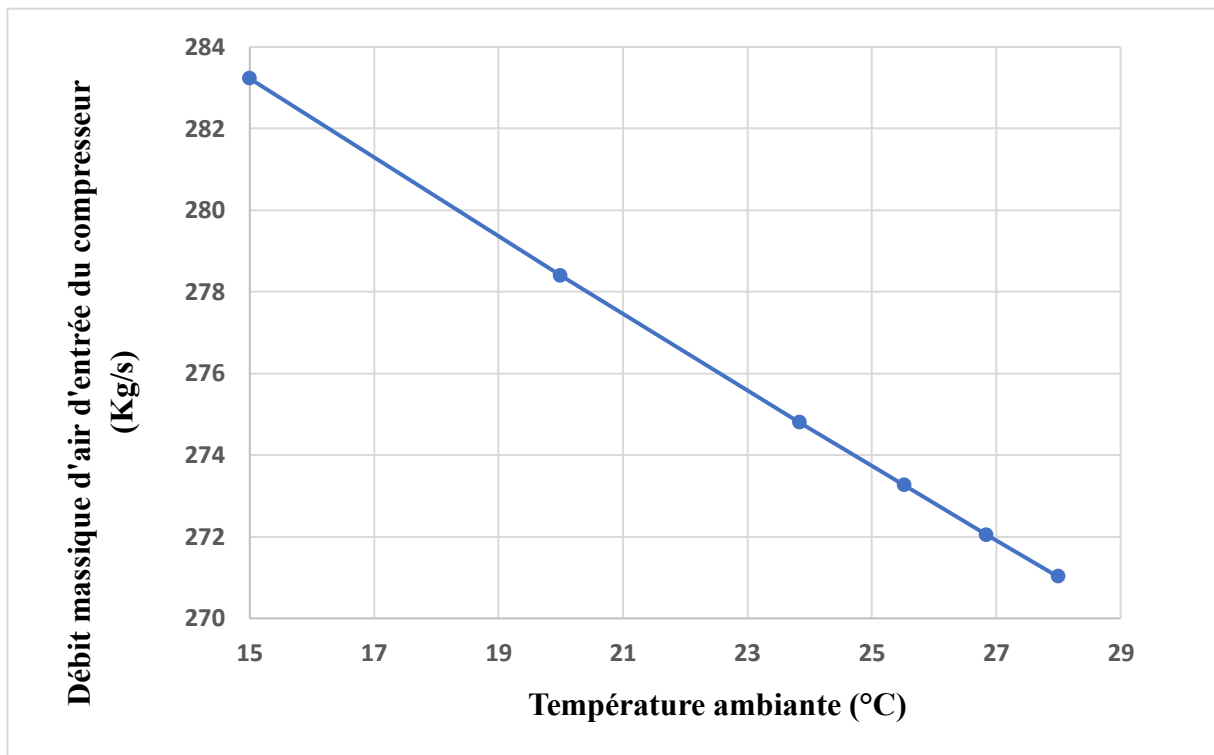


Figure 15: Débit massique d'air d'entrée du compresseur (Kg/s)

