

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme
De master en Génie Mécanique

Option : **énergétique**

Thème

**ETUDE DES PERFORMANCES D'UNE CENTRALE
THERMIQUE à CYCLE COMBINÉ DE CAP-DJINET**

Proposé et dirigé par :

Dr. Mouhammed ROUDANE

Co promoteur :

Mr. ABD REZZAK MEBAREKI

Réalisé par :

**ASSAL DOUNIA
RACHEDI HANANE
BOUCHELAGHEM SARA**

ANNEE UNIVERSITAIRE 2020/2021



Dédicace

*À la femme qui a consacré sa vie pour que la mienne soit meilleure, à travers
l'aide et le soutien qu'elle m'a réservé pour que je puisse continuer mes études...*

Ma très chère Mère.

À mon Père qui m'a apporté ce dont j'avais besoin.

*À mon mari qui m'a encouragé jusqu'à la fin de mes études, à ma belle-mère,
mon beau-père.*

À mes sœurs et mes frères Amine et Farid.

*À toutes les personnes qui m'ont entouré, encouragé et aidé et surtout mon
binôme HANANE et DONIA et tous les gens qui m'aiment.*

SARA

Dédicace

*Du fond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chères,
A mon très cher père, A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, pour ses
encouragement son soutien, surtout pour son amour et ses sacrifices.*

*A ma chère mère, a la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la
flamme de mon cœur. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que
vous me porter depuis mon enfance et qu'elle m'a toujours accordé
témoignage de ma reconnaissance envers sa confiance ses sacrifice et sa
tendresse*

A mon frère parfait (Chérif)

A mon fils, la douceur de mon cœur (Noureddine)

A mon mari qui m'a encouragée jusqu'à la fin de mes études

A ma belle -mère

A toute ma famille

A tous mes autres ami(e)s

*A mes chers collègues (Hanane) et (Sara) et a toute mes amies, pour son
soutien moral, sa patience et compréhension tout au long de ce mémoire*

Dounia

Dédicace

Du fond de mon cœur je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

« A l'homme de ma vie, l'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, mon exemple éternel, mon cher Père MOUSSA, celui qui s'est toujours sacrifié pour me réussir

, Aucun dédicace ne serait exprimer mes sentiments, que dieu te préserve et te procure santé et longue vie ». A ma mère

« Tu m'a donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir tous ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte.

En témoignage je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée que dieu te préserve et te procure santé et longue vie. » A mon frère et mes sœurs

« Mohamed, Assia, Chahrazed, Asmaa, Sarah et ma petite sœur Amira et toutes mes nièces, surtout Ikram Batoul Soundous et Meriem.

En leur souhaitant la réussite et le bonheur. A notre encadreur pour ça patience

Une pensée très spéciale envers nos collègues Sarah, Ibrahim, Houssam,

El bahi et tous nos amis pour leur soutien moral et leur esprit de groupe ».

Ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet

Hanane.

REMERCIEMENT

Nous rendons grâce au bon Dieu qui nous a donné la force, la volonté, le courage et la patience qui nous ont permis de mener à terme ce modeste travail.

Au terme de ce travail, nous tenons, tout d'abord, à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons ensuite à exprimer nos plus vifs remerciements à notre promoteur Dr. MOUHAMMEDE ROUDANE et notre encadrant Mr.MEBARKI ABDERREZAK (Ingénieur superviseur maintenance turbine sur l'école technique SONELGAZ), pour la qualité de leur suivi ; pour leur précieuses orientations, méthodologiques notamment, et aussi pour leur disponibilité jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à Mr. MOUHAMME GUERGADJ et Mr. SAAID et Mr.Ketfi Omar et notre chef de département Mr. MOUSTAPHA TEMMAR à tous les enseignants de notre département d'énergétique qui nous ont aidé et enseigné durant toute notre cursus universitaire.

Nous voudrions aussi exprimer notre grande gratitude à nos familles, pour leur soutien moral et leurs encouragements prodigués pendant toutes ces années d'étude ainsi qu'à tous nos amis.

...MERCI À TOUS....

Résumé

L'objectif de cette étude consiste à étudier les performances d'un cycle combiné. L'essai a été réalisé le 15 et 16 mars 2021 afin de vérifier les performances en usine de la tranche 50 de la centrale à cycle combiné de Ras-Djinnat sous la supervision de M. Mubarak Abdel-Razzaq (Ingénieur Superviseur en Maintenance Turbine à l'Ecole Technique de Sonelgaz à Blida) où nous avons eu l'occasion de visiter la centrale électrique de Cap-Djinet, Province de Boumerdès... (La centrale de RAS DJINET se compose principalement de trois (3) tranches de centrale électrique à cycle combiné mono-arbre (CCPP) (50,60 et 70)).

La mesure et les essais de performance ont été effectués conformément aux normes internationales pertinentes et généralement reconnues.

La réalisation des essais de performance a pour objet de vérifier la performance réelle de la Centrale à Cycle Combiné de Ras Djinet de 1131.1 MW en Algérie, en cours de réalisation par Daewoo Engineering and Construction (dénommé ci-après « Constructeur »).

La configuration de la Centrale est la suivante :

- Une turbine à gaz (fournie par SIEMENS AG, SGT5-4000F) fonctionnant au gaz naturel
- Une HRSG (fournie par Nooter Eriksen : NE) pour générer la vapeur aux trois pressions connectées aux turbines à gaz.
- Une turbine à vapeur (fournie par SIEMENS AG, SST5-3000).
- Les détails sur le calcul pour la performance de la centrale sont joints au CHAPITRE 3.

Summary

The objective of this study is to study the performance of a combined cycle.

The test was carried out on March 15 and 16, 2021 in order to verify the factory performance of unit 50 of the Ras Jannat combined cycle power plant under the supervision of Mr. Mubarak Abdel-Razzaq (Supervisory Engineer in Turbine Maintenance at the 'Sonelgaz Technical School in Blida) where we had the opportunity to visit the power plant of Cap Jannat, Province of Boumerdès ... (The RAS DJINET plant mainly consists of three (3) plant modules Single Shaft Combined Cycle Electric (CCPP)).

Performance measurement and testing has been carried out in accordance with relevant and generally recognized international standards.

The purpose of performing the performance tests is to verify the actual performance of the 1131.1 MW Ras Dijinet Combined Cycle Power Plant in Algeria, currently being carried out by Daewoo Engineering and Construction (hereinafter referred to as “Manufacturer”).

The configuration of the Control unit is as follows:

- A gas turbine (supplied by SIEMENS AG, SGT5-4000F) running on natural gas
- An HRSG (supplied by Nooter Eriksen: NE) to generate steam at the three pressures connected to the gas turbines.
- A steam turbine (supplied by SIEMENS AG, SST5-3000).

The details on the calculation for the performance of the plant are attached to CHAPTER 3.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة أداء الدورة المركبة .
تم إجراء الاختبار في 15 و 16 مارس 2021 من أجل التحقق من أداء المصنع للوحدة 50 من محطة الدورة المركبة لراس جنات تحت إشراف السيد مباركي عبد الرزاق (مهندس مشرف في صيانة التوربينات في المدرسة التقنية لسونلغاز بالبلدية) حيث سنحت لنا الفرصة بالقيام بزيارة الى محطة توليد الكهرباء في كاب جنات ولاية بومرداس ...
يتكون المصنع بشكل أساسي من ثلاث (3) وحدات محطة أحادية المحور ذات الدورة المركبة الكهربائية (50,60 و 70)
تم إجراء قياس الأداء واختباره وفقاً للمعايير الدولية ذات الصلة والمعترف بها عموماً .
الغرض من إجراء اختبارات الأداء هو التحقق من الأداء الفعلي لمحطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة في رأس جنات 1131.1 ميجاوات في الجزائر، والتي يتم تنفيذها حالياً بواسطة شركة
" Daewoo Engineering and Construction " المشار إليها فيما يلي باسم الشركة المصنعة"
تكوين وحدة التحكم كما يلي:
توربينات غازية تعمل بالغاز الطبيعي (مقدمة من شركة SGT5-4000F، SIEMENS AG).
مولد بخار لتوليد البخار عند الضغوط الثلاثة المتصلة بالتوربينات الغازية (من شركة Nooter Eriksen: NE).
توربينات بخارية (مقدمة من شركة SST5-3000، SIEMENS AG).
تفاصيل حساب أداء المصنع مرفقة بالفصل الثالث .

Introduction générale

La production d'énergie électrique c'est un secteur industriel vitale offre à la clientèle le service d'approvisionnement en énergie électrique. Cette énergie est produite dans des centrales électriques qui sont classées en fonction de la source d'énergie ou la force qui produit le mouvement de rotation à savoir :

- Centrale hydraulique.
- Ferme éolienne.
- Centrale solaire.
- Centrale nucléaire.
- Centrale thermique.

Dans les centrales thermiques on distingue trois types à gaz, à vapeur, et centrale à cycle combiné dont le cas de la centrale électrique à cycle combiné de Cap-Djinet , d'une puissance de 1131.1MW a une configuration mono arbre de trois groupes de production.

L'économie algérienne repose essentiellement sur l'énergie (gaz et pétrole) et pour produire de l'électricité, injecter les matières dans les zones de raffinage, de liquéfaction et de transport on utilise des machines appelées turbines. Les plus importantes sont les turbines à gaz où son utilisation conduit à des émissions des gaz brûlés à des très hautes températures près de 500°C. Afin de réduire la pollution de ces gaz et de préserver l'environnement, plusieurs recherches scientifiques ont été conduites sur la façon d'exploiter les gaz d'échappement, elles ont atteint à établir un cycle combiné, qui nécessite essentiellement une haute température pour produire la vapeur nécessaire pour alimente la turbine à vapeur.

Les dernières technologies avancées ouvrent des perspectives intéressantes pour augmenter le rendement de la production d'électricité, tels que les cycles combinés qui fait la conjonction entre la turbine à gaz et la turbine à vapeur.

Dans ce travail de mémoire, on s'intéresse à l'étude énergétique de la centrale thermique à cycle combiné de CAP DJINET à Boumerdes, notre but dans cette étude est d'analyser les caractéristiques thermodynamiques de cette centrale. Nous avons réalisé ce travail sur trois chapitres :

Le premier chapitre présente un rappel général sur les moyens de production de l'énergie

électrique.

Une présentation générale sur la centrale et les principales caractéristiques des équipements et des procédés appliqués pour la centrale en cycle combiné de CAP-DJINET dans le deuxième chapitre.

Des calculs énergétiques détaillés de la turbine à gaz et la turbine à vapeur ont été effectués dans le troisième chapitre. Nous avons aussi analysé les caractéristiques thermodynamiques des différents éléments de ces turbines (les températures, les pressions, la consommation spécifique et le rendement).

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Résumé | 6 |
| Summary | 7 |
| ملخص..... | 8 |
| Introduction générale..... | 9 |
| Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique | 15 |
| Introduction : | 16 |
| <u>1.</u> Généralités :..... | 16 |
| <u>1.1.</u> Energies :..... | 16 |
| <u>2.</u> Classification de l'énergie | 16 |
| <u>2.1.</u> Énergies Primaires..... | 16 |
| <u>2.2.</u> Énergies de transformation (secondaires) | 17 |
| <u>2.2.1.</u> Energie Thermique (chaleur) : | 17 |
| <u>2.2.2.</u> Energie mécanique : | 17 |
| <u>2.2.3.</u> Énergie électrique (électricité) | 18 |
| <u>2.3.</u> Energies renouvelables :..... | 18 |
| <u>3.</u> Avantages et inconvénients des différents combustibles : | 18 |
| <u>3.1.</u> Combustibles fossiles :..... | 18 |
| <u>3.2.</u> Combustibles nucléaires :..... | 19 |
| <u>4.</u> Production de l'énergie électrique : | 19 |
| <u>4.1.</u> Centrale électrique :..... | 19 |
| <u>4.2.</u> Types de centrales électriques :..... | 20 |
| <u>4.2.1.</u> Centrales thermiques (à énergie fossile) : | 20 |
| <u>4.2.2.</u> Centrale thermique à Gaz : | 21 |
| <u>4.2.3.</u> Centrale thermique à vapeur : | 23 |
| <u>4.2.4.</u> Centrale à cycle combiné : | 24 |
| <u>4.2.5.</u> Centrale Diesel : | 25 |
| <u>4.2.6.</u> Centrales à énergie renouvelable..... | 26 |
| <u>4.2.6.1.</u> Centrale éolienne :..... | 26 |
| <u>4.2.6.2.</u> Centrale solaire :..... | 26 |
| Chapitre 2 : Principales caractéristiques des équipements et des procédés appliqués pour la centrale en cycle combiné de Ras-Djinet | 28 |

SOMMAIRE

| | | |
|--------------|--|----|
| <u>1.</u> | Introduction : | 29 |
| <u>2.</u> | Présentation générale du projet : | 29 |
| <u>2.1.</u> | Description générale : | 30 |
| <u>2.2.</u> | Combustible : | 32 |
| <u>2.3.</u> | Turbine à gaz : | 32 |
| <u>2.4.</u> | Turbine à vapeur : | 34 |
| <u>2.5.</u> | GÉNÉRATEUR : | 35 |
| <u>2.6.</u> | Chaudière de récupération HRSG : | 37 |
| <u>2.7.</u> | Condenseur : | 38 |
| <u>2.8.</u> | Pompes d'extraction des condensats : | 38 |
| <u>2.9.</u> | Système de mise sous vide du Condenseur (Côté Vapeur) : | 38 |
| <u>2.10.</u> | Pompes alimentaires : | 39 |
| <u>2.11.</u> | Station de pompage : | 39 |
| <u>2.12.</u> | Unité d'électro-chloration : | 39 |
| <u>2.13.</u> | Système de nettoyage continu du condenseur : | 40 |
| <u>2.14.</u> | Système de refroidissement en circuit fermé : | 40 |
| <u>2.15.</u> | Eau déminéralisée : | 40 |
| <u>2.16.</u> | Système de surveillance des émissions de fumée : | 41 |
| <u>2.17.</u> | Système d'alimentation en gaz : | 41 |
| <u>2.18.</u> | Système d'alimentation en gasoil : | 41 |
| <u>2.19.</u> | Station d'air comprimé : | 42 |
| <u>2.20.</u> | Equipements de protection contre les incendies : | 42 |
| <u>2.21.</u> | Transformateurs élévateurs de tension de l'alternateur : | 43 |
| <u>2.22.</u> | Trois Transformateurs auxiliaires d'unité (soutirage) : | 43 |
| <u>2.23.</u> | Deux équipements de démarrage statique (CSF) : | 43 |
| <u>2.24.</u> | Trois systèmes d'excitation statique : | 44 |
| <u>2.25.</u> | Alimentation secourue Black Start : | 45 |
| <u>2.26.</u> | Système numérique de contrôle commande de la centrale (SNCC) : | 45 |
| <u>2.27.</u> | HVAC : | 45 |
| <u>2.28.</u> | Production d'eau dessalée : | 46 |
| <u>2.29.</u> | Station de production d'hydrogène : | 46 |
| <u>3.</u> | Principe de fonctionnement de la centrale de Cap-Djinet : | 48 |
| <u>4.</u> | Les avantages et les inconvénients des centrales à cycle combiné : | 51 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| CHAPITRE 03 : Les performances de cycle combiné..... | 52 |
| <u>1.</u> Introduction :..... | 53 |
| <u>2.</u> Etude théorique d'une turbine à gaz : | 53 |
| <u>2.1.</u> Etude des cycles thermodynamiques d'une turbine à gaz : | 53 |
| <u>2.1.1.</u> Cycle idéal de Brayton : | 53 |
| <u>2.1.2.</u> Cycle réel : | 53 |
| <u>2.1.3.</u> Description du cycle :..... | 54 |
| <u>2.2.</u> Etude de cycle de Brayton :..... | 54 |
| <u>2.3.</u> Rendement théorique d'une turbine a gaz :..... | 54 |
| <u>2.4.</u> Travail utile de turbine a gaz :..... | 54 |
| <u>2.5.</u> CHALEUR FOURNIE :..... | 55 |
| <u>2.6.</u> Rendement théorique de la turbine à gaz :..... | 55 |
| <u>2.7.</u> Cycle réel : | 56 |
| <u>2.7.1.</u> Calcul des paramètres de turbine à gaz :..... | 58 |
| <u>2.8.</u> Calculs du rendement théorique :..... | 58 |
| <u>2.9.</u> Enthalpie de vapeur d'eau :..... | 59 |
| <u>3.</u> Diagramme de Mollier : | 59 |
| <u>4.</u> Cycle thermodynamique d'une turbine à vapeur ST :..... | 61 |
| <u>4.1.</u> Le cycle Rankine idéal Cycle idéal correspondant à une centrale thermique élémentaire à vapeur d'eau :..... | 61 |
| <u>4.2.</u> Cycle de Hirn (à vapeur surchauffée) : | 62 |
| <u>4.3.</u> Définition du rendement du cycle :..... | 63 |
| <u>4.4.</u> Calcul du travail fourni par la turbine :..... | 64 |
| <u>4.5.</u> Quantité de chaleur reçue : [1] | 64 |
| <u>4.6.</u> Les paramètres nécessaires au calcul de la tv : [5]..... | 64 |
| <u>4.7.</u> Calcule de rendement de turbine à vapeur : | 65 |
| <u>4.8.</u> Détermination de l'enthalpie du chaque point de cycle :..... | 65 |
| <u>4.8.1.</u> Calcule des paramètres nécessaires pour trouver le rendement du cycle combine : 67 | |
| <u>4.9.</u> Travail de pompe :..... | 67 |
| <u>4.9.1.</u> Le rendement du cycle combine : | 68 |
| <u>4.9.2.</u> Calcule de consommation spécifique :..... | 69 |
| Conclusion Générale | 76 |
| Bibliographie..... | 77 |

SOMMAIRE

| | |
|-----------------------------|----|
| La listes des figures | 78 |
| Les tableau..... | 80 |
| Nomenclature | 81 |

*Chapitre 1 : Généralités sur les
moyens de production de
l'énergie électrique*

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

Introduction :

L'énergie est définie en physique comme la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité. L'énergie ne disparaît jamais ; elle se transforme d'une forme en une ou plusieurs autres. Elle s'exprime en joules ou en kilowattheure (kWh).

1. Généralités :

L'électricité est la forme d'énergie la plus pratique et la plus souple dont nous disposons. Elle peut être envoyée à longue distance de façon efficace et peu coûteuse, elle actionne les appareils électriques et les machines de l'industrie, et est utilisable pour assurer le chauffage et l'éclairage.

En raison de la diminution des réserves de pétrole, les savants et les ingénieurs ont développées technologies alternatives de production d'énergie. [1]

1.1. Energies :

L'énergie est la capacité de produire un travail (changement, mouvement...)

Dans la nature toute énergie disponible est une source d'énergie primaire avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être mise en œuvre.

Dans l'industrie de l'énergie, on distingue la production d'énergie primaire, de son stockage et son transport sous la forme d'énergie secondaire, et de la consommation d'énergie finale. [1]

2. Classification de l'énergie

2.1. Énergies Primaires

Les énergies primaires sont des énergies naturelles disponibles avant toute transformation. Sont soient :

Fossiles : L'énergie fossile désigne l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et houille. Elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable, leur combustion entraîne des gaz à effet de serre. Cette énergie est produite à partir de composés issus de la décomposition sédimentaire des matières organiques, c'est à dire principalement composés de carbone. Elle englobe le pétrole, le gaz naturel le charbon, ainsi que l'uranium.

(Gaz, pétrole, charbon...);

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

Renouvelables : Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) mais aussi le vent (énergie éolienne), l'eau (hydraulique).
(énergie solaire, énergie éolienne, la biomasse, l'hydraulique, lagéothermie)

2.2. Énergies de transformation (secondaires)

Si l'énergie primaire n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être mise en œuvre.

Les énergies de transformation de base sont :

L'énergie Thermique

L'énergie Mécanique

L'énergie Electrique

2.2.1. Energie Thermique (chaleur) :

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes.

Modes de production :

- Combustion
- Energie solaire + capteur thermique
- Réacteurs nucléaires

Champs d'application :

- Chauffage des locaux
 - Stérilisation
 - Métallurgie...
- ✓ Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé.

2.2.2. Energie mécanique :

L'énergie d'un système emmagasinée sous forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle mécanique dont le système peut produire ou transmettre un mouvement, une force ou une déformation.

Modes de production :

- Moteurs thermiques : moteurs à combustion interne (diesel) et à explosion (essence), turbines.
- Moteurs électriques

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

Champs d'application :

- Transport (avions, bateaux, automobiles, trains...), Electroménagers, Automatisme, Industrie [1]

2.2.3. Énergie électrique (électricité)

L'électricité, une forme d'énergie, est produite par un flux d'électrons. Le déplacement de ces derniers produit une charge électrique qui peut fournir l'énergie. Elle est facile à transporter et à convertir en une autre forme d'énergie.

- ✓ Elle peut être convertie en énergie mécanique en alimentant un moteur électrique ou également utilisée pour produire certaines réactions chimiques.

Modes de production :

- Voie thermique : Centrales thermique, centrales nucléaire
- Voie hydraulique : centrale hydraulique
- Voie photovoltaïque : Photopiles

Champs d'application :

- Moteurs électriques
- Chauffages électriques
- Eclairage public
- Moyens informationnels ...

2.3. Energies renouvelables :

Avantage :

- A l'échelle temporelle de l'être humain, le soleil, la géothermie et les vents sont des sources d'énergie inépuisables.
- Les énergies nouvelles sont propres et bien réparties sur tout le globe.

Inconvénients :

- Leur utilisation reste encore limitée, des progrès restent à réaliser. [1]

3. Avantages et inconvénients des différents combustibles :

3.1. Combustibles fossiles :

Avantage :

- Utilisation pratique
- Rapidité de dégagement d'énergie
- Grande disponibilité

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

- Technologie de stockage maîtrisée
- Diversification des applications

Inconvénients :

- Réserves limitées
- Pollution atmosphérique :
 - CO₂ et CH₄ « effet de serre »
 - Imbrûlés HC, CO, CH₄ génèrent l'ozone à la surface de la terre et créent des problèmes respiratoires.
 - Le soufre contenu dans le combustible est responsable de la corrosion des installations thermiques et des pluies acides.