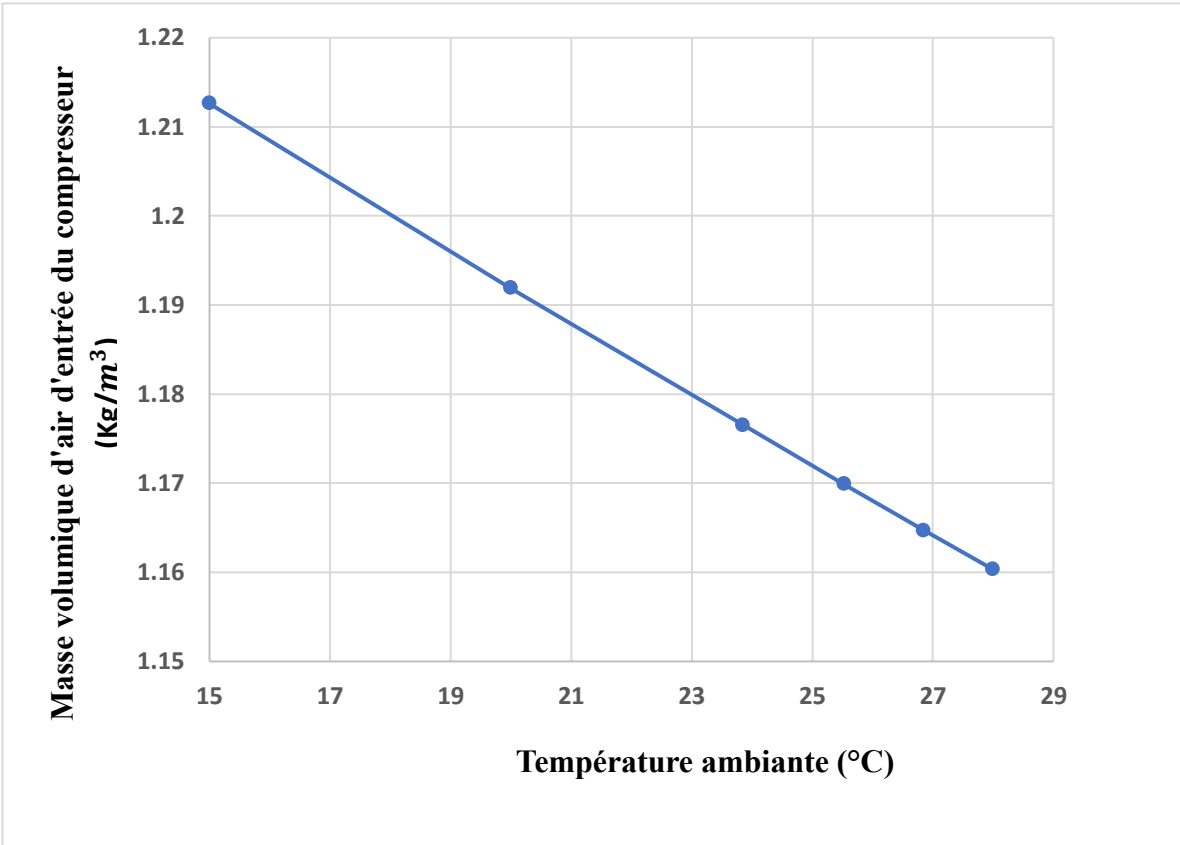


Figure 16: Masse volumique d'air d'entrée du compresseur (Kg/m^3)

La figure 17 représente l'évolution du travail spécifique du compresseur (exprimé en kJ/kg) en fonction de la température ambiante (en $^{\circ}\text{C}$). On observe que le travail spécifique du compresseur augmente de manière quasi linéaire avec la température ambiante. À basse température (15°C), le travail spécifique est d'environ 398 kJ/kg , alors qu'il atteint 416 kJ/kg à 28°C . Cette tendance s'explique par le fait qu'à température ambiante plus élevée, l'air entrant est moins dense, ce qui nécessite plus d'énergie pour être comprimé à une même pression de sortie. En d'autres termes, le compresseur doit fournir davantage d'effort pour comprimer un air plus chaud, ce qui se traduit par une hausse de la consommation d'énergie spécifique.

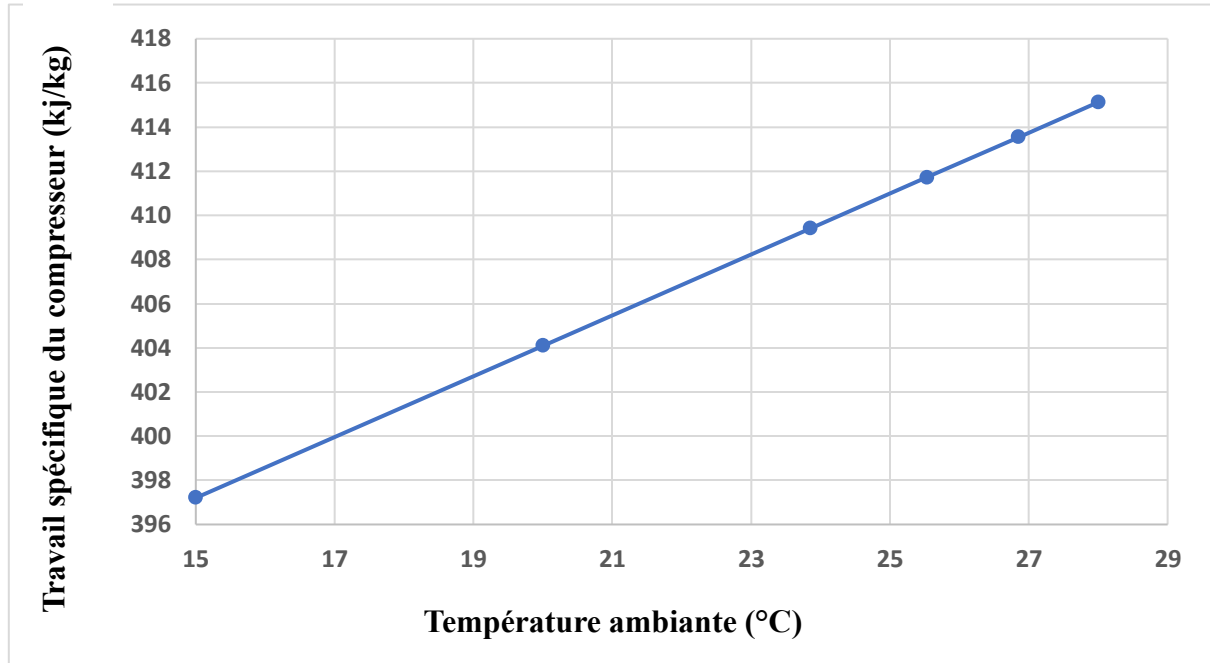


Figure 17: Travail spécifique du compresseur (kJ/kg)

La figure 18 montre une diminution progressive de la puissance nette de la turbine lorsque la température ambiante augmente, notamment entre 15 °C et 28 °C. Cette baisse s'explique principalement par la diminution de la densité de l'air à des températures plus élevées. En effet, l'air chaud étant moins dense que l'air froid, la masse d'air aspirée par le compresseur diminue à mesure que la température augmente. Or, dans une turbine à gaz, la puissance produite est directement liée à la quantité de masse d'air (et donc d'oxygène) disponible pour la combustion. Une masse d'air réduite limite la quantité de carburant pouvant être brûlée efficacement, ce qui entraîne une baisse de l'énergie produite et, par conséquent, une diminution de la puissance nette délivrée par la turbine.