Les additifs de l'essence à base de plomb ont des conséquences néfastes sur le système nerveux. [1]

3.2. Combustibles nucléaires :

Avantage :

- Bon rendement : L'Uranium naturel produit une énergie de 116 000 kWh/kg

Inconvénients :

- Exigent la disponibilité et la maîtrise de des technologies de pointe.
- Les problèmes des déchets nucléaires ne sont pas encore réglés sérieusement (contamination dangereuse pour l'homme).
- Leur utilisation reste limitée, des progrès restent à faire.
- L'uranium utilisé dans les réactions de fission nucléaire est épuisable.

Aspect redoutable de l'arme nucléaire. [1]

4. Production de l'énergie électrique :

4.1. Centrale électrique :

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Elles transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains via un réseau électrique qui permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

Une centrale électrique est une installation constituée de plusieurs groupes de production. Ce nombre plus ou moins élevé permet, d'assurer la continuité de la production, quand un groupe est indisponible suite à un défaut ou pour une révision générale ou partielle.

La production mondiale de l'électricité dépasse les 12 000 milliards de kWh, avec 26% aux USA.

Cette énergie est produite au moyen de sources diverses qui répartissent ainsi :

Charbon : 39%

Hydraulique : 16%

Nucléaire : 16%

Gaz naturel : 20%

Pétrole : 7%

Énergies renouvelables : 2%

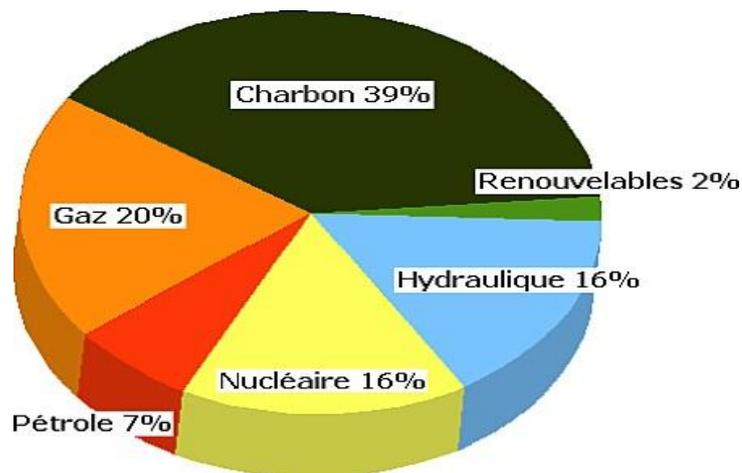


Figure 1-1 : Répartition des sources d'énergie dans le monde

4.2. Types de centrales électriques :

Les centrales électriques se divisent en deux grandes catégories

- Les centrales thermiques (à énergie fossile)
- Les centrales à énergie renouvelable

4.2.1. Centrales thermiques (à énergie fossile) :

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

Les centrales thermiques utilisent des combustibles fossiles comme énergie primaire (le charbon, le gaz naturel, le fuel, le pétrole ou l'uranium).

Comme l'énergie électrique n'est pas créée, elle est plutôt transformée. La transformation qui passe par l'énergie calorifique est dite « énergie thermique ».

Cette énergie thermique est obtenue à l'aide des hydrocarbures (énergie fossile).

En plus le plus souvent la centrale doit son nom au fluide moteur qui entraîne la turbine. [1]

4.2.2. Centrale thermique à Gaz :

La centrale thermique à gaz est un moteur à combustion interne. Elle utilise l'énergie mécanique produite par une turbine fonctionnant avec les gaz de combustion. Cette énergie est nécessaire pour faire tourner l'alternateur afin de produire de l'énergie électrique. D'où le nom de centrale thermique à Turbine à gaz. Elle est constituée essentiellement : d'un compresseur axial d'une ou de plusieurs chambres de combustion d'une turbine et d'un alternateur.



Figure 1-2 : Centrale thermique à gaz

Fonctionnement de la centrale thermique à Turbine à gaz :

La production de l'électricité dans cette centrale nécessite quatre étapes :

Compression :

- Un compresseur de type axial comprime de l'air ambiant à une pression comprise entre 8 et 10 bars environ ($T=300^\circ$).

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

La combustion :

- Un combustible hydrocarbure (gaz, charbon, fioul) brûle dans une chambre de combustion en dégageant de la chaleur en transformant de l'énergie chimique en énergie calorifique.

Production d'électricité :

La turbine permet la détente des gaz qui sortent de la chambre de combustion en transformant l'énergie calorifique en énergie mécanique qui entraîne l'alternateur qui va à son tour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

Adaptation de la tension :

Un transformateur élévateur élève la tension de l'électricité pour le transport dans les lignes hautes tension. [1]

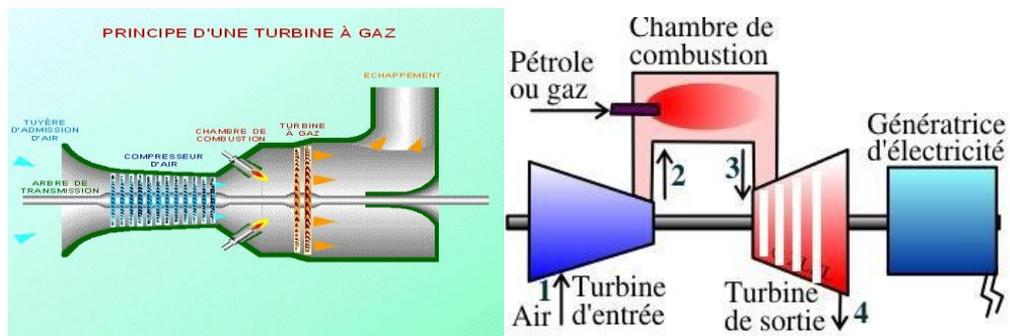


Figure 1-3 : Fonctionnement d'une centrale thermique à Turbine à gaz

4.2.3. Centrale thermique à vapeur :



Figure 1-4 : Centrale thermique à Turbine à vapeur

Fonctionnement de la centrale thermique à vapeur :

On distingue quatre étapes afin de produire de l'électricité :

La combustion :

- Un combustible hydrocarbure (gaz, charbon, fioul) brûle dans une chaudière endégageant de la chaleur.

La production de la vapeur :

- La chaleur (échangeurs) transforme l'eau de la chaudière en vapeur.

La production d'électricité :

- La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur (fluide moteur : vapeur).
- L'alternateur produit un courant électrique, transporté dans les lignes du réseau.

Le recyclage (condensation) :

A la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur refroidi par l'eau de mer. [1]

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

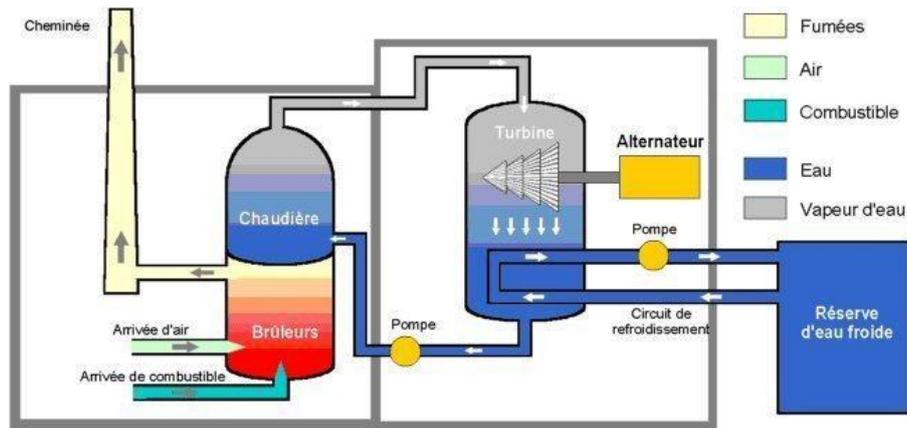


Figure 1-5 : Fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur (TV)

4.2.4. Centrale à cycle combiné :

Fonctionnement de la centrale à Cycle combiné :

Un cycle combiné regroupe deux cycles en un, chacun produit de l'électricité et étant inter-relié.

❖ CIRCUIT Turbine à gaz :

- + Un compresseur met en pression et en température l'air de combustion ($P=10\text{bars}$; $T=300^{\circ}\text{C}$).
- + Le combustible gaz s'enflamme à son contact (température de l'ordre de $1\ 200^{\circ}\text{C}$).
- + Les gaz d'échappement font tourner une turbine, qui entraîne à son tour un alternateur.
- + Cet alternateur génère de l'électricité puis l'injecte dans le réseau.

❖ CIRCUIT Turbine à vapeur :

- + Dans la chaudière, au contact des gaz d'échappement très chauds, l'eau du circuit est transformée en vapeur.
- + Cette vapeur fait tourner une turbine à vapeur qui entraîne l'alternateur en générant de l'électricité.
- + La vapeur utilisée est envoyée vers un condenseur dans lequel circule de l'eau froide. Au contact de l'eau, la vapeur se transforme en eau, qui est récupérée et envoyée à nouveau dans la chaudière. L'eau utilisée pour le refroidissement est restituée au milieu naturel ou renvoyée dans le

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

condensateur.

- a. (Dans cette figure on remarque que des aéro-réfrigérants sont utilisés pour le refroidissement)

L'électricité est injectée dans le réseau après avoir été portée à 220 000 ou à 400 000 volts à l'aide d'un transformateur de puissance. [1]

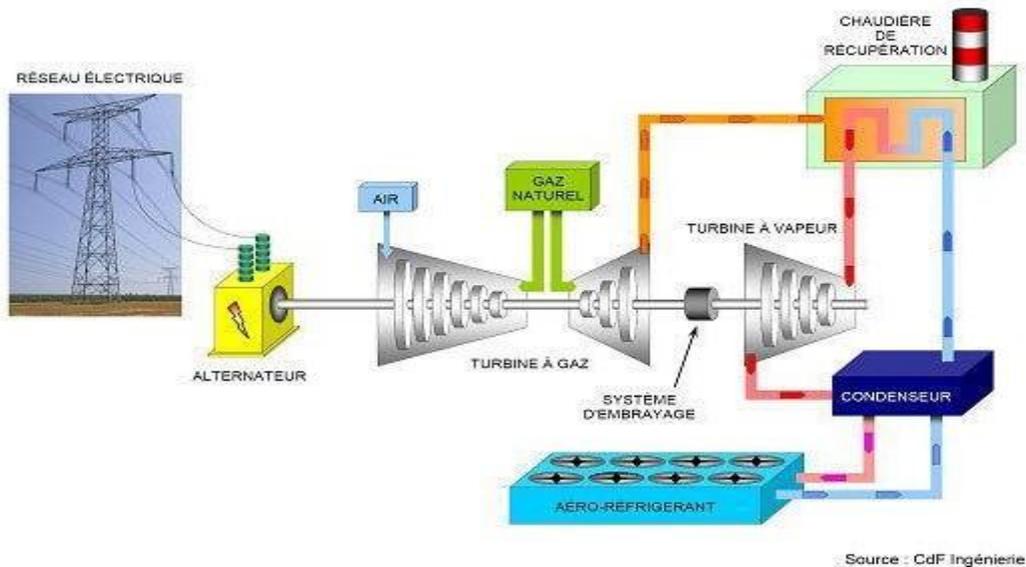


Figure 1-6 : Fonctionnement d'une centrale à cycle combiné (TG/TV)

4.2.5. Centrale Diesel :

La centrale diesel est une centrale très limitée en puissance électrique d'où le nom de « Microcentrale ». Elle a pour rôle d'alimenter un réseau électrique autonome (une agglomération, une usine, une petite zone industrielle... etc.).

Le principe de fonctionnement de cette centrale est basé sur un moteur diesel entraînant un alternateur d'une puissance allant en moyenne de **1.2 MW** jusqu'à **6 MW**.



Figure 1-7 : Centrale thermique Diesel

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique

4.2.6. Centrales à énergie renouvelable

4.2.6.1. Centrale éolienne :

Dans une centrale éolienne, l'énergie électrique est produite directement par des génératrices éoliennes. Ces machines formées d'un mat, surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, elles sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées. L'alternateur permet de transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.



Figure 1-8 : Centrale éolienne de « wayfinder flickr » (Californie)

Se compose de :

- Un mât pouvant atteindre 110 mètres de haut qui supporte la nacelle
- Une nacelle qui supporte le rotor, la transmission et la génératrice
- Un rotor et de pales (en général 3) mesurant jusque 120 mètres
- Une transmission mécanique qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge
- Une génératrice électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique
- Un système d'orientation qui oriente la nacelle face au vent

Un système électrique qui gère la connexion au réseau et le fonctionnement de l'éolienne. [1]

4.2.6.2. Centrale solaire :

Chapitre 1 : Généralités sur les moyens de production de l'énergie électrique



Figure 1-9 : Centrales solaires photovoltaïque

L'énergie solaire est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques. [1]

Chapitre 2 : Principales caractéristiques des équipements et des procédés appliqués pour la centrale en cycle combiné de Ras-Djinet

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

1. Introduction :

Dans ce chapitre, on fera une présentation générale de la centrale thermique de cap-Djinet avec une description sommaire d'une tranche de production, des auxiliaires généraux et des auxiliaires électrique intervenant dans le cycle de production de l'énergie électrique.

2. Présentation générale du projet :



Figure 2-1 : La centrale cap-djinet

- | | |
|--|---|
| 1. Station de pompage | 13. Station d'Hydrogène |
| 2. Station de Dessalement | 14. Local des compresseurs |
| 3. Station d'Electro-chloration | 15. Locale des pompes d'incendie |
| 4. Station de Déminéralisation | 16. Réservoir de stockage de gasoil |
| 5. Station de traitement des eaux usées | 17. Réservoir de stockage de l'eau déminéralisé |
| 6. Post gaz (NGSS) | 18. Bâtiment administratif |
| 7. Salle de commande | 19. Parking |
| 8. Local Diesel de secours | 20. Cantine |
| 9. Poste d'évacuation d'Énergie (GIS) | 21. Magasin |
| 10. Chaudière de recuperation HRSG (HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR) | 22. Local de stockage des matières dangereuses |
| 11. Salle des machines | 23. Stockage des futs d'huile |
| 12. Transformateur GST | 24. Stockage des bouteilles de gaz |
| | 25. Ancien central thermique |

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.1. Description générale :

Le projet consiste à la mise en place d'une centrale électrique à cycle combiné et avec ses auxiliaires, d'une puissance d'environ 3 x 400 MW. Pour la réalisation de cette centrale, le **Groupe sud-coréen Daewoo E&C** a été retenu par la Compagnie de l'engineering, de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe Sonelgaz, à la faveur de son offre jugée meilleure que ses concurrents sur le plan coût total d'investissement, et du coût du Kw/heure de l'énergie électrique produite.

Le projet sera implanté à l'intérieur de la centrale existante de Ras-Djinet de 4 x 176.7 MW, située en bordure de la mer Méditerranée. Il est situé entre le rivage et le carrefour de la route de Bordj-Menaïl (CW123) et de la route côtière (RN24). Ils se situent donc à 3 km au Sud-Ouest du village de Cap-Djinet et à 77 km, par route à l'Est d'Alger.

La superficie totale du terrain disponible pour l'implantation de la centrale est de l'ordre de Dix (10) Hectares environ.

Le constructeur **Groupe sud-coréen Daewoo E&C** est chargé des études, de la fabrication, de la fourniture, du transport sur site, du montage, des essais, de la mise en service des équipements, ainsi que des travaux et des ouvrages de génie civil conformément aux exigences du cahier des charges.

La future centrale à cycle combiné sera composée de ce qui suit :

La centrale électrique à cycle combiné de Ras Djinet se compose de trois unités

« Mono-arbre » (ou single shaft) Chaque unité se compose de :

- Une turbine à gaz équipée d'un système de combustion séquentielle à pré-mélange pauvre et à faibles émissions de NOx (oxyde d'azote).
- Un cycle eau / vapeur à trois niveaux de pression et resurchauffe avec chaudière de récupération
- Une turbine à vapeur (TV) deux corps à trois niveaux de pression et resurchauffe
- Un alternateur refroidi à l'Hydrogène,

La conduite de la centrale est réalisée par l'opérateur en fonction des demandes du gestionnaire du réseau électrique. La centrale est conçue pour fonctionner en continu à la charge nominale (AMA 0° / TET max) ou à charge partielle pour une température ambiante comprise entre -1°C et 45°C. Le fonctionnement en pointe de la turbine à gaz n'est pas possible

Pour le démarrage, l'alternateur est utilisé comme moteur, la puissance est fournie par le réseau électrique

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

La puissance électrique fournie au réseau par un courant triphasé 50 HZ et à 400 kV de tension nominale côté Haute Tension du transformateur élévateur, à la sous-station de Ras Djinet. Le facteur de puissance est choisi par l'opérateur entre 0.80 et 0.91, celui-ci étant mesuré aux bornes de l'alternateur.

La production de la centrale est réglée en contrôlant la charge de la turbine à gaz en fonction des exigences de production générale de la centrale. [2]



Figure 2-2 : schéma présentable de la centrale



Figure 2-3 : Image présentable des cheminées et HRSG et le département de la turbine

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.2. Combustible :

La centrale est conçue pour fonctionner au gaz naturel en opération normale et au gasoil en secours.

La centrale de Ras Djinet est composée de trois Blocs à une seule ligne d'arbre. La ligne d'arbre comprend la turbine à gaz entraînant le turboalternateur via un accouplement rigide. La turbine à vapeur est accouplée via un embrayage auto-commutable synchrone sur l'autre côté de l'alternateur. Cette disposition permet de démarrer et d'arrêter la turbine à vapeur indépendamment de la turbine à gaz, alors que la turbine à gaz est déjà en fonctionnement. [2]

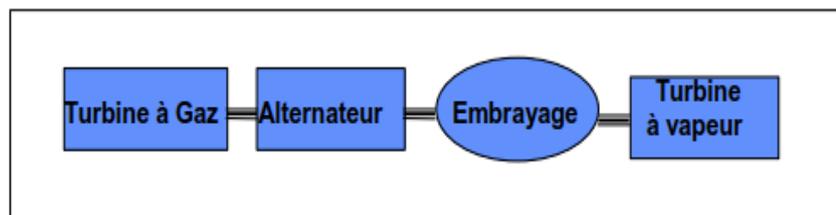
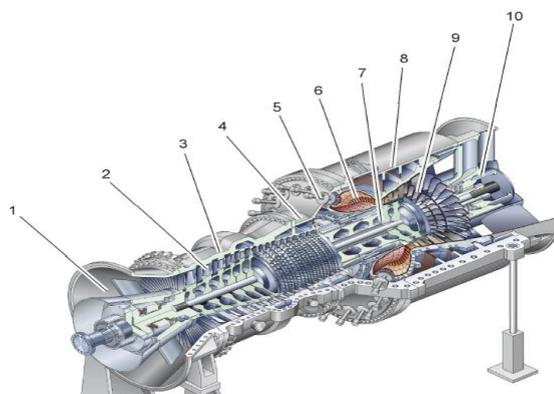


Figure 2-4 : Schéma de la ligne d'arbre.



Figure 2-5 : Fonctionnement des turbines (gaz et vapeur) et la HRSG

2.3. Turbine à gaz :



- 1 Boîtier du palier de compresseur
- 2 Compresseur
- 3 Montage 1 des aubes directrices du compresseur
- 4 Boîtier externe de la chambre de combustion
- 5 Brûleur
- 6 Chambre de combustion
- 7 Rotor
- 8 Boîtier de turbine
- 9 Boîtier du palier de turbine
- 10

Figure 2-6 : Turbine à gaz

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCÉDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINÉ DE RAS-DJINET

La turbine à gaz de type (Siemens modèle SGT5-4000F) comprend un rotor constitué d'un étage turbine « haute pression », de 4 étages turbine « basse pression », de 22 étages compresseur, et deux chambres de combustion annulaires (les brûleurs EV et SEV), appliquant le principe de combustion séquentielle.

L'étage HP se trouve en aval des brûleurs EV et en amont des brûleurs SEV. L'air en entrée de la TG est filtré dans le bloc de prise d'air. Le rotor est couplé de façon rigide à l'arbre de l'alternateur.

Le débit d'air à travers la turbine à gaz est régulé par la position angulaire de trois aubes mobile d'admission (AMA), placées devant les trois premiers rangs d'ailettes du compresseur.

A charge partielle (au-dessus de 60 % de charge TG environ), le contrôleur TG garde la température du gaz d'échappement constante à son maximum afin d'obtenir un rendement maximum du cycle combiné. La température d'entrée de la turbine (TET) est ajustée par le contrôle de l'injection du combustible et les AMA.

Pour assurer le refroidissement et l'étanchéité de la TG, de l'air est soutiré du compresseur à différents étages. Deux de ces extractions d'air sont partiellement refroidies à l'extérieur de la TG, l'air BP sert à refroidir les brûleurs SEV, les premiers étages de la turbine BP et son rotor, l'air HP sert principalement à refroidir la turbine HP et son rotor. Les échangeurs pour refroidir l'air HP et BP sont alimentés par les circuits d'eau alimentaire, cette eau est vaporisée à travers ces échangeurs (OTC pour one through cooler) et est ensuite réinjectée dans les circuits vapeur.

Embrayage auto-commutable synchrone entre la TV et l'Alternateur

L'embrayage permet de connecter la TV à l'alternateur, alors que celui-ci est déjà entraîné par la TG :

- L'embrayage s'engage automatiquement aussitôt que le couple de la TV devient positif ; c'est-à-dire aussitôt que la vitesse de la TV a tendance à dépasser celle de l'alternateur.
- L'embrayage se désengage automatiquement aussitôt que le couple de la TV devient négatif c'est-à-dire aussitôt que la vitesse de la TV a tendance à passer en dessous de celle de l'alternateur.