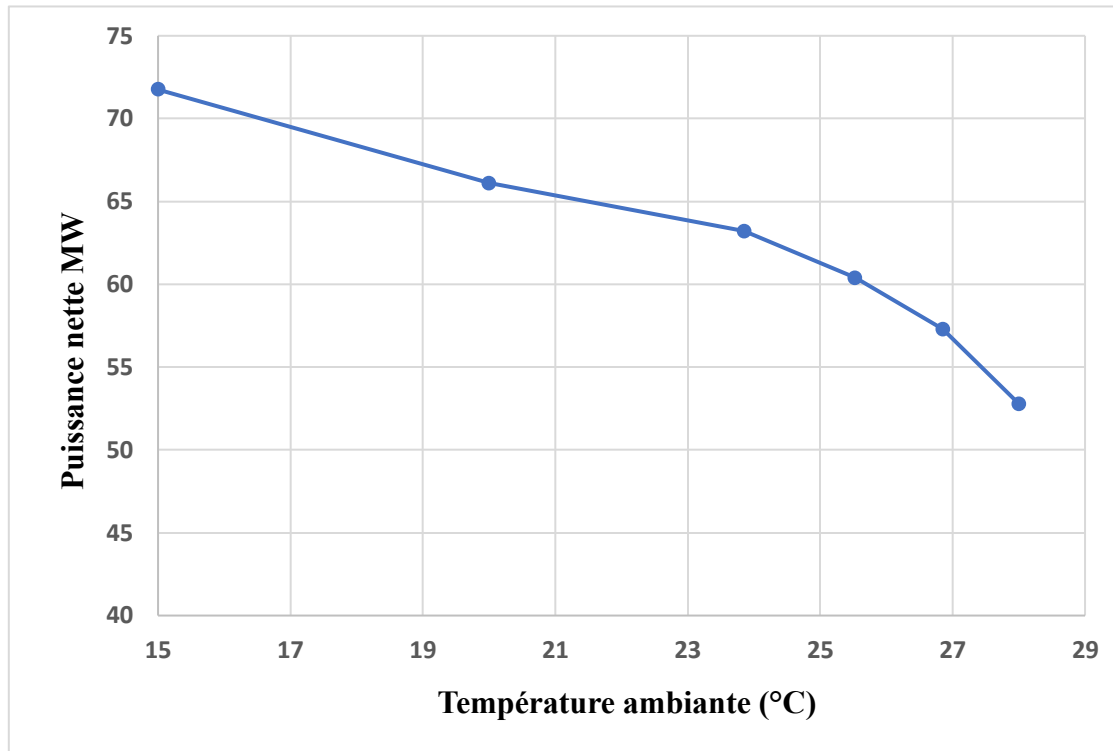


Figure 18: Puissance nette MW

La figure 19 met en évidence la diminution du rendement de la turbine à gaz lorsque la température ambiante augmente de 15 °C à 28 °C. Cette baisse de rendement est essentiellement due à la réduction de la densité de l'air à haute température, ce qui entraîne une diminution de la masse d'air entrant dans le compresseur. Par conséquent, la quantité de carburant pouvant être brûlée efficacement est réduite, limitant ainsi la puissance produite. Par ailleurs, la consommation d'énergie par le compresseur reste relativement élevée, voire légèrement accrue, ce qui aggrave la baisse du rendement global. Ainsi, une plus grande part de l'énergie générée est consommée en interne par la machine, et une plus faible proportion est transformée en énergie utile, ce qui se traduit par une chute du rendement énergétique de la turbine.

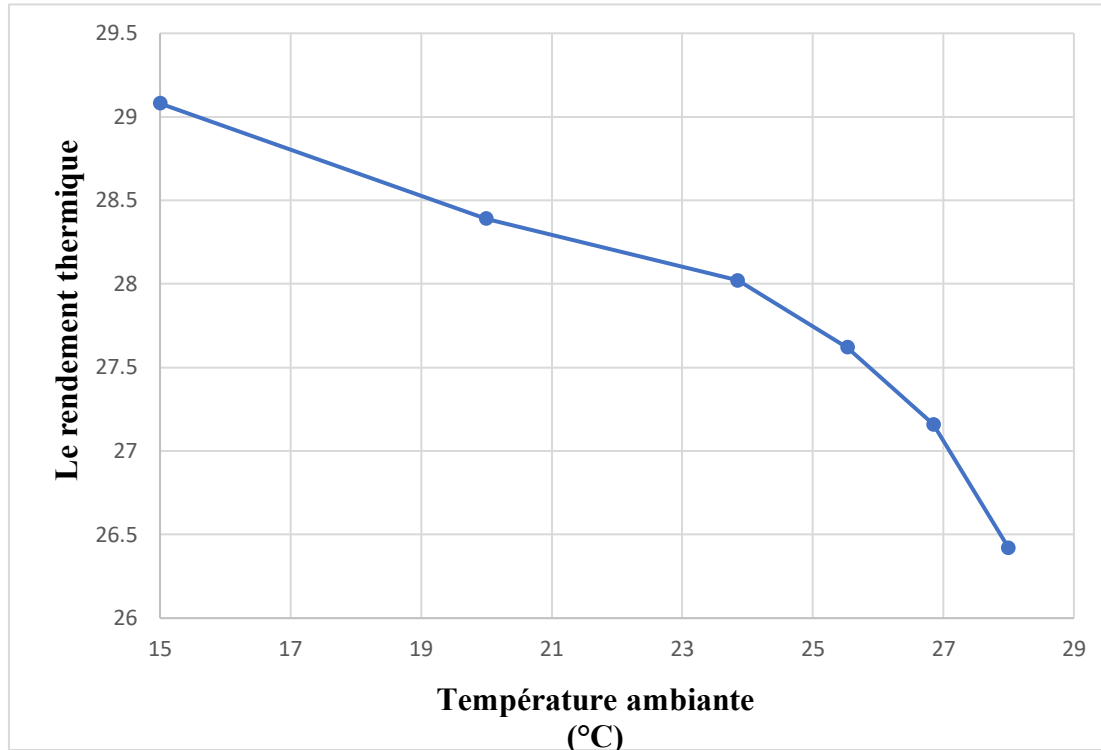


Figure 19: Le rendement thermique

II.7 Recommandations

La turbine à gaz MS7121E, exploitée dans le complexe GL3/Z d'Arzew, fonctionne dans un environnement climatique chaud, particulièrement en été où les températures ambiantes peuvent dépasser les 40 °C. Or, les performances des turbines à gaz sont fortement sensibles à la température de l'air à l'admission : une température élevée entraîne une baisse de la densité de l'air, ce qui réduit la masse d'air disponible pour la combustion, et donc la puissance nette et le rendement global de la machine. Il est donc essentiel de mettre en œuvre des solutions techniques adaptées pour compenser ces effets thermiques défavorables.

- ❖ **Propositions pour améliorer les performances face à l'augmentation de la température**

1. Refroidissement de l'air d'admission

Afin d'augmenter la densité de l'air; ce qui permettrait de générer plus de puissance et d'améliorer le rendement, notamment en été. Il est recommandé de mettre en place un système de refroidissement de l'air entrant dans le compresseur, tel que :

- Refroidissement par évaporation (fogging ou média humide)
- Refroidissement mécanique (chillers à eau ou absorption)

2. Nettoyage régulier du compresseur

Il est recommandé d'effectuer des lavages en ligne (online washing) pendant le fonctionnement, ainsi que des lavages hors ligne (offline) lors des arrêts programmés, afin de prévenir l'encrassement accru du compresseur en période chaude et sableuse. Ce nettoyage permet de maintenir un débit d'air optimal et, par conséquent, de préserver les performances de la turbine.

3. Choix judicieux du carburant

Il est conseillé, lorsque cela est possible, d'utiliser un carburant à plus haut pouvoir calorifique durant les périodes de forte chaleur, afin de compenser la réduction de la masse d'air disponible et ainsi maintenir un rendement thermique élevé.

4. Isolation thermique des composants sensibles

Améliorer l'isolation des conduites d'air et des zones chaudes pour éviter les pertes inutiles dues aux températures extérieures.

II.8 Conclusion

Les performances d'une turbine à gaz sont fortement influencées par les conditions climatiques, en particulier par la température ambiante. Lorsque cette température augmente, la densité de l'air diminue, ce qui réduit la masse d'air aspirée par le compresseur. Cette baisse de la masse d'air disponible entraîne une diminution de l'oxygène nécessaire à la combustion, limitant ainsi la

quantité de carburant pouvant être brûlée efficacement. En conséquence, la puissance produite par la turbine diminue.

Par ailleurs, l'air chaud étant moins dense, le compresseur doit fournir davantage d'énergie pour le comprimer à une pression donnée, ce qui se traduit par une hausse du travail spécifique et une augmentation de la consommation interne d'énergie. Ainsi, une part plus importante de l'énergie générée est consommée par le compresseur lui-même, au détriment de l'énergie utile délivrée par la turbine.

Ces deux phénomènes ; la baisse de la puissance produite et l'augmentation de la consommation énergétique interne contribuent à une diminution notable du rendement global de la turbine. Dans des environnements chauds, comme ceux que l'on rencontre en zone côtière ou désertique, ces effets cumulés deviennent particulièrement critiques et doivent être pris en compte dans l'exploitation et la gestion des unités de production à turbine à gaz.