Aucun système de régulation n'est nécessaire pour l'embrayage. [2]

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.4. Turbine à vapeur :

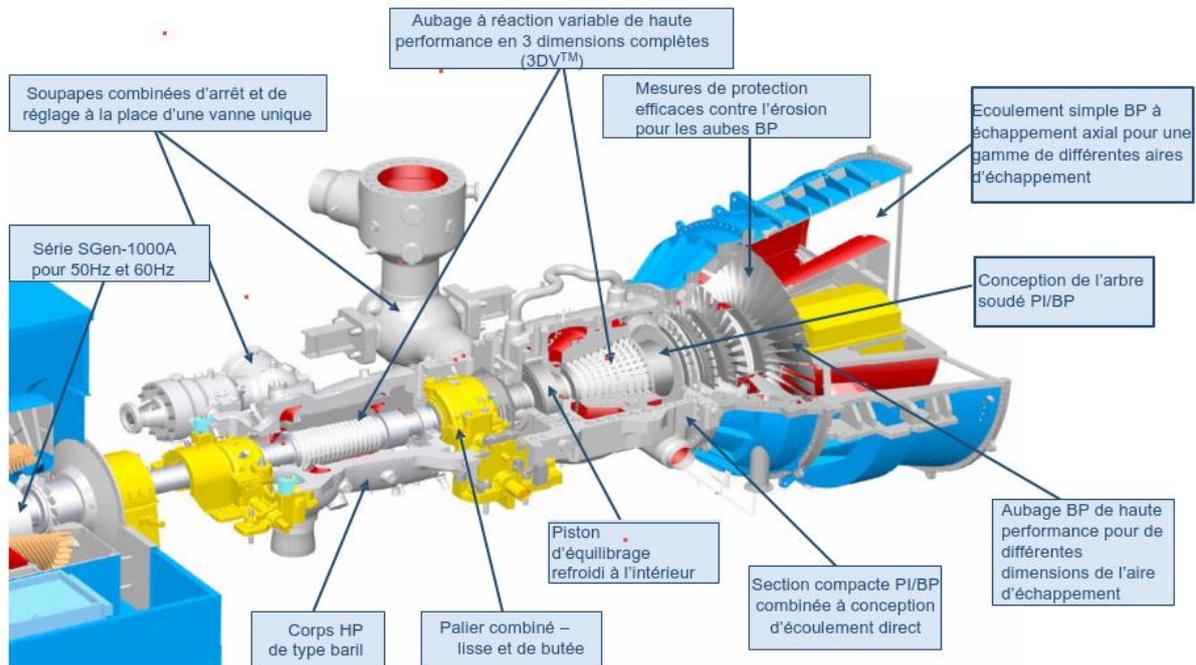


Figure 2-7 : Turbine Série SST-3000 (schématique, irresponsabilité d'exactitude et de complétude)

La Turbine à vapeur, possède deux corps, trois pressions, et une resurchauffe. Le premier corps est l'étage haut pression (HP) et le deuxième corps de la turbine se compose des étages moyens pression (MP) et basse pression (BP). Le corps MP/BP est à double flux.

Les deux rotors des corps HP et MP/BP sont liées entre eux par un accouplement rigide. Le rotor HP est également lié à l'embrayage par un accouplement rigide

La vapeur est admise dans les corps HP et MP au travers des organes d'admission incluant les vannes d'arrêt et de contrôle. L'admission HP est réalisée par un bâti dans lequel les vannes sont montées en série, et l'admission MP utilise deux bâtis où les vannes d'arrêt et les vannes de contrôle sont entièrement intégrées dans le même corps sphérique bridé au corps externe MP.

La vapeur vive HP, régulée par une vanne d'arrêt et une vanne de contrôle, entre dans le corps HP et se détend jusqu'à la pression de la vapeur à resurchauffer. La vapeur à resurchauffer est mélangée avec la vapeur MP produite par la chaudière de récupération avant d'être resurchauffée dans la chaudière de récupération.

La vapeur BP entre dans la turbine à travers une vanne d'arrêt et une vanne de contrôle. La vapeur issue du corps échappement BP de la turbine est envoyée au condenseur.

Chaudière de récupération et réfrigérants d'air TG. [2]

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.5. GÉNÉRATEUR :

Le générateur est l'équipement électrique le plus important de toute la centrale électrique. Le générateur est capable d'évacuer le courant de la sortie de la turbine à gaz (turbine à gaz + turbine à vapeur) à laquelle il est connecté sans dépasser la limite de température admissible stipulée par la norme pertinente sur l'ensemble de la plage de température ambiante du site.

Comme l'illustre la figure ci-contre, un générateur à arbre unique a été utilisé pour ce projet. Celui-ci est directement couplé à la turbine à gaz à une extrémité et couplé à la turbine à vapeur à l'autre extrémité grâce à un dispositif de serrage. [2]

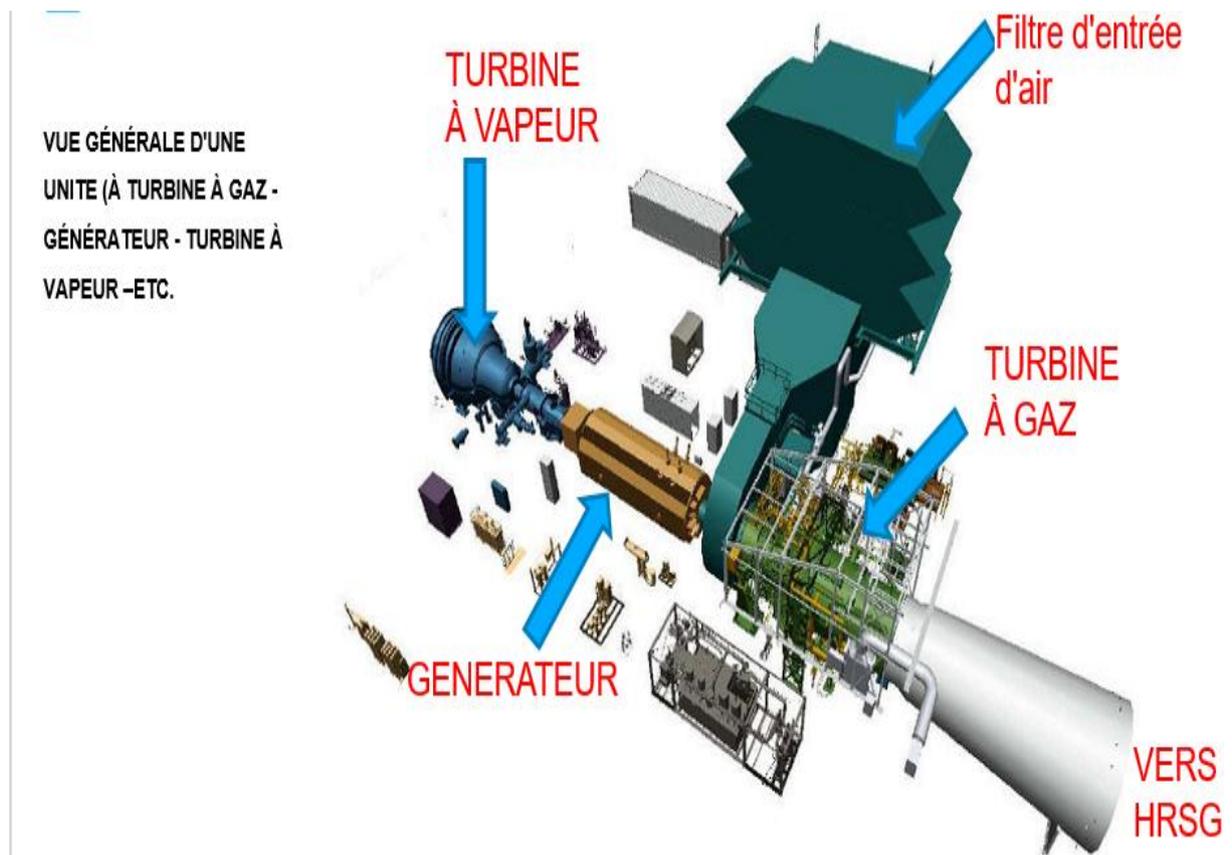


Figure2-9 : Vu Générale d'une unité (TG-Générateur-TV...)

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

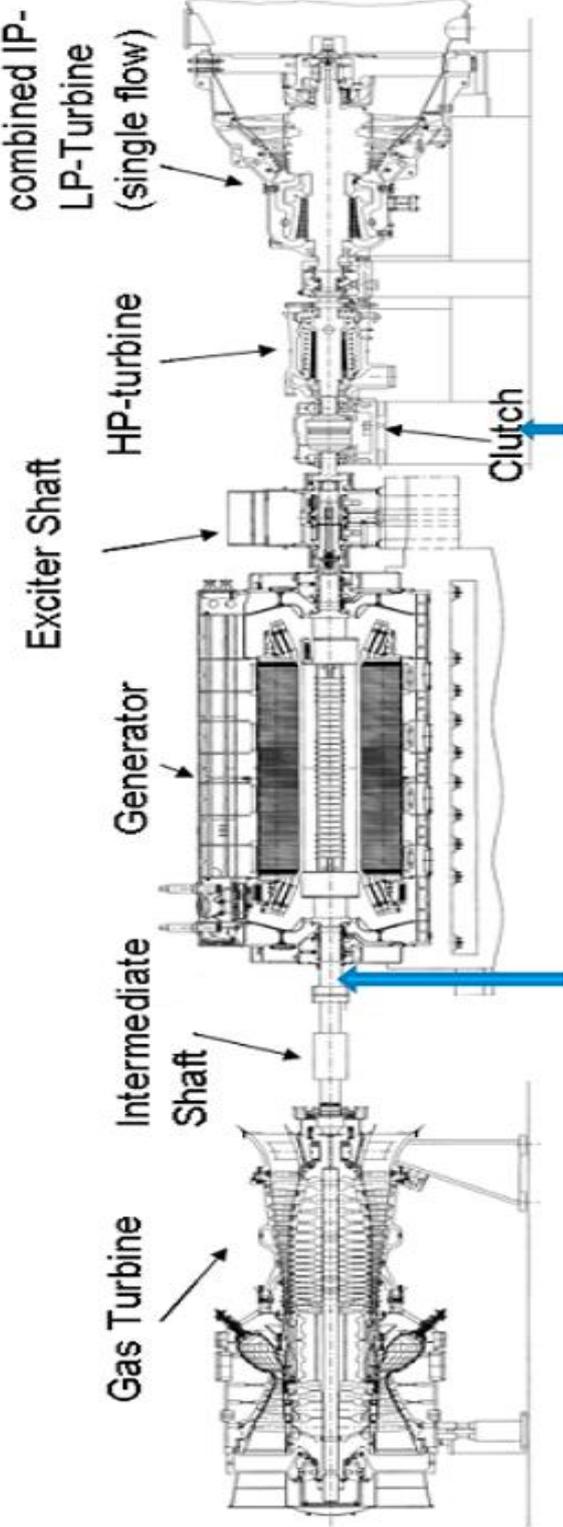


Figure 2-8 : Schéma présente le montage de générateur entre la turbine

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.6. Chaudière de récupération HRSG :

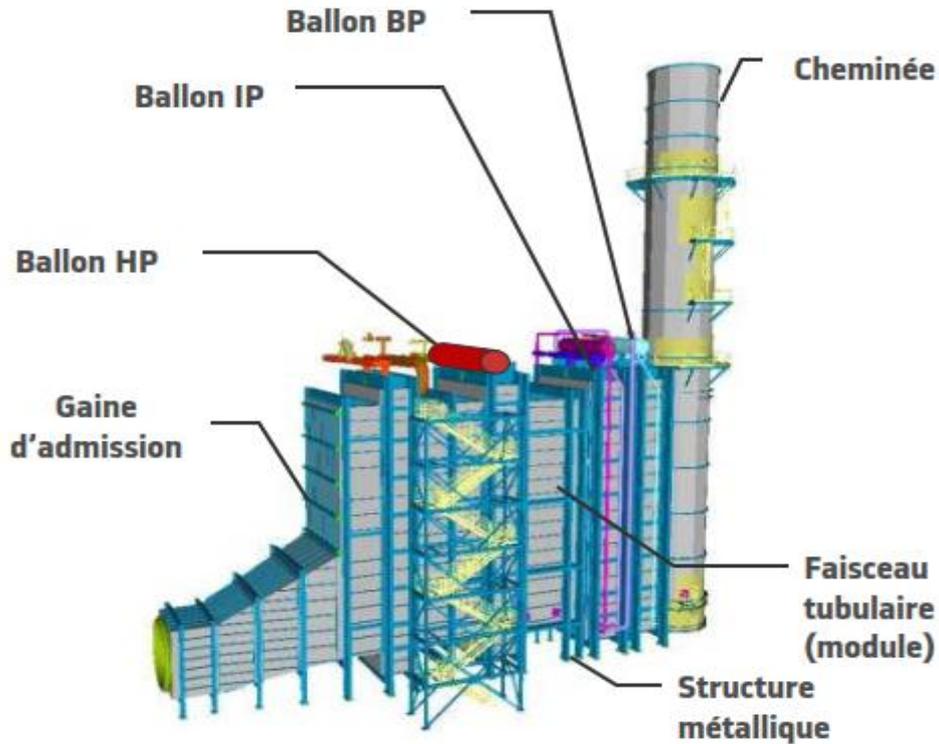


Figure 2-10 : Vu générale d'une tranche de la centrale

La principale fonction du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) est de générer la quantité et la qualité de vapeur requises en utilisant la chaleur perdue des gaz d'échappement du turbogénérateur à gaz (GTG).

Chaque module de la centrale à cycle combiné (CCPP) est fourni avec un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HSRG) ainsi que tous les accessoires nécessaires.

La vapeur générée par le HRSG sera fournie à la turbine à vapeur.

Les principaux composants du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) sont :

- Ballon vapeur haute pression (HP)
- Ballon vapeur pression intermédiaire (IP)
- Ballon vapeur basse pression (LP)
- Sections économiseur (pour chaque niveau de pression)
- Sections évaporateur (pour chaque niveau de pression)

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

- Sections surchauffeur (pour chaque niveau de pression)
- Section réchauffeur (pour la section IP)
- Dégazeur Intégral Ballon LP
- Cheminée HSRG avec Silencieux. [2]

2.7. Condenseur :

L'installation est de design axial refroidi à l'eau de mer. Le condenseur est constitué de deux faisceaux double passe. Afin d'opérer le condenseur avec un seul demi condenseur, les boîtes à eau sont divisées. Du fait de l'augmentation de la pression à l'échappement de la TV, la puissance produite est dans ce cas réduite. [2]

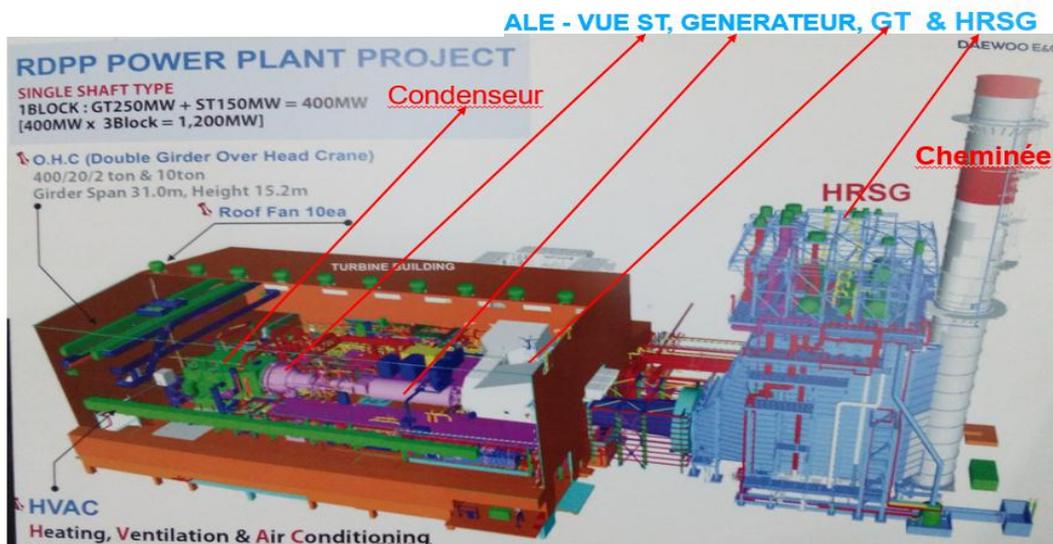


Figure 2-11 : Schéma présente l'emplacement de condenseur

2.8. Pompes d'extraction des condensats :

Les pompes principales d'extraction (2x100%) sont de type vertical. En fonctionnement normal, une pompe est en service. Le deuxième reste en secours. La pompe de secours est mise en marche automatiquement si la pompe en fonctionnement est défectueuse ou si le contournement de la turbine vapeur est en marche à charge élevée. [2]

2.9. Système de mise sous vide du Condenseur (Côté Vapeur) :

Le système de mise sous vide se compose d'un éjecteur de démarrage 1x100 % et de deux éjecteurs de maintien 2x100%.

Les éjecteurs évacuent la vapeur côté condenseur pendant le démarrage et extraient les gaz non-

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCÉDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

condensables pendant le fonctionnement des réfrigérants d'air du condenseur.

La vapeur motrice pour les éjecteurs est prise de la ligne de vapeur à resurchauffer et les incondensables extraits sont envoyés à l'atmosphère.

Une vanne de détente régule la pression de la vapeur à l'entrée de l'éjecteur de démarrage et une deuxième vanne de contrôle réduit la pression de vapeur à l'entrée des éjecteurs de service. [2]

2.10. Pompes alimentaires :

Les deux (2x100%) pompes alimentaires HP de type horizontal munies d'extraction pour l'eau alimentaire MP/BP 2x100% sont à plusieurs-étages, et possèdent des filtres à l'aspiration et des vannes de débit minimum. En fonctionnement normal, une pompe est en service. Le deuxième reste en secours. La pompe de secours est mise en marche automatiquement en cas de défaillance de la pompe en service. [2]

2.11. Station de pompage :

Ce système comporte :

- Les tuyaux d'amenée d'eau de mer commune aux trois tranches pour assurer un débit de 150 % du débit global de refroidissement sans dilution
- Un bassin de filtration et de pompage de l'eau de mer
- Trois conduites de transfert d'eau de mer vers le bassin de tranquillisation +50.00 m
- Un bassin de tranquillisation et de pompage au niveau +50.00 m
- Un système d'électro-chloration

La chaleur rejetée par le cycle eau vapeur et par le circuit fermé d'eau de refroidissement est transféré directement à l'eau de mer. Deux pompes d'eau de refroidissement principal (2 x 50%) fournissent de l'eau de mer froide au condenseur et également aux réfrigérants du circuit fermé d'eau de refroidissement.

L'eau réchauffée par le condenseur et les auxiliaires est retournée à la mer via un canal de rejet. [2]

2.12. Unité d'électro-chloration :

Cette installation est prévue pour la production et l'injection d'hypochlorite de sodium dans l'eau de mer afin d'éviter la prolifération de la faune marine dans les tuyauteries et les équipements alimenté par l'eau de mer.

Le procédé est basé sur l'électrolyse partielle de l'eau de mer dans les unités d'électro-

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCÉDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINÉ DE RAS-DJINET

chloration.

L'hypochlorite est injecté :

- En entrée des tuyaux d'amenée d'eau de mer
- A l'aspiration des pompes de transfert

Le système se compose de :

- Trois électrolyseurs 33%
- Trois transformateurs redresseurs de courant 33%
- Quatre pompes d'alimentation d'eau de mer 33%
- Deux réservoirs de stockage de solution d'hypochlorite
- Quatre pompes d'injections de solution d'hypochlorite
- Deux ventilateurs pour la dilution de l'hydrogène gazeux [2]

2.13. Système de nettoyage continu du condenseur :

Le condenseur principal est équipé d'un système de nettoyage à balles en éponge pour réduire l'encrassement biologique des tubes du condenseur. [2]

2.14. Système de refroidissement en circuit fermé :

Un système d'eau de refroidissement en circuit fermé garantit le refroidissement de l'alternateur, du système d'huile de lubrification, et d'autres consommateurs.

Deux pompes de circulation (2 x 100 %) sont fournies avec le système. La chaleur issue du circuit fermé est transférée au système de refroidissement principal dans deux échangeurs eau/eau (2 x 100 %).

La pression est maintenue constante grâce à un réservoir d'expansion et le niveau est régulé par un appoint à ce réservoir. Ce système est équipé d'un filtre à débris installé sur la ligne d'arrivée d'eau de mer à l'échangeur du circuit fermé d'eau de refroidissement. [2]

2.15. Eau déminéralisée :

L'eau déminéralisée est produite par une centrale de production d'eau déminéralisée (2 x 100 %) dimensionnée pour la purge en continue. La centrale de déminéralisation comprend :

- Deux pompes (2 x 100 %) de transfert d'eau dessalée
- Deux échangeurs (2 x 100 %) à résines à lits mélangés,
- Deux réservoirs de stockage d'eau déminéralisée (capacité 2 x 500 m³)
- Quatre (4 x 33 %) pompes d'eau déminéralisée pour l'appoint aux cycles

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

• Quatre (4 x 33 %) pompes d'eau déminéralisée De Nox pour la marche au fioul comprenant moteur, accouplement et carter de protection [2]

2.16. Système de surveillance des émissions de fumée :

Des échantillons de gaz d'échappement sont extraits au niveau de la cheminée de la chaudière de récupération. Ils sont ensuite conditionnés et analysés dans une armoire de mesure. Les émissions de NO_x, SO₂, CO, CO₂, O₂ et les poussières sont surveillées et enregistrées. L'armoire de mesure est fournie sur un skid et est installée dans un conteneur climatisé. [2]

2.17. Système d'alimentation en gaz :

Le gaz est amené en limite de site par la tuyauterie de gaz du client, commune aux trois unités de la centrale. Le gaz combustible est ensuite purifié de toute humidité et poussière dans le poste de traitement. Par la suite en fonction de la pression du gaz, celui-ci est soit détendu dans la station de réduction de pression soit comprimé par les compresseurs de gaz. La pression du gaz combustible est ajustée à la pression requise par le système de combustion de la turbine à gaz.

Un filtre fin et un système de préchauffage de combustible sont installés en amont de chaque turbine à gaz. La turbine à gaz est ensuite alimentée en gaz.

De plus, un analyseur de gaz naturel et un débitmètre sont également installés en amont de chaque turbine à gaz.

- Poste de filtration/séparation
- Chauffeur Point de rosée
- Chromatographe
- Poste de compression 4 x 33 %
- Poste de détente : 1 détente normale + 1 détente de secours
- Filtre fin
- Réchauffeur de rendement [2]

2.18. Système d'alimentation en gasoil :

Le poste de dépotage du gasoil permet le remplissage des réservoirs de stockage à partir des camions citernes. Ce poste de dépotage est équipé d'un système de comptage du débit transféré depuis les camions vers le réservoir. Depuis les réservoirs de stockage, les pompes de transfert (2x100 % par unité) assurent l'alimentation de la turbine à gaz. Un circuit secondaire permet

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

également le remplissage du réservoir journalier du groupe électrogène et des chaudières du système de dessalement.

Systeme des eaux usées :

Les eaux usées produites par la centrale électrique sont classées selon leurs caractéristiques en cinq catégories :

- Eaux usées propres (eaux de purge provenant du cycle eau vapeur).
- Eaux huileuses.
- Effluents chimiques.
- Eaux usées sanitaires.
- Eaux usées provenant du lavage compresseur.

Ces eaux usées sont traitées de manière appropriée avant de quitter la centrale. Les eaux usées de procédé sont traitées de manière à se conformer aux critères des effluents (par ex. par neutralisation). L'eau huileuse traverse un séparateur d'huile /solides. Les eaux usées sanitaires sont conduites dans une fosse septique. [2]

2.19. Station d'air comprimé :

L'air comprimé requis par la centrale est produit dans une station d'air comprimé centralisée, composée de 2 compresseurs 2 x100% (1 en fonctionnement normal et 1 en de secours), à partir de laquelle l'air est distribué aux différents utilisateurs. La station d'air comprimé fournit :

- l'air instrument (filtré, séché, et déshuilé)
- l'air de service (filtré) [2]

2.20. Equipements de protection contre les incendies :

Les mesures de protection passives contre les incendies, les systèmes anti-incendie (les mesures actives telles que les extincteurs), et les protections contre les explosions sont fournies suivant la législation locale en vigueur et les obligations contractuelles pour fournir une protection adéquate de la centrale.

Les éléments principaux de la protection contre les incendies sont la détection incendie et les systèmes d'alarmes (générant des alarmes), le système de détection du gaz (générant des alarmes), les systèmes d'extinction automatiques à gaz (CO₂), le système manuel de lutte anti-incendie (lance à eau) et le système d'approvisionnement en eau pour la lutte anti-incendie indépendant pour l'usine. [2]

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2.21. Transformateurs éleveurs de tension de l'alternateur

Le transformateur principal de l'alternateur est utilisé pour élever la tension générée (20KV) jusqu'au niveau de tension du réseau du client (400KV).

Le transformateur est installé en extérieur à proximité immédiate du transformateur de soutirage. Le transformateur est équipé d'un système de refroidissement à l'huile et à l'air forcé. Le circuit magnétique du transformateur est constitué de tôles en acier laminé à froid et à grains orientés. Les enroulements sont constitués de conducteurs de cuivre à haute conductivité et sont conçus pour la tension de tenue aux chocs de foudre et la résistance aux courts circuits adéquate. [2]

2.22. Trois Transformateurs auxiliaires d'unité (soutirage) :

Caractéristiques principales :

- Transformateur de puissance immergé dans l'huile, triphasé, à deux enroulements
- Refroidissement ONAN / ONAF/ OFAF
- Huile de transformateur sans PCB [2]

2.23. Deux équipements de démarrage statique (CSF) :

Les principaux composants de l'équipement de démarrage statique « CSF » sont les suivants :

- Disjoncteur(s) moyenne tension (DMT)
- Convertisseur Statique de Fréquence (CSF) avec :
 - unité de commande / surveillance
 - bobine de réactance
 - excitation de démarrage
 - convertisseurs à thyristor
- Tableau de sélection de démarrage (TSD)

En fonctionnement normal, la puissance utilisée pour démarrer la turbine à gaz est fournie au convertisseur Statique de Fréquence (CSF) par le réseau HT via le transformateur de démarrage TG en soutirage des barres alternateur 20KV, et le disjoncteur moyenne tension (DMT).

En démarrage « Black Start » la puissance utilisée pour la turbine à gaz est fournie par le groupe électrogène de « Black Start » via le transformateur auxiliaire de démarrage TG connecté au tableau MT de distribution Black Start.

La référence de vitesse est donnée par un signal analogique. Parallèlement à la fonction principale, le convertisseur statique de fréquence peut être utilisé dans les modes de

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

fonctionnement suivants :

- Mode de programme de lavage (utilisé pour le lavage « hors ligne » du compresseur)
- Mode de purge (utilisé pour la purge de la chaudière)
- Mode de virage (pour le refroidissement rapide d'une turbine à gaz)
- Mode puissance réduite (gradient de vitesse et puissance de sortie de TG réduits pour des raisons de protection)

Lorsqu'un déclenchement est provoqué par la fonction de protection de l'équipement de démarrage statique pendant le démarrage de la turbine à gaz ou au cours d'un autre mode de fonctionnement, le contrôleur du convertisseur statique de fréquence doit déclencher le disjoncteur moyenne tension. De plus, le disjoncteur moyen tension peut être déclenché par le système de protection de l'alternateur par l'intermédiaire du convertisseur statique de fréquence. Avant de déclencher le disjoncteur moyenne tension, le convertisseur statique de fréquence réduit l'intensité du courant puis bloque les impulsions d'allumage du convertisseur.

Les CSF sont entièrement commandés à distance par le contrôleur de la TG raccordée. Le contrôle, la régulation et la protection du CSF et de l'excitation de démarrage sont effectués par le contrôleur du CSF.

Il est possible de commuter sur le deuxième CSF pour une utilisation redondante.

Le sectionneur de segment ne peut être fermé manuellement qu'en cas de panne du DMT ou d'un CSF. Lorsque le sectionneur de segment est fermé, il est possible de démarrer une TG raccordée avec l'autre équipement de CSF.

Lors du fonctionnement de secours, seul un sectionneur d'alimentation des tableaux de sélection de démarrage raccordés peut être fermé. Une fonction de verrouillage à l'intérieur des CSF est donc nécessaire pour empêcher d'éventuels court-circuits.

Le contrôleur du CSF contrôle le sectionneur d'alimentation tandis que le sectionneur de segment et les sectionneurs de maintenance sont commandés manuellement.

Le contrôleur du CSF supervise tous les sectionneurs du tableau de sélection de démarrage.

Des contacts de retour des positions du sectionneur permettent la surveillance depuis la salle de contrôle de la centrale électrique. [2]

2.24. Trois systèmes d'excitation statique :

Caractéristiques principales :

- Réponse de l'alternateur rapide grâce aux caractéristiques d'excitation statique
- Commande programmable à grande vitesse

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

- La commande numérique garantit le temps de réponse et de commande le plus rapide
- Régulation de tension automatique à deux canaux
- Haut rendement [2]

2.25. Alimentation secourue Black Start

Description générale de l'équipement :

Le système de secours sera composé d'un ensemble de plusieurs groupes électrogènes diesel de « Black Start ». Les groupes seront connectés sur un tableau

MT « distribution secours et black Start » 6 kV situé à proximité des groupes. Ce tableau comporte une liaison avec le tableau des auxiliaires généraux 6 kV qui assure la distribution vers les tableaux de tranches 6 KV au travers de l'inter liaisons vers ces tableaux. Ceci permet l'alimentation en énergie du transformateur de démarrage de la TG concernée et des auxiliaires MT et BT devant être en service lors du démarrage de celle-ci.

Le système CC/UPS alimentée par un système de batterie en combinaison avec le groupe électrogène de Secours fournit une source d'alimentation d'urgence sûre, pour un arrêt de la tranche en cas de perte du courant alternatif. Le générateur diesel de secours est démarré automatiquement dans ce cas et alimente les consommateurs indispensables pour un arrêt sécurisé de la tranche. [2]

2.26. Système numérique de contrôle commande de la centrale (SNCC) :

Le SNCC est structuré hiérarchiquement avec un haut degré d'automatisation.

Le système de contrôle permet de démarrer et d'arrêter les composants principaux depuis la salle de commande centrale ; il fournit l'annonce des alarmes, les boucles de régulation fermées et ouvertes, les inter-verrouillages, et la protection de chaque équipement.

Certains équipements indépendants peuvent être fournis avec des unités de contrôle local. L'indication de statut pour la supervision déportée sera disponible dans le module de contrôle pour l'équipement et/ou le système dédié. [2]

2.27. HVAC :

Le chauffage (si nécessaire) est fourni pour :

- _ Toutes les salles occupées par du personnel
- _ Les zones et modules où une température minimale est nécessaire pour la protection anti-gel

Une ventilation forcée est fournie pour :

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCÉDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINÉ DE RAS-DJINET

- _ Le bâtiment turbine
- _ Les modules électriques et mécaniques là où c'est nécessaire
- _ Le poste de traitement d'eau
- _ L'atelier
- L'électro chloration
- _ D'autre équipement en fonction des besoins spécifiques

La climatisation :

Est fournie dans les zones destinées au personnel et/ou pour la protection de systèmes électriques sensibles.

Des unités séparées de climatisation sont prévues pour :

- _ La salle de commande centralisée
- _ Les bureaux. [2]

2.28. Production d'eau dessalée

Le poste de traitement d'eau produit une eau dessalée. Ce poste se compose d'une unité de dessalement de type flash multi étagé (MSF pour Multi Stage Flash). L'eau produite est recueillie dans les réservoirs de stockage d'eau dessalée.

L'installation comprend 2 unités de dessalement communes aux trois tranches de la centrale fonctionnant selon le principe de la distillation par détentes successives et produisant 960 m³/jour d'eau dessalée chacune.

L'eau dessalée produite sera stockée dans deux réservoirs à la pression atmosphériques d'une capacité de 17500 m³ chacun. [2]

2.29. Station de production d'hydrogène :

L'installation est commune aux trois unités et comprend :

- un électrolyseur
- un groupe de lavage et de refroidissement
- un gazomètre
- deux compresseurs avec sécheurs
- les tuyauteries, pompes et accessoires
- les équipements électriques
- les équipements de contrôle commande

L'électrolyseur est équipé d'un bloc de cellules divisé en deux chambres pour séparer l'H₂

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

produit à la cathode de l'O₂ se dégageant à l'anode.

De séparateurs de gaz l'un pour l'H₂ et l'autre pour l'O₂ pour la séparation du gaz de l'électrolyte.

Un système de refroidissement est prévu afin de récupérer la vapeur saturée contenant de la potasse caustique, entraînée avec les gaz, les condensats engendrés retournent vers l'électrolyseur. Un système de lavage est nécessaire pour éliminer les traces de potasse contenues dans le gaz. Un gazomètre sert au stockage de l'hydrogène et sert de tampon entre l'électrolyseur et l'installation de compression. [2]

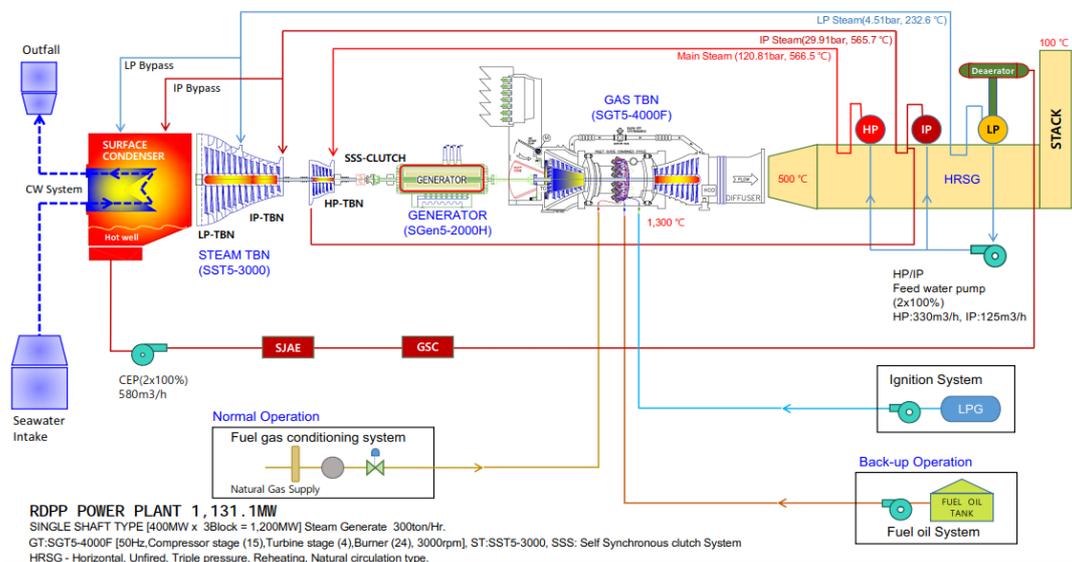


Figure 2-13 : Fonctionnement de cycle combiné

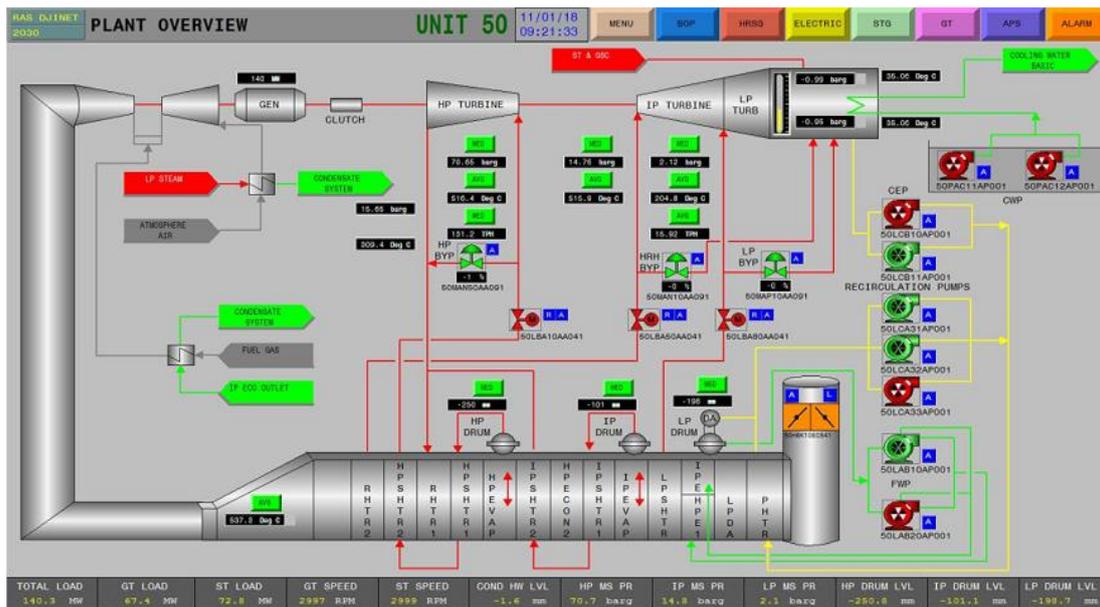


Figure 2-12 : Fonctionnement de cycle combiné RDPP

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

3. Principe de fonctionnement de la centrale de Cap-Djinet :

Au premier cycle (cycle turbine à gaz). L'air extérieur est filtré et envoyé vers le Compresseur, il subit une compression avant d'être envoyé dans la chambre de combustion, où est injecté le combustible, le mélange s'enflamme dans la chambre de combustion, produisant des gaz à haute pression qui font tourner l'arbre de la turbine [10].

La turbine à gaz fonctionne en utilisant le gaz naturel comme combustible principal et le gas-oil comme combustible de secours. De ce fait, la centrale est dotée de deux systèmes de traitement de combustible :

- le système de gaz naturel assure les fonctions de filtration, séparation, comptage, réchauffage, détente (ou compression) du gaz naturel admis aux turbines à gaz et unités de dessalement.

- le système de gas-oil assure les fonctions de dépotage, de comptage, de stockage, de traitement et de transfert du gas-oil aux utilitaires de la centrales (turbines à gaz, unités de dessalement, groupes diesel, moto pompe incendie).

Au deuxième cycle (cycle turbine à vapeur). Les gaz de combustion qui sortent de la turbine à gaz sont envoyés dans la chaudière de récupération avant d'être rejetés dans l'atmosphère par la cheminée.

L'eau mise sous pression est introduite dans la chaudière de récupération au niveau de l'économiseur inséré à la fin du circuit des gaz d'échappement (en sortie chaudière) avant d'aboutir au ballon BP.

Les différents niveaux de pression de la chaudière fonctionnent selon le même principe, à savoir : l'eau extraite du ballon BP est mise au niveau de pression requise par la pompe

alimentaire et circule par la suite à travers les économiseurs où elle est préchauffée avant d'atteindre le ballon du même niveau de pression, de là l'eau est dirigée vers l'évaporateur où elle se transforme en vapeur saturée grâce au transfert de chaleur des gaz de combustion. La vapeur saturée ainsi formée est envoyée vers le ballon pour assurer la séparation des particules d'eau (séparation eau/vapeur). La vapeur sèche extraite du ballon est surchauffée au niveau de la chaudière avant d'être admise au corps de la turbine à vapeur de même niveau de pression.

La turbine à vapeur est entraînée par la vapeur qui se détend au niveau de ses différents corps HP, PI et BP.

La vapeur sortant du corps basse pression de la turbine à vapeur est admise dans le

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

condenseur, premier élément du poste d'eau. Le condensat est alors conditionné au point de vue teneur en oxygène, pression et température avant de repartir vers la chaudière de récupération. Pour cela le poste d'eau dispose des équipements principaux suivants :

- le condenseur à surface : Sa fonction principale est de condenser la vapeur à l'échappement du corps basse pression de la turbine à vapeur au contact des surfaces extérieures des tubes froids véhiculant l'eau de mer de circulation. Le condenseur dispose d'un système de nettoyage (en ligne et hors ligne) qui permet de lutter contre les phénomènes d'encrassement et d'entartrage.

- pompes à vide, éjecteurs : qui permettent de créer le vide dans le condenseur lors du démarrage et son maintien pendant le fonctionnement (l'air qui s'introduit dans le circuit vapeur s'accumule dans le condenseur ce qui entraîne la baisse du vide).

- pompes d'extraction : elles assurent l'extraction des condensats du puits chaud du condenseur pour les refouler vers l'économiseur BP de la chaudière.

- bêche alimentaire : la bêche est un réservoir dont la fonction est de maintenir une réserve

d'eau suffisante pour équilibrer le débit à l'aspiration des pompes et de recevoir les appoints nécessaires pour compenser les pertes du circuit eau/vapeur. La bêche alimentaire peut ne pas exister en tant qu'équipement indépendant dans le cas où le réservoir de stockage est intégré au condenseur.

- dégazeur : la fonction de dégazage peut être effectuée au niveau de la bêche alimentaire (procédé conventionnel, et on parle alors d'un dégazeur ou d'une bêche avec dégazage), ou bien intégrée au condenseur (procédé plus récent utilisé dans les cycles combinés). Elle permet :

- D'amener l'eau à une température acceptable à l'entrée de la chaudière.

- D'éliminer naturellement les gaz dissous.

- pompes alimentaires : elles permettent de conditionner la pression de l'eau alimentaire aux

conditions d'admission des différents niveaux de pression de la chaudière de récupération.

Le condenseur est lui-même refroidi par de l'eau de mer. Le système de refroidissement par eau de mer de la centrale comprend principalement :

- un circuit ouvert ou circuit d'eau de mer comprenant :

1. Une prise d'eau de mer permettant de capter l'eau dans une zone calme et d'assurer un écoulement laminaire d'une eau propre et à basse température.

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

2. Une station de tamisage et de pompage qui assure la filtration de l'eau de mer et sa circulation vers les différents utilitaires de la centrale (condenseurs à eau de mer, échangeurs de chaleur, unités de dessalement...).

3. Des conduites de circulation d'eau de mer qui assurent l'amenée de l'eau de refroidissement jusqu'aux utilitaires de la centrale, et de là son évacuation vers le canal de rejet.

4. Un canal de rejet dans lequel se déversent les eaux de refroidissement des utilitaires de la centrale en vue d'être rejetées à la mer.

- un circuit fermé d'eau déminéralisée qui assure l'alimentation en eau de refroidissement

tous les échangeurs de chaleurs de la centrale (échangeurs de refroidissement de l'huile des turbines, de l'air de l'alternateur, ext)

Le ou les alternateurs sont entraînés par la turbine à gaz et la turbine à vapeur et génèrent ainsi du courant électrique qui est acheminé, à travers les jeux de barres sous gaines, vers un transformateur principal. Le transformateur élève la tension du courant électrique au niveau requis par le réseau.

L'électricité est ensuite envoyée via des câbles haute tension vers un poste d'évacuation d'électricité raccordé au réseau de distribution d'électricité.

Une partie de l'électricité produite est soutirée par des transformateurs dédiés à cet effet afin d'assurer l'alimentation électriques des différents systèmes et installations de la centrale.

La centrale dispose de plusieurs systèmes auxiliaires qui ne rentrent pas directement en ligne de compte dans la production d'énergie, mais qui sont indispensables à son bon fonctionnement, dont notamment :

- le système de détection et protection incendie qui assure :
 1. La prévention contre les risques d'une explosion ou d'un incendie.
 2. La détection immédiate des incendies.
 3. La protection du personnel d'exploitation et des installations et ouvrages de la centrale.
 4. L'enclenchement de procédures d'arrêt en toute sécurité des installations.