Conclusion Générale

L'Algérie, en tant que pays riche en ressources énergétiques, s'est dotée d'infrastructures majeures telles que le complexe GL3/Z à Arzew, afin de valoriser et d'exporter son gaz naturel. Ce complexe occupe une position stratégique dans l'économie nationale et contribue de manière significative à l'approvisionnement énergétique mondial. Au cœur de ce dispositif, la turbine à gaz General Electric MS7121E assure l'entraînement des compresseurs nécessaires au processus de liquéfaction du gaz. Son bon fonctionnement est donc un élément clé de la performance globale du complexe.

Dans ce contexte, l'étude menée vise à évaluer les performances de cette turbine, en mettant l'accent sur son rendement et les facteurs qui peuvent l'influencer. Parmi ces facteurs, la température ambiante se révèle particulièrement déterminante. Une hausse de cette température entraîne une diminution de la densité de l'air, ce qui réduit la masse d'air aspirée par le compresseur. Cette baisse limite la quantité d'oxygène disponible pour la combustion, ce qui affecte directement la puissance produite par la turbine.

De plus, un air plus chaud nécessite un effort accru de compression, ce qui augmente le travail interne du compresseur et, par conséquent, la consommation énergétique globale de la machine. Ainsi, une part significative de l'énergie générée est réutilisée en interne, réduisant l'énergie utile effectivement disponible. Ces effets, qui s'additionnent, contribuent à une baisse sensible du rendement de la turbine, phénomène d'autant plus critique dans des environnements chauds comme ceux de la zone industrielle d'Arzew.

Face à ces constats, il apparaît essentiel de tenir compte de ces contraintes thermiques lors de l'exploitation et de la maintenance des turbines à gaz. L'optimisation de leur fonctionnement dans des conditions climatiques défavorables représente un enjeu technique et économique majeur, tant pour améliorer la rentabilité des installations que pour garantir leur durabilité et leur performance énergétique à long terme. Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche, en apportant une analyse ciblée sur le comportement thermique de la turbine MS7121E et en ouvrant des perspectives d'amélioration concrètes pour le complexe GL3/Z

Références

[1] Ministère de l'Énergie et des Mines (Algérie), "Industrie gazière : infrastructures de liquéfaction – Complexe GL3/Z," *mem.gov.dz*, consulté en juin 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.mem.gov.dz>

[2] M. Ibrahim and M. Rahman, "Modeling and performance analysis of a gas turbine for a combined cycle power plant," *Procedia Engineering*, vol. 56, pp. 320–326, 2013.

[3] A. Hosseini, S. M. Moghaddam, and F. Khoshbakhti Saray, "Thermoeconomic analysis and optimization of a gas turbine cycle with regenerative heat exchanger and absorption refrigeration," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 685–698, 2013.

[4] S. C. Kaushika, V. S. Reddya and S. K. Tyagi, Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 15, pp. 1857–1872, 2011.

[5] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed., New York: McGraw-Hill Education, 2015.

[6] A. Khoshgoftar Manesh, F. Khoshbakhti Saray, and M. H. Ahmadi, "Multi-objective optimization of a combined cycle power plant using evolutionary algorithms," *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 23–34, 2013.

[7] A. Tewari and S. C. Kaushik, "Exergoeconomic analysis and optimization of a gas/steam combined cycle power plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 7, pp. 1840–1848, 2009.

[8] Ibrahim, T. K., & Rahman, M. (2012). Thermal Impact of Operating Conditions on the Performance of a Combined Cycle Gas Turbine. *Journal of Applied Research and Technology*, 10(4).

[9] T. K. Ibrahim, M. M. Rahman and A. N. Alla, Improvement of gas turbine performance based on inlet air cooling systems: A technical review. *Int. J. Phy. Sci.*, Vol. 6, No.4, pp. 620–627, 2011.

[10] Sonatrach, "Liquéfaction de gaz naturel – Complexe GL3/Z (Arzew)," *Sonatrach.com*, consulté en avril 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.sonatrach.com>

[11] Arzew GNL 3Z LNG Plant Algeria, Global Energy Observatory, accessed June 2017.

[12] U.S. Energy Information Administration (EIA), "Algeria – International Energy Data and Analysis," *eia.gov*, accessed June 2024. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/international/analysis/country/DZA>