➤ le système d'air comprimé pour répondre aux besoins en air de procédé et en air service de la centrale.

➤ les systèmes d'eau pour fournir et conditionner l'eau pour répondre aux besoins de la centrale en différentes qualités d'eau, et pour traiter les effluents avant de les évacuer vers les

CHAPITRE 2 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS ET DES PROCEDES APPLIQUES POUR LA CENTRALE EN CYCLE COMBINE DE RAS-DJINET

réseaux de drainage.

➤ les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA) qui doivent assurer d'une manière continue et fiable les conditions minimales acceptables prescrites de la qualité de l'air, de la température et de l'humidité, nécessaires au confort et à la sécurité du personnel, au bon fonctionnement des équipements de la centrale ainsi que la continuité de l'activité de production d'énergie; Les moyens de manutention prévus pour faciliter le levage des équipements et pièces lourdes lors des opérations d'entretien. Le fonctionnement de chaque système de la centrale à cycle simple sera décrit en détail dans les Guides Techniques Spécifiques de chacun de ces équipements. [2]

4. Les avantages et les inconvénients des centrales à cycle combiné :

Avantage :

- Les centrales sont rapides à construire
- Cette technologie offre une grande flexibilité d'utilisation qui permet de répondre rapidement et précisément à la demande.
- La thermique permet de construire des centrales de grande puissance.
- La production ne dépend pas de conditions extérieures autre que l'approvisionnement en combustible (l'énergie éolienne, par exemple ne fonctionne pas sans vent).
- Cout de construction faible.

Inconvénients :

- Cette technologie engendre de émissions de produits polluants et des gaz à effet de serre.
- Les couts de compensation polluants sont élevés.
- La thermique utilise souvent des source fossiles (charbon, fioul, gaz) dont les réserves sont physiquement limitées par la géologie terrestre et non renouvelables à courte et moyen terme.
- Energie non renouvelable. [2]

***CHAPITRE 03 : Les performances de
cycle combiné***

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

1 Introduction :

Le cycle de Brayton théorique est le cycle idéal correspondant à la turbine à gaz élémentaire.

Il est principalement utilisé pour la production d'électricité.

Il existe deux types de cycles de Brayton selon qu'il soit ouvert ou refermé sur l'atmosphère.

C'est la première variante qui retiendra notre attention puisque c'est celle qui est utilisée dans les centrales électriques (Turbines Gaz -Vapeurs).

2 Etude théorique d'une turbine à gaz :

2.1 Etude des cycles thermodynamiques d'une turbine à gaz :

2.1.1 Cycle idéal de Brayton :

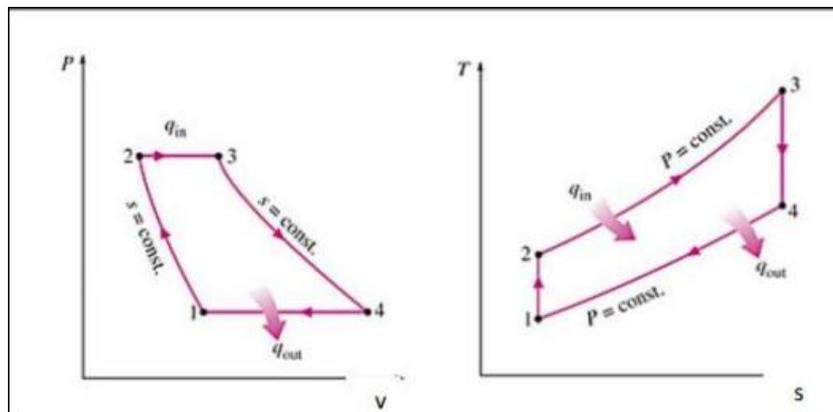


Figure 3-1 : Cycle thermodynamique théorique d'une turbine à gaz.

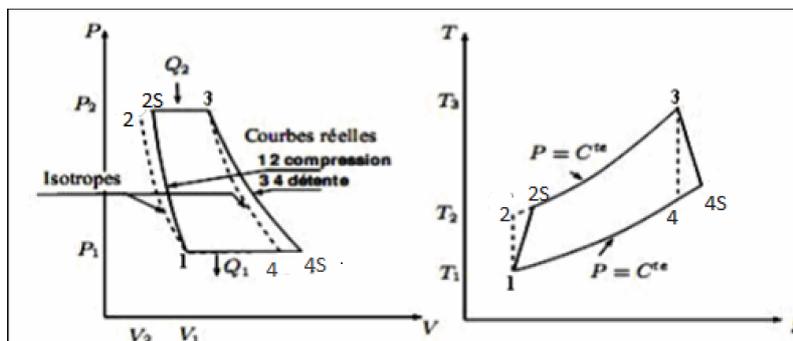
1 à 2 : compression isentropique de l'air (compresseur).

2 à 3 : combustion isobare (échangeur de chaleur).

3 à 4 : détente isentropique (turbine).

4 à 1 : refroidissement isobarique (échangeur de chaleur). QUI s'effectue dans l'atmosphère et constitue l'évolution fictive assurant la fermeture du cycle. [3]

2.1.2 Cycle réel :



CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

Figure 3-2 : Cycle réel d'une turbine à gaz.

2.1.3 Description du cycle :

Le cycle réel se différencie du cycle idéal de la manière suivante :

La compression est adiabatique, de rendement isentropique η_c : en raison des travaux de frottement, la température réelle est plus élevée que la température théorique, et la transformation de compression n'est plus isentropique 1-2' mais 1-2, tel que $T_2 > T_2'$. La détente dans la turbine est adiabatique, de rendement isentropique η_t : en raison des travaux de frottement, la transformation de la détente ne s'effectue pas suivant un arc d'isentrope, mais suivant un arc tel que $T_4 > T_4'$.

2.2 Etude de cycle de Brayton :

La chaleur dégagée par l'air pendant son refroidissement avant son entrée dans le compresseur peut être calculée comme suit :

$$Q_{ch} = c_{p\text{air}} \times \Delta T \quad [4] \quad (3.1)$$

Compresseur (C) :

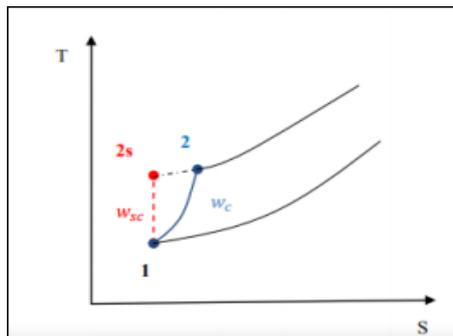


Figure 3-3 : Représentation de la notion de travail d'un compresseur.

Coefficient poly tropique de l'air γ_{air} est :

$$\gamma_{\text{air}} = \frac{c_{p\text{air}}}{c_{p\text{air}} - r_{\text{air}}} \quad (3.2)$$

Taux de compression :

$$\tau = \frac{p_2}{p_1} \quad (3.3)$$

2.3 Rendement théorique d'une turbine a gaz :

$$\eta_{\text{TH}} = \frac{W_U}{Q_{\text{in}}} \quad (3.4)$$

2.4 Travail utile de turbine a gaz :

$$W_U = W_T - W_C \quad (3.5)$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

W_U : Travail utile

W_T : Travail produit par la turbine

w_C : Travail absorbe par le compresseur

2.5 CHALEUR FOURNIE :

Premier principe système ouvert :

$$W+Q=\Delta H \quad (m=1\text{kg}) \quad (3.6)$$

Transformation isentropique $Q=0$ d'où :

- **Travail de la turbine à gaz :**

$$|W_T|=H_3 - H_4 \quad (3.7)$$

- **Travail de compresseur :**

$$|W_C|=H_2 - H_1 \quad (3.8)$$

- **Travail utile :**

$$W_U=|(H_3 - H_4) + (H_2 - H_1)| \quad (3.9)$$

$$Q_{2-3}=H_3-H_2 \quad (3.10)$$

2.6 Rendement théorique de la turbine à gaz :

D'après la relation (3.4) :

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{[(H_3 - H_4) + (H_2 - H_1)]}{[(H_3 - H_2)]} \\ \eta_{th} &= \frac{[(H_3 - H_4) + (H_2 - H_1)]}{[(H_3 - H_2)]} \\ \eta_{th} &= \frac{[(H_3 - H_2) + (H_4 - H_1)]}{[(H_3 - H_2)]} \\ \eta_{th} &= 1 - \left[\frac{(H_4 - H_1)}{(H_3 - H_2)} \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Nous avons : pour un gaz parfait

$$H=u+p.dv$$

$$dh=du+p.dv+v.dp$$

$$dh=dq +dw+p.dv+v.dp$$

$$dh=dq -p.dv+p.dv+v.dp$$

$$dh=dq+v.dp$$

(p constant, p=0)

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$dh = dq = mc_p \cdot dt = c_p dt \quad (m=1\text{kg})$$

$$\Delta H = C_p \cdot \Delta T \quad (3.12)$$

Donc :

$$\eta_{TH} = 1 - \left[\frac{(H4-H1)}{(H3-H2)} \right]$$

$$\eta_{TH} = 1 - \frac{[C_p(T4-T1)]}{[C_p(T3-T2)]}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{[T1 \left(\frac{T4}{T3} - T1 \right)]}{[T2(T3/T2 - T2)]} \quad (3.13)$$

2.7 Cycle réel :

1-2(ISENTROPIQUE)

$$\frac{T2}{T1} = \frac{P2^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}}{P1} \quad (3.14)$$

3-4(ISENTROPIQUE)

$$\frac{T3}{T4} = \frac{P3^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}}{P4} \quad (3.15)$$

$$p1=p4 \quad \text{et} \quad p2=p3$$

$$\frac{T2}{T1} = \frac{T3}{T4} \quad (3.16)$$

$$\eta_{TH} = 1 - \frac{1}{\left[\left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]}$$

$$\eta_{th} = 1 + \left[\frac{1}{\tau^{\frac{1}{\gamma}}} \right] \quad (3.17)$$

- Rendement isentropique du compresseur :

$$\eta_C = \left[\frac{H2-H1}{H2'-H1} \right] \quad (3.18)$$

- Rendement de la turbine :

$$\eta_T = \left[\frac{H3-H4'}{H3-H4} \right] \quad (3.19)$$

- Rendement du cycle réel :

$$WU = W_T - W_C$$

$$WU = (H3 - H4') - (H2' - H1) \quad (3.20)$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$(H2' - H1) = \left(\frac{H2-H1}{\eta_c} \right) = \frac{[c_p(T2-T1)]}{\eta_c} \quad (3.21)$$

$$(H3 - H4') = \eta_T \cdot (H3 - H4) = \eta_T \cdot c_p \cdot (T3 - T4) \quad (3.22)$$

$$W_u = [\eta_T \cdot c_p \cdot (T3 - T4) - \left(\frac{H2-H1}{\eta_c} \right)] \quad (3.23)$$

$$\frac{W_u}{C_p} = [\eta_T \cdot (T3 - T4) - \left(\frac{T2-T1}{\eta_c} \right)]$$

$$\frac{W_u}{C_p} = [\eta_T \cdot T3 \cdot (1 - T4/T3) - \frac{T2}{C} (1 - \frac{T1}{T2})]$$

$$\frac{W_u}{C_p} = (\eta_T \cdot T3 \cdot \eta_{TH}) \cdot \left(\frac{T2}{\eta_c} \right) (\eta_T)$$

$$W_u = C_p \cdot [(\eta \cdot T3) - \left(\frac{T2}{\eta_c} \right)] \cdot \eta_{TH} \quad (3.24)$$

$$Q2'3 = C_p \cdot (T3 - T2') \quad (3.25)$$

On a :

- Rendement réel de compresseur :

$$\eta_c = \frac{(T2-T1)}{(T2'-T1)} \quad (3.26)$$

$$T2' = [T1 \cdot (1 + \frac{(\frac{T2}{T1}-1)}{\eta_c})] \quad (3.27)$$

Remplaçons dans Q2'3 :

$$Q2'3 = C_p \cdot T3 \cdot [(1 - \frac{T1}{T3}) \cdot (1 + (\frac{\gamma-1}{\eta_c} \cdot \frac{W}{\gamma}))] \quad (3.28)$$

D'où le rendement :

$$\eta_{reel} = \frac{W_u}{Q2'3} \quad (3.29)$$

$$\eta_{reel} = \frac{[(T3 \cdot \eta_T) - \left(\frac{T2}{\eta_c} \right)] \cdot \eta_{TH}}{[T3 \cdot \left(\frac{T1}{T3} \right) \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{\eta_c} \cdot \frac{W}{\gamma} \right)]} \quad (3.30)$$

- Rendement réel de la turbine :

$$\eta_t = \frac{T4'-T}{T4-T3} \quad (3.31)$$

- Travail réel de compresseur :

$$W_c = c_p(T2'-T1) \quad (3.32)$$

- Travail réel de la turbine :

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$w_T = c_p (T_3 - T_{4t}) \quad (3.33)$$

- Quantité de chaleur (Q_{in}) :

$$Q_{2t,3} = c_p (T_3 - T_{2t}) \quad (3.34)$$

2.7.1 Calcul des paramètres de turbine à gaz :

Les paramètres nécessaires au calcul de la turbine à gaz sont : [5]

| | |
|--|-------------------------------|
| ✓ La pression ambiante après le filtre | P1 = 1.013 bar |
| ✓ La température ambiante | T1 = 14 C° |
| ✓ La température de sortie de compresseur | T2 = 42 C° |
| ✓ Pression de sortie de compresseur | P2 = 19.1 bar |
| ✓ Température de sortie de la turbine | T4 = 584 C° |
| ✓ Température de sortie de chambre de combustion | T3 = 1079 C° |
| ✓ Rendement isentropique du compresseur | 0.88 |
| ✓ Rendement isentropique de la turbine | 0.85 |
| ✓ Capacité calorifique | C _p = 1005 J/Kg. K |

D'après les relations (3.26) et (3.27) on trouve :

$$T'_2 = 287 + \left(\frac{702 - 287}{0.80} \right)$$

$$T'_2 = 805.75K$$

$$T'_4 = 0.85 \cdot (857 - 1353) + 1353$$

$$T'_4 = 931.4K$$

2.8 Calculs du rendement théorique :

D'après les relations (3.3) et (3.16) on trouve

$$\tau = \frac{19.1}{1.013} = 18.85 \text{ bar}$$

$$\eta_{TH} = 1 - \left(\frac{287}{702} \right) = 0.59$$

$$\eta_{TH} = 59\%$$

D'après (3.32) et (3.33) et (3.34) :

$$W_C = 1005 \cdot (805.75 - 287) = 521.343 \text{ kj/kg.k}$$

$$w_T = 1005 \cdot (1353 - 931.4) = 423.708 \text{ kj/kg.k}$$

$$Q_{2t,3} = 1005 \cdot (1353 - 805.75) = 549.986 \text{ kj}$$

$$w_U = w_T - w_C = 423.702 - 549.986$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$w_U = 97.635 \text{ kJ/kg.k}$$

Donc on remplace dans la relation (3.29) et on trouve le rendement de turbine à gaz comme suit : $\eta_{TG} = 29\%$

Etude de la vapeur d'eau :

2.9 Enthalpie de vapeur d'eau :

On appelle enthalpie de vapeur a la température t correspondante a la pression constante p la quantité totale de chaleur qu'il faut fournir à l'unités de masse (1kg) de liquide pris à la température $0c^\circ$, pour amener à l'état de vapeur l'enthalpie apparait donc comme l'énergie totale reçue par 1kg de vapeur au cours de sa production. On peut calculer l'enthalpie par le diagramme de Mollier et par l'interpolation linéaire. [1]

3 Diagramme de Mollier :

But : Le diagramme de Mollier permet l'étude des transformations thermodynamiques des vapeurs ; exemple :

- ✓ Courbes : Courbe de saturation (sèche) AB qui d'élimine le diagramme en deux zones :
Au-dessus : vapeur surchauffée au-dessous vapeur humide
- ✓ Courbes isobares MP ;
- ✓ Courbes isothermes MN, les isothermes ne se situent que dans la zone des surchauffes pour trouver la température de la vapeur [1]

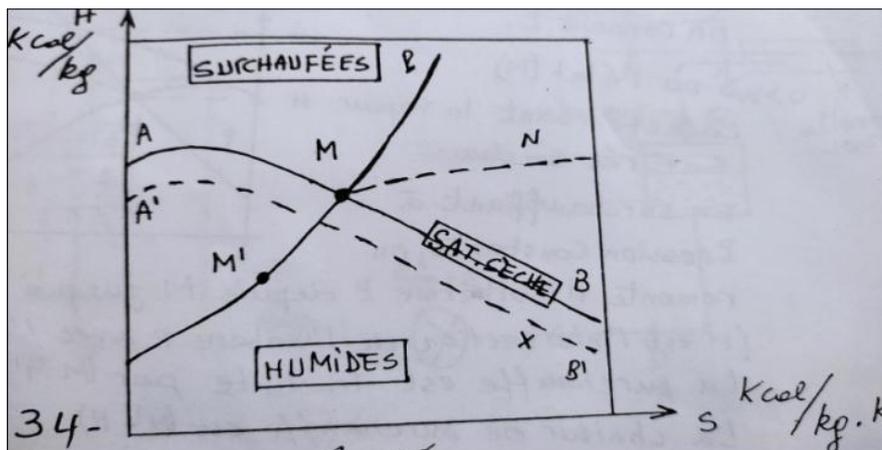


Figure (3-4) : exemple de diagramme de Mollier

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

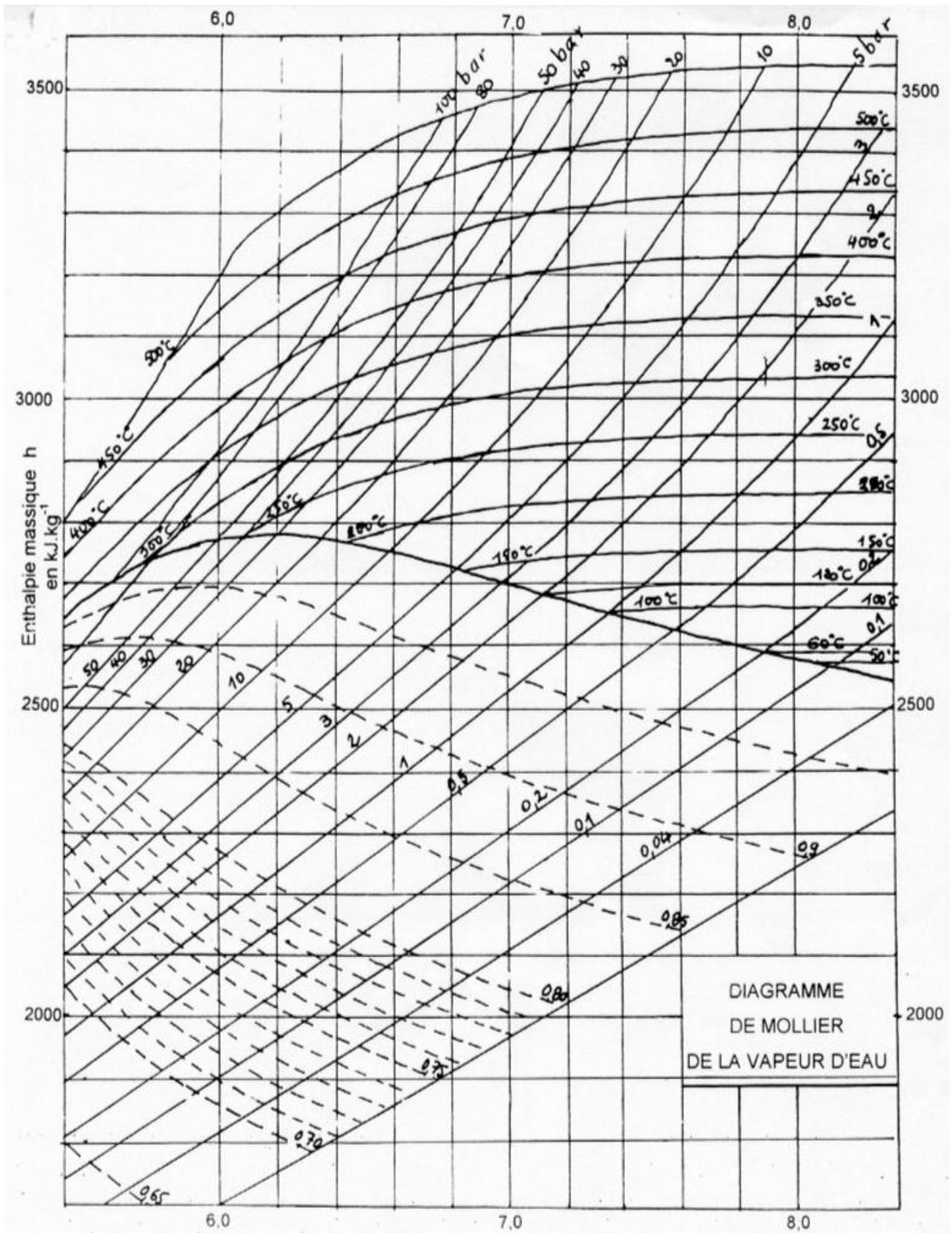


Figure (3-5) : diagramme de Mollier [6]

4 Cycle thermodynamique d'une turbine à vapeur ST :

4.1 **Le cycle Rankine idéal Cycle idéal correspondant à une centrale thermique élémentaire à vapeur d'eau :**

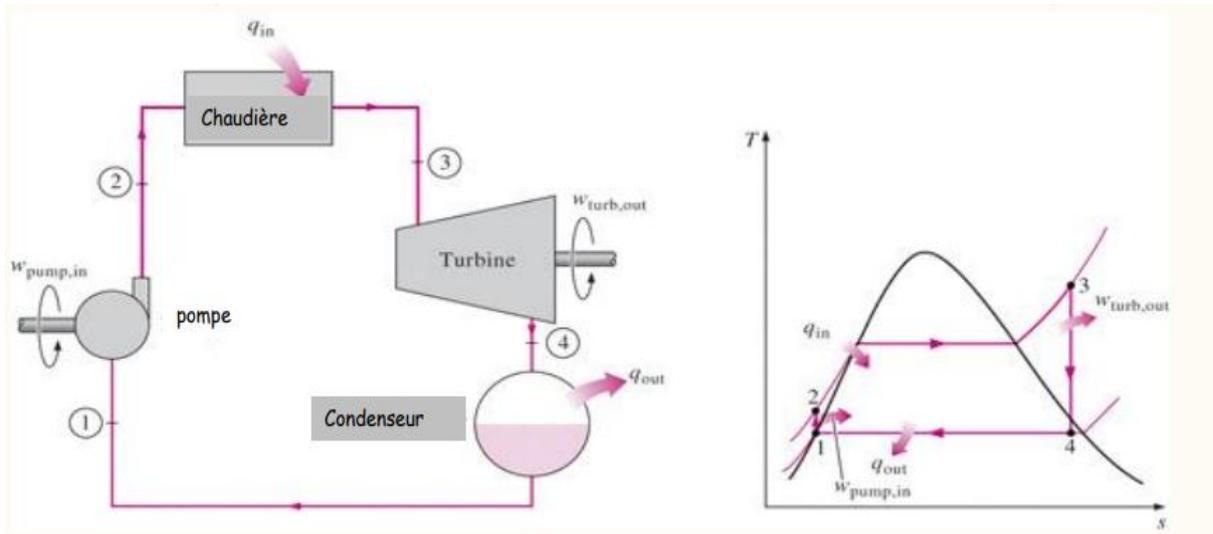


Figure (3-6) : Cycle idéal correspondant à une centrale thermique élémentaire à vapeur d'eau [7]

1-2 Compression isentropique dans la pompe :

$$W_p = (H_2 - H_1) \text{ ou encore: } W_p = V_1(P_2 - P_1) \quad (3.35)$$

2-3 Apport de chaleur à pression constante dans la chaudière :

$$Q_{IN} = (H_3 - H_2) \quad (3.36)$$

3-4 Détente isentropique dans la turbine :

$$W_T = (H_3 - H_4) \quad (3.37)$$

4-1 Évacuation de la chaleur à pression constante dans le condenseur : [7]

$$Q_{OUT} = (H_4 - H_1) \quad (3.38)$$

$$\eta_{TH} = \frac{W_{NET}}{Q_{IN}} = \frac{W_T - W_p}{Q_{IN}} \quad (3.39)$$

Cycle de resurchauffe :

Puisqu'on est limité par les propriétés mécaniques des matériaux on utilise une on modifie le cycle de turbine à deux étages pour détendre la vapeur d'eau Rankine "Cycle de Resurchauffe".

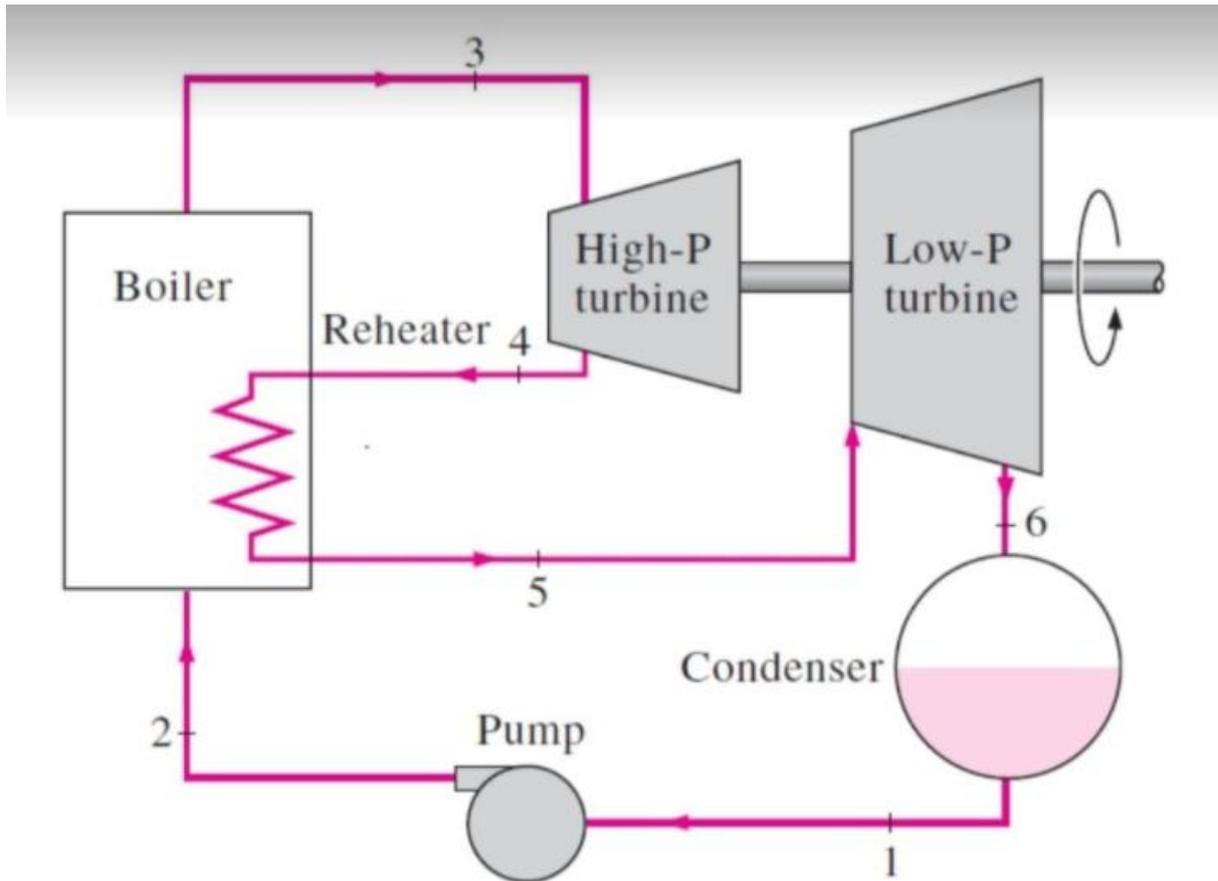


Figure (3-7) : Cycle Hirn sans soutirage et avec resurchauffe [7]

$$Q_{IN} = Q_{primaire} + Q_{ressurchauffe} = (H_3 - H_2) + (H_5 - H_4) \quad (3.40)$$

$$W_T = W_{THP} + W_{TBP} \quad (3.41) \quad [7]$$

4.2 Cycle de Hirn (à vapeur surchauffée) :

Le cycle de Rankine présente les inconvénients suivant :

- ❖ Le titre de la vapeur est faible.
- ❖ Le rendement est relativement faible.

Le cycle de Hirn permet de remédier à ces problèmes. Les centrales thermiques modernes fonctionnent selon le principe du cycle de Hirn. Dans ce type d'installation les chaudières sont équipées de surchauffeurs.

La surchauffe de la vapeur augmente le rendement du cycle de Rankine. Cela découle du fait que la température moyenne lors du transfert de chaleur à la vapeur d'eau augmente [7]

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

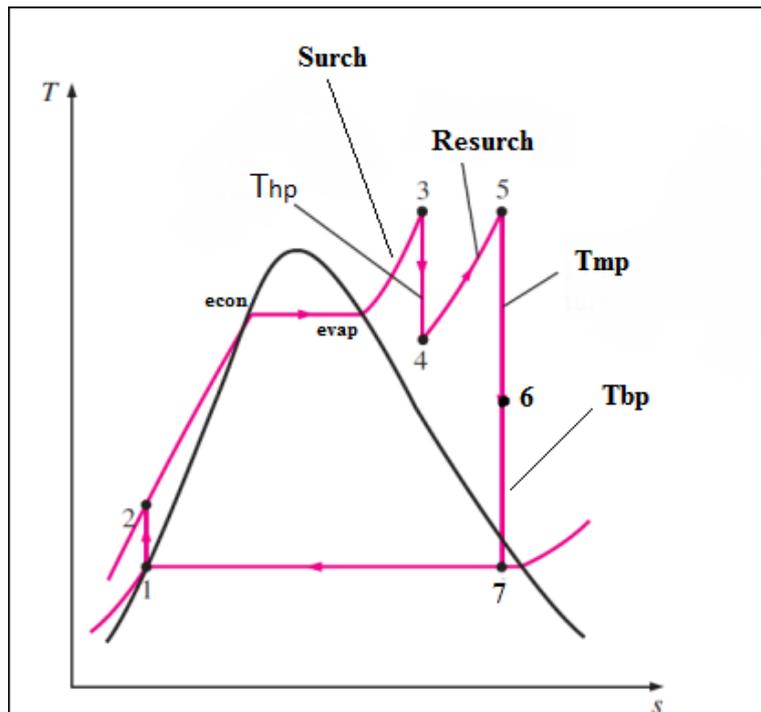


Figure (3-8) : Cycle Hirn sans soutirage et avec resurchauffe [7]

- 1-2 Compression isentropique dans la pompe
- 2-3 Apport de chaleur à pression constante dans la chaudière
- 3-4 Détente isentropique dans la turbine H_p
- 4-5 transformations supplémentaires isobares
- 5-6 Détente isentropique dans la turbine M_p
- 6-7 Détente isentropique dans la turbine B_p
- 7-1 Évacuation de la chaleur à pression constante dans le condenseur

Calcul des paramètres de la turbine à vapeur :

Pour la machine thermique le rendement est une caractéristique essentielle des moteurs, puisqu'il quantifie la faculté d'une machine à assurer une transformation énergétique. Un bon rendement est donc synonyme de faible consommation de carburant. [1]

4.3 Définition du rendement du cycle :

Le rendement global d'une centrale thermique est le rapport de l'énergie mécanique " w " sur l'énergie calorifique de la chaudière Q :

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{|W_{\text{net}}|}{Q_{\text{in}}} \quad (3.42)$$

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{|W_T - W_P|}{Q_{\text{ch}}}$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{W_T - W_P}{Q_{CH}} \quad (3.43)$$

Avec :

$$W_{\text{net}} = |w_t - w_p| \quad (3.44)$$

Avec :

W_{tv} : Travail de la turbine a vapeur.

W_p : Travail des pompes.

Q_{in} : quantité de chaleur fournie par la chaudière.

$$W_P = (H_2 - H_1) \quad (3.45)$$

W_P : Travail de pompe

- Tenant compte des différentes pertes qui se traduisent par a dégradation de rendement du la turbine Des pompes et la chaudière.

4.4 Calcul du travail fourni par la turbine :

$$W_T = W_{HP} + W_{MP} + W_{BP} \quad (3.46)$$

W_{HP} : Travail de corps HP

W_{MP} : Travail de corps MP

W_{BP} : Travail de corps BP

Avec :

$$w_{hp} = (H_3 - H_4) \quad (3.47)$$

$$w_{mp} = (H_5 - H_6) \quad (3.48)$$

$$w_{Bp} = (H_6 - H_7) \quad (3.49)$$

Donc :

$$W_T = [(H_3 - H_4) + (H_5 - H_6) + (H_6 - H_7)] \quad (3.50)$$

4.5 Quantité de chaleur reçue : [1]

$$Q_{ch} = (H_3 - H_2) + (H_5 - H_4) \quad (3.51)$$

4.6 Les paramètres nécessaires au calcul de la tv : [5]

Température de turbine haute pression 584. 312 C°

Pression de turbine haute pression 120.7 bar

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| Température de turbine moyen pression | 334.80 C° |
| Pression de turbine moyen pression | 30.34 bar |
| Température de turbine bas pression | 233.45 C° |
| Pression de turbine bas pression | 3.34 bar |
| Température de condenseur | 30 C° |
| Pression de condenseur | 0.042 bar |

4.7 Calcul de rendement de turbine à vapeur :

il faut connaître les enthalpies de fluides Motors aux divers points caractéristiques du cycles déterminer partir de la table thermodynamique et le diagramme (H_S),les mesures des paramètres de la vapeur (p ,t ,h) aux différents points de la stations tv . [7]

4.8 Détermination de l'enthalpie du chaque point de cycle :

On a calculé les enthalpies par la méthode manuelle et par le diagramme de Mollier puis après plusieurs essais et pour gagner du temps on a trouvé l'interpolation de la grange en ligne et on a comparé entre eux, on remarque que par les trois méthodes on trouve les mêmes résultats.

Voici un exemple de calcul de L'enthalpie en point 3 par les trois méthodes :

Première méthode :

- La méthode manuelle :

$$Y = a x + b$$

$$\text{Tg}\alpha = a = \frac{3526 - 3425.1}{560 - 520} = 2.5225$$

$$b = y - a x$$

$$b = 2113.4$$

$$Y_3 = H_3 = 2.525 \cdot (548.31) + 2113.4 \quad \longrightarrow \quad H_3 = 3496.51 \text{ KJ/KG}$$

- Deuxième méthode : Interpolation linéaire en ligne :

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

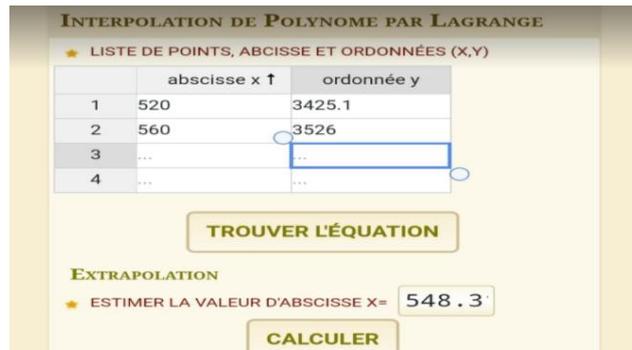


Figure 3-9 : interpolation de la grange [8]

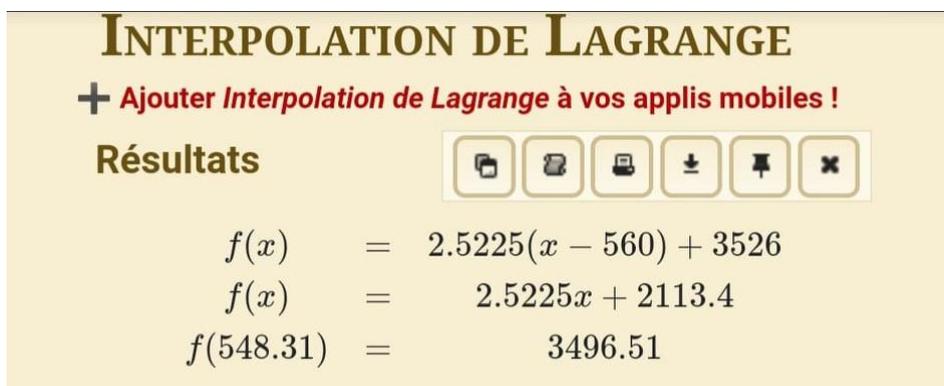


Figure 3-10 : calcul de l'enthalpie par l'interpolation linéaire [8]

Donc $H_3=3568.26\text{KJ/KG}$

- Troisième méthode par le diagramme de Mollier :

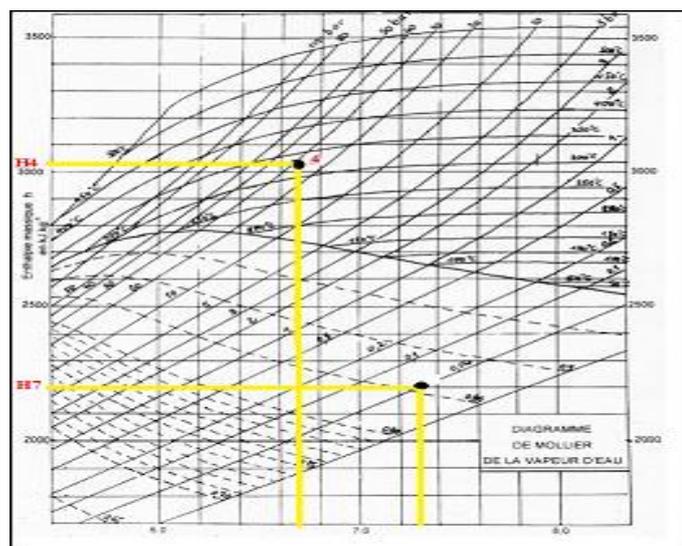


Figure (3-11) : diagramme de Mollier [6]

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

4.8.1 Calcule des paramètres nécessaires pour trouver le rendement du cycle combine :

Tableau 3-1 : de paramètres du calcule de cycle combine

| Points | Pression en (bar) | Température en (c°) | Enthalpie en kj/kg |
|--------|-------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | 0.042 | 30 | 125.79 |
| 2 | 120.7 | | 246.96 |
| 3 | 120.7 | 548.31 | 3096.51 |
| 4 | 30.34 | 334.8 | 3077.71 |
| 5 | 30.34 | 546.67 | 3561.69 |
| 6 | 3.34 | 233 | 2850.94 |
| 7 | 0.042 | 30 | 2200 |

Point 1 :

$$P_1=0.042 \text{ bar}$$

En utilisant la table (T_2) et l'interpolation linéaire pour trouver H1 :

$$v_1= 1.0043 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{KG}$$

$$H_1= 125.79 \text{ KJ/KG}$$

4.9 Travail de pompe :

Pour calculer le travail de pompe il faut trouver V_1 Par la méthode d'interpolation en ligne :

Point 2 :

$$W_p = H_2 - H_1 = V_1(P_2 - P_1)$$

$$W_p = 1.0043 \cdot 10^3 \cdot (120.7 - 0.042)$$

$$W_p = 121.176 \text{ KJ}$$

$$H_2 = W_p + H_1$$

$$H_2 = 121.176 + 125.79$$

$$H_2 = 246.96 \text{ KJ/KG}$$

Point 3 :

$$H_3 = 3496.51 \text{ KJ/KG}$$

Point 4 :

$$H_4 = 3007.71 \text{ KJ/KG}$$

Point 5 :

$$H_5 = 3561.69 \text{ KJ/KG}$$

Point 6 :

$$H_6 = 2850.94 \text{ KJ/KG}$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

Point 7 :

Début de condensation donc, on a liquide plus vapeur d'après le diagramme de Mollier :

On a :

$$P_7 = 0.042 \text{ bar}$$

$$S_5 = S_6 = S_7$$

$$H_7 = 2200 \text{ KJ/KG}$$

D'après les relations (52) et (53) on trouve :

$$W_T = [(3496.51 - 3077.71) + (3561.69 - 2850.94) + (2850.94 - 2200)]$$

$$W_T = 1780.49 \text{ KJ}$$

$$Q_{in} = [(3496.5 - 246.96) + (3561.69 - 3077.71)]$$

$$Q_{in} = 3733.52 \text{ KJ}$$

$$\eta_{tv} = \frac{(w_t - w_{ppe})}{Q_{in}} \quad (3.52)$$

$$\eta_{tv} = \left(\frac{1780.49 - 121.76}{3733.52} \right) = 0.44$$

$$\eta_{tv} = 44\%$$

4.9.1 Le rendement du cycle combine :

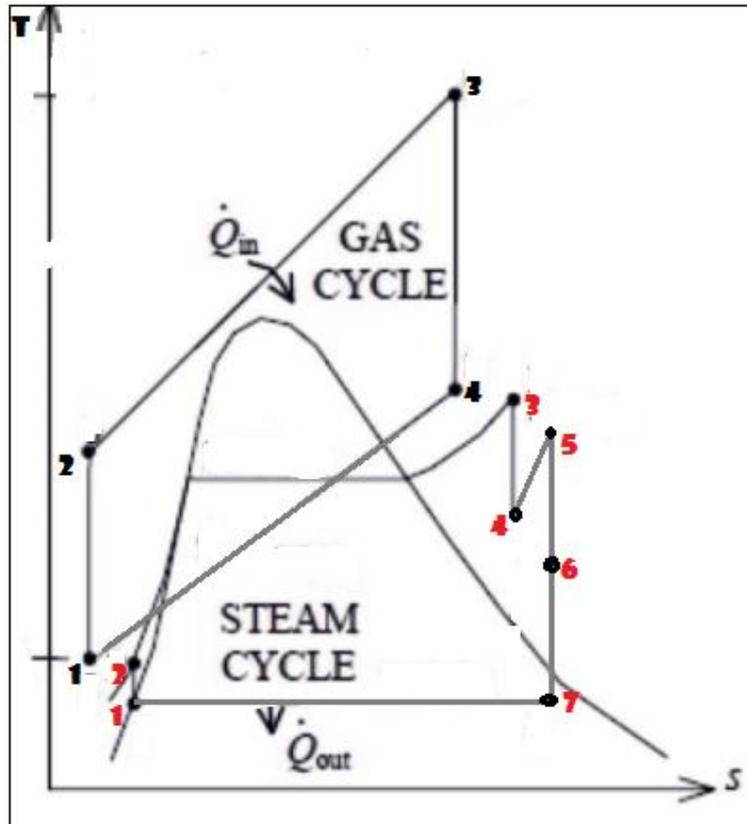


Figure 3-12 : Cycle combine gaz-vapeur [9]

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

$$\eta_{cc} = \frac{W_{TOTAL}}{Q_{IN}} = [1 - (\frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}})] \quad (3.53)$$

$$\eta_G = \frac{W_G}{Q_{IN}} = [1 - (\frac{Q_{G.OUT}}{Q_{IN}})] \quad (3.54)$$

$$\eta_S = \frac{W_S}{Q_{G.OUT}} = [1 - (\frac{Q_{OUT}}{Q_{G.OUT}})] \quad (3.55)$$

$$\eta_{G+\eta_S-\eta_S \cdot \eta_G} = [(1 - \frac{Q_{G.OUT}}{Q_{IN}}) + (1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{G.OUT}}) - (1 - \frac{Q_{G.OUT}}{Q_{IN}}) \cdot (1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{G.OUT}})] \quad (3.56)$$

$$\eta_{G+\eta_S-\eta_S \cdot \eta_G} = [1 - \frac{Q_{G.OUT}}{Q_{IN}} + 1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{G.OUT}} - 1 + \frac{Q_{G.OUT}}{Q_{IN}} + \frac{Q_{OUT}}{Q_{G.OUT}} - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}}]$$

$$\eta_{G+\eta_S-\eta_S \cdot \eta_G} = [1 - \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}}]$$

$$\eta_{G+\eta_S-\eta_S \cdot \eta_G} = \eta_{cc} \quad [9]$$

Donc ça nous donne :

$$\eta_{cc} = \eta_{tg} + \eta_{tv} - \eta_{tg} \cdot \eta_{tv} \quad (3.58)$$

$$\eta_{cc} = 0.29 + 0.44 - (0.29 \cdot 0.44) = 0.6024$$

$$\eta_{cc} = 60.24 \%$$

4.9.2 Calcul de consommation spécifique :

L'essai a été réalisé le 05/09/2019 afin de vérifier la performance de la centrale pour la tranche 50 dans le cadre de la réalisation du projet de la centrale à cycle combiné de Ras Djinet de 1131.1 MW

L'essai a été effectué en se conformant strictement à la procédure de l'essai de performance approuvée par le maître d'ouvrage. [5]

$$c_{sp} (g) = p_{cs} \left(\frac{v_0(G)}{p_{active}} \right) \quad (3.57)$$

$$p_{active} = 398736 \text{ kw}$$

Avec :

p_{active} : Puissance active

$$p_{ci} = 50953.7 \text{ KJ/KG}$$

Avec :

p_{cs} : Pouvoir calorifique supérieur.

p_{ci} : Pouvoir calorifique inférieur.

$$V = 2078 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\rho = 24.8074 \text{ kg/m}^3$$

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

Avec :

V : débit volumique

ρ : la masse volumique

$$V_0 = \rho * V = (24.8074 * 2078)$$

$$V_0 = 51773.0438 \text{ kg/h}$$

Avec :

V_0 : Débit massique

Ca nous donne :

$$C_{sp} = [50953.7 * \frac{(51773.0438)}{398736}]$$

$$C_{sp} = 6615.97 \text{ kj/kwh}$$

Tableau 3-2 de comparaison de consommation spécifique entre 2019 et 2021

| | Unité | Valeur de garantie | Valeur de l'essai | Différence | Résultat de l'essai |
|-----------------------------------|--------|--------------------|-------------------|------------|---------------------|
| Consommation spécifique (LHV=PCI) | Kg/kWh | 6145 | 6615.97 | +470.97 | Satisfaisant |

La consommation spécifique est proche de la valeur d'usine donc l'état du santé de groupe est dans les normes (tranche 50). [5]

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

Table 3-3 : (T-2) propriétés de l'eau saturée (liquide vapeur) : tableaux des températures [4]

| Temp. °C | Press. bar | Specific Volume m ³ /kg | | Internal Energy kJ/kg | | Enthalpy kJ/kg | | | Entropy kJ/kg · K | | Temp. °C |
|-------------|---------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|
| | | Sat. Liquid $v_f \times 10^3$ | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Sat. Vapor u_g | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Sat. Vapor s_g | |
| .01 | 0.00611 | 1.0002 | 206.136 | 0.00 | 2375.3 | 0.01 | 2501.3 | 2501.4 | 0.0000 | 9.1562 | .01 |
| 4 | 0.00813 | 1.0001 | 157.232 | 16.77 | 2380.9 | 16.78 | 2491.9 | 2508.7 | 0.0610 | 9.0514 | 4 |
| 5 | 0.00872 | 1.0001 | 147.120 | 20.97 | 2382.3 | 20.98 | 2489.6 | 2510.6 | 0.0761 | 9.0257 | 5 |
| 6 | 0.00935 | 1.0001 | 137.734 | 25.19 | 2383.6 | 25.20 | 2487.2 | 2512.4 | 0.0912 | 9.0003 | 6 |
| 8 | 0.01072 | 1.0002 | 120.917 | 33.59 | 2386.4 | 33.60 | 2482.5 | 2516.1 | 0.1212 | 8.9501 | 8 |
| 10 | 0.01228 | 1.0004 | 106.379 | 42.00 | 2389.2 | 42.01 | 2477.7 | 2519.8 | 0.1510 | 8.9008 | 10 |
| 11 | 0.01312 | 1.0004 | 99.857 | 46.20 | 2390.5 | 46.20 | 2475.4 | 2521.6 | 0.1658 | 8.8765 | 11 |
| 12 | 0.01402 | 1.0005 | 93.784 | 50.41 | 2391.9 | 50.41 | 2473.0 | 2523.4 | 0.1806 | 8.8524 | 12 |
| 13 | 0.01497 | 1.0007 | 88.124 | 54.60 | 2393.3 | 54.60 | 2470.7 | 2525.3 | 0.1953 | 8.8285 | 13 |
| 14 | 0.01598 | 1.0008 | 82.848 | 58.79 | 2394.7 | 58.80 | 2468.3 | 2527.1 | 0.2099 | 8.8048 | 14 |
| 15 | 0.01705 | 1.0009 | 77.926 | 62.99 | 2396.1 | 62.99 | 2465.9 | 2528.9 | 0.2245 | 8.7814 | 15 |
| 16 | 0.01818 | 1.0011 | 73.333 | 67.18 | 2397.4 | 67.19 | 2463.6 | 2530.8 | 0.2390 | 8.7582 | 16 |
| 17 | 0.01938 | 1.0012 | 69.044 | 71.38 | 2398.8 | 71.38 | 2461.2 | 2532.6 | 0.2535 | 8.7351 | 17 |
| 18 | 0.02064 | 1.0014 | 65.038 | 75.57 | 2400.2 | 75.58 | 2458.8 | 2534.4 | 0.2679 | 8.7123 | 18 |
| 19 | 0.02198 | 1.0016 | 61.293 | 79.76 | 2401.6 | 79.77 | 2456.5 | 2536.2 | 0.2823 | 8.6897 | 19 |
| 20 | 0.02339 | 1.0018 | 57.791 | 83.95 | 2402.9 | 83.96 | 2454.1 | 2538.1 | 0.2966 | 8.6672 | 20 |
| 21 | 0.02487 | 1.0020 | 54.514 | 88.14 | 2404.3 | 88.14 | 2451.8 | 2539.9 | 0.3109 | 8.6450 | 21 |
| 22 | 0.02645 | 1.0022 | 51.447 | 92.32 | 2405.7 | 92.33 | 2449.4 | 2541.7 | 0.3251 | 8.6229 | 22 |
| 23 | 0.02810 | 1.0024 | 48.574 | 96.51 | 2407.0 | 96.52 | 2447.0 | 2543.5 | 0.3393 | 8.6011 | 23 |
| 24 | 0.02985 | 1.0027 | 45.883 | 100.70 | 2408.4 | 100.70 | 2444.7 | 2545.4 | 0.3534 | 8.5794 | 24 |
| 25 | 0.03169 | 1.0029 | 43.360 | 104.88 | 2409.8 | 104.89 | 2442.3 | 2547.2 | 0.3674 | 8.5580 | 25 |
| 26 | 0.03363 | 1.0032 | 40.994 | 109.06 | 2411.1 | 109.07 | 2439.9 | 2549.0 | 0.3814 | 8.5367 | 26 |
| 27 | 0.03567 | 1.0035 | 38.774 | 113.25 | 2412.5 | 113.25 | 2437.6 | 2550.8 | 0.3954 | 8.5156 | 27 |
| 28 | 0.03782 | 1.0037 | 36.690 | 117.42 | 2413.9 | 117.43 | 2435.2 | 2552.6 | 0.4093 | 8.4946 | 28 |
| 29 | 0.04008 | 1.0040 | 34.733 | 121.60 | 2415.2 | 121.61 | 2432.8 | 2554.5 | 0.4231 | 8.4739 | 29 |
| 30 | 0.04246 | 1.0043 | 32.894 | 125.78 | 2416.6 | 125.79 | 2430.5 | 2556.3 | 0.4369 | 8.4533 | 30 |
| 31 | 0.04496 | 1.0046 | 31.165 | 129.96 | 2418.0 | 129.97 | 2428.1 | 2558.1 | 0.4507 | 8.4329 | 31 |
| 32 | 0.04759 | 1.0050 | 29.540 | 134.14 | 2419.3 | 134.15 | 2425.7 | 2559.9 | 0.4644 | 8.4127 | 32 |
| 33 | 0.05034 | 1.0053 | 28.011 | 138.32 | 2420.7 | 138.33 | 2423.4 | 2561.7 | 0.4781 | 8.3927 | 33 |
| 34 | 0.05324 | 1.0056 | 26.571 | 142.50 | 2422.0 | 142.50 | 2421.0 | 2563.5 | 0.4917 | 8.3728 | 34 |
| 35 | 0.05628 | 1.0060 | 25.216 | 146.67 | 2423.4 | 146.68 | 2418.6 | 2565.3 | 0.5053 | 8.3531 | 35 |
| 36 | 0.05947 | 1.0063 | 23.940 | 150.85 | 2424.7 | 150.86 | 2416.2 | 2567.1 | 0.5188 | 8.3336 | 36 |
| 38 | 0.06632 | 1.0071 | 21.602 | 159.20 | 2427.4 | 159.21 | 2411.5 | 2570.7 | 0.5458 | 8.2950 | 38 |
| 40 | 0.07384 | 1.0078 | 19.523 | 167.56 | 2430.1 | 167.57 | 2406.7 | 2574.3 | 0.5725 | 8.2570 | 40 |
| 45 | 0.09593 | 1.0099 | 15.258 | 188.44 | 2436.8 | 188.45 | 2394.8 | 2583.2 | 0.6387 | 8.1648 | 45 |
| 50 | 0.1235 | 1.0121 | 12.032 | 209.32 | 2443.5 | 209.33 | 2382.7 | 2592.1 | .7038 | 8.0763 | 50 |
| 55 | 0.1576 | 1.0146 | 9.568 | 230.21 | 2450.1 | 230.23 | 2370.7 | 2600.9 | .7679 | 7.9913 | 55 |
| 60 | 0.1994 | 1.0172 | 7.671 | 251.11 | 2456.6 | 251.13 | 2358.5 | 2609.6 | .8312 | 7.9096 | 60 |
| 65 | 0.2503 | 1.0199 | 6.197 | 272.02 | 2463.1 | 272.06 | 2346.2 | 2618.3 | .8935 | 7.8310 | 65 |
| 70 | 0.3119 | 1.0228 | 5.042 | 292.95 | 2469.6 | 292.98 | 2333.8 | 2626.8 | .9549 | 7.7553 | 70 |
| 75 | 0.3858 | 1.0259 | 4.131 | 313.90 | 2475.9 | 313.93 | 2321.4 | 2635.3 | 1.0155 | 7.6824 | 75 |
| 80 | 0.4739 | 1.0291 | 3.407 | 334.86 | 2482.2 | 334.91 | 2308.8 | 2643.7 | 1.0753 | 7.6122 | 80 |
| 85 | 0.5783 | 1.0325 | 2.828 | 355.84 | 2488.4 | 355.90 | 2296.0 | 2651.9 | 1.1343 | 7.5445 | 85 |
| 90 | 0.7014 | 1.0360 | 2.361 | 376.85 | 2494.5 | 376.92 | 2283.2 | 2660.1 | 1.1925 | 7.4791 | 90 |
| 95 | 0.8455 | 1.0397 | 1.982 | 397.88 | 2500.6 | 397.96 | 2270.2 | 2668.1 | 1.2500 | 7.4159 | 95 |

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 100 | 1.014 | 1.0435 | 1.673 | 418.94 | 2506.5 | 419.04 | 2257.0 | 2676.1 | 1.3069 | 7.3549 | 100 |
| 110 | 1.433 | 1.0516 | 1.210 | 461.14 | 2518.1 | 461.30 | 2230.2 | 2691.5 | 1.4185 | 7.2387 | 110 |
| 120 | 1.985 | 1.0603 | 0.8919 | 503.50 | 2529.3 | 503.71 | 2202.6 | 2706.3 | 1.5276 | 7.1296 | 120 |
| 130 | 2.701 | 1.0697 | 0.6685 | 546.02 | 2539.9 | 546.31 | 2174.2 | 2720.5 | 1.6344 | 7.0269 | 130 |
| 140 | 3.613 | 1.0797 | 0.5089 | 588.74 | 2550.0 | 589.13 | 2144.7 | 2733.9 | 1.7391 | 6.9299 | 140 |
| 150 | 4.758 | 1.0905 | 0.3928 | 631.68 | 2559.5 | 632.20 | 2114.3 | 2746.5 | 1.8418 | 6.8379 | 150 |
| 160 | 6.178 | 1.1020 | 0.3071 | 674.86 | 2568.4 | 675.55 | 2082.6 | 2758.1 | 1.9427 | 6.7502 | 160 |
| 170 | 7.917 | 1.1143 | 0.2428 | 718.33 | 2576.5 | 719.21 | 2049.5 | 2768.7 | 2.0419 | 6.6663 | 170 |
| 180 | 10.02 | 1.1274 | 0.1941 | 762.09 | 2583.7 | 763.22 | 2015.0 | 2778.2 | 2.1396 | 6.5857 | 180 |
| 190 | 12.54 | 1.1414 | 0.1565 | 806.19 | 2590.0 | 807.62 | 1978.8 | 2786.4 | 2.2359 | 6.5079 | 190 |
| 200 | 15.54 | 1.1565 | 0.1274 | 850.65 | 2595.3 | 852.45 | 1940.7 | 2793.2 | 2.3309 | 6.4323 | 200 |
| 210 | 19.06 | 1.1726 | 0.1044 | 895.53 | 2599.5 | 897.76 | 1900.7 | 2798.5 | 2.4248 | 6.3585 | 210 |
| 220 | 23.18 | 1.1900 | 0.08619 | 940.87 | 2602.4 | 943.62 | 1858.5 | 2802.1 | 2.5178 | 6.2861 | 220 |
| 230 | 27.95 | 1.2088 | 0.07158 | 986.74 | 2603.9 | 990.12 | 1813.8 | 2804.0 | 2.6099 | 6.2146 | 230 |
| 240 | 33.44 | 1.2291 | 0.05976 | 1033.2 | 2604.0 | 1037.3 | 1766.5 | 2803.8 | 2.7015 | 6.1437 | 240 |
| 250 | 39.73 | 1.2512 | 0.05013 | 1080.4 | 2602.4 | 1085.4 | 1716.2 | 2801.5 | 2.7927 | 6.0730 | 250 |
| 260 | 46.88 | 1.2755 | 0.04221 | 1128.4 | 2599.0 | 1134.4 | 1662.5 | 2796.6 | 2.8838 | 6.0019 | 260 |
| 270 | 54.99 | 1.3023 | 0.03564 | 1177.4 | 2593.7 | 1184.5 | 1605.2 | 2789.7 | 2.9751 | 5.9301 | 270 |
| 280 | 64.12 | 1.3321 | 0.03017 | 1227.5 | 2586.1 | 1236.0 | 1543.6 | 2779.6 | 3.0668 | 5.8571 | 280 |
| 290 | 74.36 | 1.3656 | 0.02557 | 1278.9 | 2576.0 | 1289.1 | 1477.1 | 2766.2 | 3.1594 | 5.7821 | 290 |
| 300 | 85.81 | 1.4036 | 0.02167 | 1332.0 | 2563.0 | 1344.0 | 1404.9 | 2749.0 | 3.2534 | 5.7045 | 300 |
| 320 | 112.7 | 1.4988 | 0.01549 | 1444.6 | 2525.5 | 1461.5 | 1238.6 | 2700.1 | 3.4480 | 5.5362 | 320 |
| 340 | 145.9 | 1.6379 | 0.01080 | 1570.3 | 2464.6 | 1594.2 | 1027.9 | 2622.0 | 3.6594 | 5.3357 | 340 |
| 360 | 186.5 | 1.8925 | 0.006945 | 1725.2 | 2351.5 | 1760.5 | 720.5 | 2481.0 | 3.9147 | 5.0526 | 360 |
| 374.14 | 220.9 | 3.155 | 0.003155 | 2029.6 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 4.4298 | 374.14 |

Table 3-4 : T-3 propriétés de l'eau saturée (liquide vapeur) : tableau de pression [4]

| Press. bar | Temp. °C | Specific Volume m ³ /kg | | Internal Energy kJ/kg | | Enthalpy kJ/kg | | | Entropy kJ/kg · K | | Press. bar |
|------------|----------|------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|----------------|------------------|-------------------|------------------|------------|
| | | Sat. Liquid $v_f \times 10^3$ | Sat. Vapor v_g | Sat. Liquid u_f | Sat. Vapor u_g | Sat. Liquid h_f | Evap. h_{fg} | Sat. Vapor h_g | Sat. Liquid s_f | Sat. Vapor s_g | |
| 0.04 | 28.96 | 1.0040 | 34.800 | 121.45 | 2415.2 | 121.46 | 2432.9 | 2554.4 | 0.4226 | 8.4746 | 0.04 |
| 0.06 | 36.16 | 1.0064 | 23.739 | 151.53 | 2425.0 | 151.53 | 2415.9 | 2567.4 | 0.5210 | 8.3304 | 0.06 |
| 0.08 | 41.51 | 1.0084 | 18.103 | 173.87 | 2432.2 | 173.88 | 2403.1 | 2577.0 | 0.5926 | 8.2287 | 0.08 |
| 0.10 | 45.81 | 1.0102 | 14.674 | 191.82 | 2437.9 | 191.83 | 2392.8 | 2584.7 | 0.6493 | 8.1502 | 0.10 |
| 0.20 | 60.06 | 1.0172 | 7.649 | 251.38 | 2456.7 | 251.40 | 2358.3 | 2609.7 | 0.8320 | 7.9085 | 0.20 |
| 0.30 | 69.10 | 1.0223 | 5.229 | 289.20 | 2468.4 | 289.23 | 2336.1 | 2625.3 | 0.9439 | 7.7686 | 0.30 |
| 0.40 | 75.87 | 1.0265 | 3.993 | 317.53 | 2477.0 | 317.58 | 2319.2 | 2636.8 | 1.0259 | 7.6700 | 0.40 |
| 0.50 | 81.33 | 1.0300 | 3.240 | 340.44 | 2483.9 | 340.49 | 2305.4 | 2645.9 | 1.0910 | 7.5939 | 0.50 |
| 0.60 | 85.94 | 1.0331 | 2.732 | 359.79 | 2489.6 | 359.86 | 2293.6 | 2653.5 | 1.1453 | 7.5320 | 0.60 |
| 0.70 | 89.95 | 1.0360 | 2.365 | 376.63 | 2494.5 | 376.70 | 2283.3 | 2660.0 | 1.1919 | 7.4797 | 0.70 |

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 0.80 | 93.50 | 1.0380 | 2.087 | 391.58 | 2498.8 | 391.66 | 2274.1 | 2665.8 | 1.2329 | 7.4346 | 0.80 |
| 0.90 | 96.71 | 1.0410 | 1.869 | 405.06 | 2502.6 | 405.15 | 2265.7 | 2670.9 | 1.2695 | 7.3949 | 0.90 |
| 1.00 | 99.63 | 1.0432 | 1.694 | 417.36 | 2506.1 | 417.46 | 2258.0 | 2675.5 | 1.3026 | 7.3594 | 1.00 |
| 1.50 | 111.4 | 1.0528 | 1.159 | 466.94 | 2519.7 | 467.11 | 2226.5 | 2693.6 | 1.4336 | 7.2233 | 1.50 |
| 2.00 | 120.2 | 1.0605 | 0.8857 | 504.49 | 2529.5 | 504.70 | 2201.9 | 2706.7 | 1.5301 | 7.1271 | 2.00 |
| 2.50 | 127.4 | 1.0672 | 0.7187 | 535.10 | 2537.2 | 535.37 | 2181.5 | 2716.9 | 1.6072 | 7.0527 | 2.50 |
| 3.00 | 133.6 | 1.0732 | 0.6058 | 561.15 | 2543.6 | 561.47 | 2163.8 | 2725.3 | 1.6718 | 6.9919 | 3.00 |
| 3.50 | 138.9 | 1.0786 | 0.5243 | 583.95 | 2546.9 | 584.33 | 2148.1 | 2732.4 | 1.7275 | 6.9405 | 3.50 |
| 4.00 | 143.6 | 1.0836 | 0.4625 | 604.31 | 2553.6 | 604.74 | 2133.8 | 2738.6 | 1.7766 | 6.8959 | 4.00 |
| 4.50 | 147.9 | 1.0882 | 0.4140 | 622.25 | 2557.6 | 623.25 | 2120.7 | 2743.9 | 1.8207 | 6.8565 | 4.50 |
| 5.00 | 151.9 | 1.0926 | 0.3749 | 639.68 | 2561.2 | 640.23 | 2108.5 | 2748.7 | 1.8607 | 6.8212 | 5.00 |
| 6.00 | 158.9 | 1.1006 | 0.3157 | 669.90 | 2567.4 | 670.56 | 2086.3 | 2756.8 | 1.9312 | 6.7600 | 6.00 |
| 7.00 | 165.0 | 1.1080 | 0.2729 | 696.44 | 2572.5 | 697.22 | 2066.3 | 2763.5 | 1.9922 | 6.7080 | 7.00 |
| 8.00 | 170.4 | 1.1148 | 0.2404 | 720.22 | 2576.8 | 721.11 | 2048.0 | 2769.1 | 2.0462 | 6.6628 | 8.00 |
| 9.00 | 175.4 | 1.1212 | 0.2150 | 741.83 | 2580.5 | 742.83 | 2031.1 | 2773.9 | 2.0946 | 6.6226 | 9.00 |
| 10.0 | 179.9 | 1.1273 | 0.1944 | 761.68 | 2583.6 | 762.81 | 2015.3 | 2778.1 | 2.1387 | 6.5863 | 10.0 |
| 15.0 | 198.3 | 1.1539 | 0.1318 | 843.16 | 2594.5 | 844.84 | 1947.3 | 2792.2 | 2.3150 | 6.4448 | 15.0 |
| 20.0 | 212.4 | 1.1767 | 0.09963 | 906.44 | 2600.3 | 908.79 | 1890.7 | 2799.5 | 2.4474 | 6.3409 | 20.0 |
| 25.0 | 224.0 | 1.1973 | 0.07998 | 959.11 | 2603.1 | 962.11 | 1841.0 | 2803.1 | 2.5547 | 6.2575 | 25.0 |
| 30.0 | 233.9 | 1.2165 | 0.06668 | 1004.8 | 2604.1 | 1008.4 | 1795.7 | 2804.2 | 2.6457 | 6.1869 | 30.0 |
| 35.0 | 242.6 | 1.2347 | 0.05707 | 1045.4 | 2603.7 | 1049.8 | 1753.7 | 2803.4 | 2.7253 | 6.1253 | 35.0 |
| 40.0 | 250.4 | 1.2522 | 0.04978 | 1082.3 | 2602.3 | 1087.3 | 1714.1 | 2801.4 | 2.7964 | 6.0701 | 40.0 |
| 45.0 | 257.5 | 1.2692 | 0.04406 | 1116.2 | 2600.1 | 1121.9 | 1676.4 | 2798.3 | 2.8610 | 6.0199 | 45.0 |
| 50.0 | 264.0 | 1.2859 | 0.03944 | 1147.8 | 2597.1 | 1154.2 | 1640.1 | 2794.3 | 2.9202 | 5.9734 | 50.0 |
| 60.0 | 275.6 | 1.3187 | 0.03244 | 1205.4 | 2589.7 | 1213.4 | 1571.0 | 2784.3 | 3.0267 | 5.8892 | 60.0 |
| 70.0 | 285.9 | 1.3513 | 0.02737 | 1257.6 | 2580.5 | 1267.0 | 1505.1 | 2772.1 | 3.1211 | 5.8133 | 70.0 |
| 80.0 | 295.1 | 1.3842 | 0.02352 | 1305.6 | 2569.8 | 1316.6 | 1441.3 | 2758.0 | 3.2068 | 5.7432 | 80.0 |
| 90.0 | 303.4 | 1.4178 | 0.02048 | 1350.5 | 2557.8 | 1363.3 | 1378.9 | 2742.1 | 3.2858 | 5.6772 | 90.0 |
| 100. | 311.1 | 1.4524 | 0.01803 | 1393.0 | 2544.4 | 1407.6 | 1317.1 | 2724.7 | 3.3596 | 5.6141 | 100. |
| 110. | 318.2 | 1.4886 | 0.01599 | 1433.7 | 2529.8 | 1450.1 | 1255.5 | 2705.6 | 3.4295 | 5.5527 | 110. |
| 120. | 324.8 | 1.5267 | 0.01426 | 1473.0 | 2513.7 | 1491.3 | 1193.6 | 2684.9 | 3.4962 | 5.4924 | 120. |
| 130. | 330.9 | 1.5671 | 0.01278 | 1511.1 | 2496.1 | 1531.5 | 1130.7 | 2662.2 | 3.5606 | 5.4323 | 130. |
| 140. | 336.8 | 1.6107 | 0.01149 | 1548.6 | 2476.8 | 1571.1 | 1066.5 | 2637.6 | 3.6232 | 5.3717 | 140. |
| 150. | 342.2 | 1.6581 | 0.01034 | 1585.6 | 2455.5 | 1610.5 | 1000.0 | 2610.5 | 3.6848 | 5.3098 | 150. |
| 160. | 347.4 | 1.7107 | 0.009306 | 1622.7 | 2431.7 | 1650.1 | 930.6 | 2580.6 | 3.7461 | 5.2455 | 160. |
| 170. | 352.4 | 1.7702 | 0.008364 | 1660.2 | 2405.0 | 1690.3 | 856.9 | 2547.2 | 3.8079 | 5.1777 | 170. |
| 180. | 357.1 | 1.8397 | 0.007489 | 1698.9 | 2374.3 | 1732.0 | 777.1 | 2509.1 | 3.8715 | 5.1044 | 180. |
| 190. | 361.5 | 1.9243 | 0.006657 | 1739.9 | 2338.1 | 1776.5 | 688.0 | 2464.5 | 3.9388 | 5.0228 | 190. |
| 200. | 365.8 | 2.036 | 0.005834 | 1785.6 | 2293.0 | 1826.3 | 583.4 | 2409.7 | 4.0139 | 4.9269 | 200. |
| 220.9 | 374.1 | 3.155 | 0.003155 | 2029.6 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 4.4298 | 220.9 |

Table 3-5 : T-4 : propriétés de la vapeur d'eau surchauffée [4]

| T °C | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K |
|-----------|--|--------------|--------------|------------------|--|--------------|--------------|------------------|---|--------------|--------------|------------------|
| | $p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$) | | | | $p = 0.35 \text{ bar} = 0.035 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$) | | | | $p = 0.70 \text{ bar} = 0.07 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 23.739 | 2425.0 | 2567.4 | 8.3304 | 4.526 | 2473.0 | 2631.4 | 7.7158 | 2.365 | 2494.5 | 2660.0 | 7.4797 |
| 80 | 27.132 | 2487.3 | 2650.1 | 8.5804 | 4.625 | 2483.7 | 2645.6 | 7.7564 | 2.434 | 2509.7 | 2680.0 | 7.5341 |
| 120 | 30.219 | 2544.7 | 2726.0 | 8.7840 | 5.163 | 2542.4 | 2723.1 | 7.9644 | 2.571 | 2539.7 | 2719.6 | 7.6375 |
| 160 | 33.302 | 2602.7 | 2802.5 | 8.9693 | 5.696 | 2601.2 | 2800.6 | 8.1519 | 2.841 | 2599.4 | 2798.2 | 7.8279 |
| 200 | 36.383 | 2661.4 | 2879.7 | 9.1398 | 6.228 | 2660.4 | 2878.4 | 8.3237 | 3.108 | 2659.1 | 2876.7 | 8.0012 |
| 240 | 39.462 | 2721.0 | 2957.8 | 9.2982 | 6.758 | 2720.3 | 2956.8 | 8.4828 | 3.374 | 2719.3 | 2955.5 | 8.1611 |
| 280 | 42.540 | 2781.5 | 3036.8 | 9.4464 | 7.287 | 2780.9 | 3036.0 | 8.6314 | 3.640 | 2780.2 | 3035.0 | 8.3162 |
| 320 | 45.618 | 2843.0 | 3116.7 | 9.5859 | 7.815 | 2842.5 | 3116.1 | 8.7712 | 3.905 | 2842.0 | 3115.3 | 8.4504 |
| 360 | 48.696 | 2905.5 | 3197.7 | 9.7180 | 8.344 | 2905.1 | 3197.1 | 8.9034 | 4.170 | 2904.6 | 3196.5 | 8.5828 |
| 400 | 51.774 | 2969.0 | 3279.6 | 9.8435 | 8.872 | 2968.6 | 3279.2 | 9.0291 | 4.434 | 2968.2 | 3278.6 | 8.7086 |
| 440 | 54.851 | 3033.5 | 3362.6 | 9.9633 | 9.400 | 3033.2 | 3362.2 | 9.1490 | 4.698 | 3032.9 | 3361.8 | 8.8286 |
| 500 | 59.467 | 3132.3 | 3489.1 | 10.1336 | 10.192 | 3132.1 | 3488.8 | 9.3194 | 5.095 | 3131.8 | 3488.5 | 8.9991 |

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

| | | | | | | | | | | | | |
|------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Sat. | 1.694 | 2506.1 | 2675.5 | 7.3594 | 1.159 | 2519.7 | 2693.6 | 7.2233 | 0.606 | 2543.6 | 2725.3 | 6.9919 |
| 100 | 1.696 | 2506.7 | 2676.2 | 7.3614 | | | | | | | | |
| 120 | 1.793 | 2537.3 | 2716.6 | 7.4668 | 1.188 | 2533.3 | 2711.4 | 7.2693 | | | | |
| 160 | 1.984 | 2597.8 | 2796.2 | 7.6597 | 1.317 | 2595.2 | 2792.8 | 7.4665 | 0.651 | 2587.1 | 2782.3 | 7.1276 |
| 200 | 2.172 | 2658.1 | 2875.3 | 7.8343 | 1.444 | 2656.2 | 2872.9 | 7.6433 | 0.716 | 2650.7 | 2865.5 | 7.3115 |
| 240 | 2.359 | 2718.5 | 2954.5 | 7.9949 | 1.570 | 2717.2 | 2952.7 | 7.8052 | 0.781 | 2713.1 | 2947.3 | 7.4774 |
| 280 | 2.546 | 2779.6 | 3034.2 | 8.1445 | 1.695 | 2778.6 | 3032.8 | 7.9555 | 0.844 | 2775.4 | 3028.6 | 7.6299 |
| 320 | 2.732 | 2841.5 | 3114.6 | 8.2849 | 1.819 | 2840.6 | 3113.5 | 8.0964 | 0.907 | 2838.1 | 3110.1 | 7.7722 |
| 360 | 2.917 | 2904.2 | 3195.9 | 8.4175 | 1.943 | 2903.5 | 3195.0 | 8.2293 | 0.969 | 2901.4 | 3192.2 | 7.9061 |
| 400 | 3.103 | 2967.9 | 3278.2 | 8.5435 | 2.067 | 2967.3 | 3277.4 | 8.3555 | 1.032 | 2965.6 | 3275.0 | 8.0330 |
| 440 | 3.288 | 3032.6 | 3361.4 | 8.6636 | 2.191 | 3032.1 | 3360.7 | 8.4757 | 1.094 | 3030.6 | 3358.7 | 8.1538 |
| 500 | 3.565 | 3131.6 | 3488.1 | 8.8342 | 2.376 | 3131.2 | 3487.6 | 8.6466 | 1.187 | 3130.0 | 3486.0 | 8.3251 |
| Sat. | 0.3749 | 2561.2 | 2748.7 | 6.8213 | 0.2729 | 2572.5 | 2763.5 | 6.7080 | 0.1944 | 2583.6 | 2778.1 | 6.5865 |
| 180 | 0.4045 | 2609.7 | 2812.0 | 6.9656 | 0.2847 | 2599.8 | 2799.1 | 6.7880 | | | | |
| 200 | 0.4249 | 2642.9 | 2855.4 | 7.0592 | 0.2999 | 2634.8 | 2844.8 | 6.8865 | 0.2060 | 2621.9 | 2827.9 | 6.6940 |
| 240 | 0.4646 | 2707.6 | 2939.9 | 7.2307 | 0.3292 | 2701.8 | 2932.2 | 7.0641 | 0.2275 | 2692.9 | 2920.4 | 6.8817 |
| 280 | 0.5034 | 2771.2 | 3022.9 | 7.3865 | 0.3574 | 2766.9 | 3017.1 | 7.2233 | 0.2480 | 2760.2 | 3008.2 | 7.0465 |
| 320 | 0.5416 | 2834.7 | 3105.6 | 7.5308 | 0.3852 | 2831.3 | 3100.9 | 7.3697 | 0.2678 | 2826.1 | 3093.9 | 7.1962 |
| 360 | 0.5796 | 2898.7 | 3188.4 | 7.6660 | 0.4126 | 2895.8 | 3184.7 | 7.5063 | 0.2873 | 2891.6 | 3178.9 | 7.3349 |
| 400 | 0.6173 | 2963.2 | 3271.9 | 7.7938 | 0.4397 | 2960.9 | 3268.7 | 7.6350 | 0.3066 | 2957.3 | 3263.9 | 7.4651 |
| 440 | 0.6548 | 3028.6 | 3356.0 | 7.9152 | 0.4667 | 3026.6 | 3353.3 | 7.7571 | 0.3257 | 3023.6 | 3349.3 | 7.5883 |
| 500 | 0.7109 | 3128.4 | 3483.9 | 8.0873 | 0.5070 | 3126.8 | 3481.7 | 7.9299 | 0.3541 | 3124.4 | 3478.5 | 7.7622 |
| 600 | 0.8041 | 3299.6 | 3701.7 | 8.3522 | 0.5738 | 3298.5 | 3700.2 | 8.1956 | 0.4011 | 3296.8 | 3697.9 | 8.0290 |
| Sat. | 0.1318 | 2594.5 | 2792.2 | 6.4448 | 0.0996 | 2600.3 | 2799.5 | 6.3409 | 0.0667 | 2604.1 | 2804.2 | 6.1869 |
| 200 | 0.1325 | 2598.1 | 2796.8 | 6.4546 | | | | | | | | |
| 240 | 0.1483 | 2676.9 | 2899.3 | 6.6628 | 0.1085 | 2659.6 | 2876.5 | 6.4952 | 0.0682 | 2619.7 | 2824.3 | 6.2265 |
| 280 | 0.1627 | 2748.6 | 2992.7 | 6.8381 | 0.1200 | 2736.4 | 2976.4 | 6.6828 | 0.0771 | 2709.9 | 2941.3 | 6.4462 |
| 320 | 0.1765 | 2817.1 | 3081.9 | 6.9938 | 0.1308 | 2807.9 | 3069.5 | 6.8452 | 0.0850 | 2788.4 | 3043.4 | 6.6245 |
| 360 | 0.1899 | 2884.4 | 3169.2 | 7.1363 | 0.1411 | 2877.0 | 3159.3 | 6.9917 | 0.0923 | 2861.7 | 3138.7 | 6.7801 |
| 400 | 0.2030 | 2951.3 | 3255.8 | 7.2690 | 0.1512 | 2945.2 | 3247.6 | 7.1271 | 0.0994 | 2932.8 | 3230.9 | 6.9212 |
| 440 | 0.2160 | 3018.5 | 3342.5 | 7.3940 | 0.1611 | 3013.4 | 3335.5 | 7.2540 | 0.1062 | 3002.9 | 3321.5 | 7.0520 |
| 500 | 0.2352 | 3120.3 | 3473.1 | 7.5698 | 0.1757 | 3116.2 | 3467.6 | 7.4317 | 0.1162 | 3108.0 | 3456.5 | 7.2338 |
| 540 | 0.2478 | 3189.1 | 3560.9 | 7.6805 | 0.1853 | 3185.6 | 3556.1 | 7.5434 | 0.1227 | 3178.4 | 3546.6 | 7.3474 |
| 600 | 0.2668 | 3293.9 | 3694.0 | 7.8385 | 0.1996 | 3290.9 | 3690.1 | 7.7024 | 0.1324 | 3285.0 | 3682.3 | 7.5085 |
| 640 | 0.2793 | 3364.8 | 3783.8 | 7.9391 | 0.2091 | 3362.2 | 3780.4 | 7.8035 | 0.1388 | 3357.0 | 3773.5 | 7.6106 |
| Sat. | 0.04978 | 2602.3 | 2801.4 | 6.0701 | 0.03244 | 2589.7 | 2784.3 | 5.8892 | 0.02352 | 2569.8 | 2758.0 | 5.7432 |
| 280 | 0.05546 | 2680.0 | 2901.8 | 6.2568 | 0.03317 | 2605.2 | 2804.2 | 5.9252 | | | | |
| 320 | 0.06199 | 2767.4 | 3015.4 | 6.4553 | 0.03876 | 2720.0 | 2952.6 | 6.1846 | 0.02682 | 2662.7 | 2877.2 | 5.9489 |
| 360 | 0.06788 | 2845.7 | 3117.2 | 6.6215 | 0.04331 | 2811.2 | 3071.1 | 6.3782 | 0.03089 | 2772.7 | 3019.8 | 6.1819 |
| 400 | 0.07341 | 2919.9 | 3213.6 | 6.7690 | 0.04739 | 2892.9 | 3177.2 | 6.5408 | 0.03432 | 2863.8 | 3138.3 | 6.3634 |
| 440 | 0.07872 | 2992.2 | 3307.1 | 6.9041 | 0.05122 | 2970.0 | 3277.3 | 6.6853 | 0.03742 | 2946.7 | 3246.1 | 6.5190 |
| 500 | 0.08643 | 3099.5 | 3445.3 | 7.0901 | 0.05665 | 3082.2 | 3422.2 | 6.8803 | 0.04175 | 3064.3 | 3398.3 | 6.7240 |
| 540 | 0.09145 | 3171.1 | 3536.9 | 7.2056 | 0.06015 | 3156.1 | 3517.0 | 6.9999 | 0.04448 | 3140.8 | 3496.7 | 6.8481 |
| 600 | 0.09885 | 3279.1 | 3674.4 | 7.3688 | 0.06525 | 3266.9 | 3658.4 | 7.1677 | 0.04845 | 3254.4 | 3642.0 | 7.0206 |
| 640 | 0.1037 | 3351.8 | 3766.6 | 7.4720 | 0.06859 | 3341.0 | 3752.6 | 7.2731 | 0.05102 | 3330.1 | 3738.3 | 7.1283 |
| 700 | 0.1110 | 3462.1 | 3905.9 | 7.6198 | 0.07352 | 3453.1 | 3894.1 | 7.4234 | 0.05481 | 3443.9 | 3882.4 | 7.2812 |
| 740 | 0.1157 | 3536.6 | 3999.6 | 7.7141 | 0.07677 | 3528.3 | 3989.2 | 7.5190 | 0.05729 | 3520.4 | 3978.7 | 7.3782 |
| Sat. | 0.01803 | 2544.4 | 2724.7 | 5.6141 | 0.01426 | 2513.7 | 2684.9 | 5.4924 | 0.01149 | 2476.8 | 2637.6 | 5.3717 |
| 320 | 0.01925 | 2588.8 | 2781.3 | 5.7103 | | | | | | | | |
| 360 | 0.02331 | 2729.1 | 2962.1 | 6.0060 | 0.01811 | 2678.4 | 2895.7 | 5.8361 | 0.01422 | 2617.4 | 2816.5 | 5.6602 |
| 400 | 0.02641 | 2832.4 | 3096.5 | 6.2120 | 0.02108 | 2798.3 | 3051.3 | 6.0747 | 0.01722 | 2760.9 | 3001.9 | 5.9448 |
| 440 | 0.02911 | 2922.1 | 3213.2 | 6.3805 | 0.02355 | 2896.1 | 3178.7 | 6.2586 | 0.01954 | 2868.6 | 3142.2 | 6.1474 |
| 480 | 0.03160 | 3005.4 | 3321.4 | 6.5282 | 0.02576 | 2984.4 | 3293.5 | 6.4154 | 0.02157 | 2962.5 | 3264.5 | 6.3143 |
| 520 | 0.03394 | 3085.6 | 3425.1 | 6.6622 | 0.02781 | 3068.0 | 3401.8 | 6.5555 | 0.02343 | 3049.8 | 3377.8 | 6.4610 |
| 560 | 0.03619 | 3164.1 | 3526.0 | 6.7864 | 0.02977 | 3149.0 | 3506.2 | 6.6840 | 0.02517 | 3133.6 | 3486.0 | 6.5941 |
| 600 | 0.03837 | 3241.7 | 3625.3 | 6.9029 | 0.03164 | 3228.7 | 3608.3 | 6.8037 | 0.02683 | 3215.4 | 3591.1 | 6.7172 |
| 640 | 0.04048 | 3318.9 | 3723.7 | 7.0131 | 0.03345 | 3307.5 | 3709.0 | 6.9164 | 0.02843 | 3296.0 | 3694.1 | 6.8326 |
| 700 | 0.04358 | 3434.7 | 3870.5 | 7.1687 | 0.03610 | 3425.2 | 3858.4 | 7.0749 | 0.03075 | 3415.7 | 3846.2 | 6.9939 |
| 740 | 0.04560 | 3512.1 | 3968.1 | 7.2670 | 0.03781 | 3503.7 | 3957.4 | 7.1746 | 0.03225 | 3495.2 | 3946.7 | 7.0952 |

CHAPITRE 03 : LES PERFORMANCES DE CYCLE COMBINE

| T °C | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K |
|---|---------------------------|--------------|--------------|------------------|---|--------------|--------------|------------------|
| $p = 160 \text{ bar} = 16.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 347.44^\circ\text{C}$) | | | | | $p = 180 \text{ bar} = 18.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 357.06^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 0.00931 | 2431.7 | 2580.6 | 5.2455 | 0.00749 | 2374.3 | 2509.1 | 5.1044 |
| 360 | 0.01105 | 2539.0 | 2715.8 | 5.4614 | 0.00809 | 2418.9 | 2564.5 | 5.1922 |
| 400 | 0.01426 | 2719.4 | 2947.6 | 5.8175 | 0.01190 | 2672.8 | 2887.0 | 5.6887 |
| 440 | 0.01652 | 2839.4 | 3103.7 | 6.0429 | 0.01414 | 2808.2 | 3062.8 | 5.9428 |
| 480 | 0.01842 | 2939.7 | 3234.4 | 6.2215 | 0.01596 | 2915.9 | 3203.2 | 6.1345 |
| 520 | 0.02013 | 3031.1 | 3353.3 | 6.3752 | 0.01757 | 3011.8 | 3378.0 | 6.2960 |
| 560 | 0.02172 | 3117.8 | 3465.4 | 6.5132 | 0.01904 | 3101.7 | 3444.4 | 6.4392 |
| 600 | 0.02323 | 3201.8 | 3573.5 | 6.6399 | 0.02042 | 3188.0 | 3555.6 | 6.5696 |
| 640 | 0.02467 | 3284.2 | 3678.9 | 6.7580 | 0.02174 | 3272.3 | 3663.6 | 6.6905 |
| 700 | 0.02674 | 3406.0 | 3833.9 | 6.9224 | 0.02362 | 3396.3 | 3821.5 | 6.8580 |
| 740 | 0.02808 | 3486.7 | 3935.9 | 7.0251 | 0.02483 | 3478.0 | 3925.0 | 6.9623 |
| $p = 200 \text{ bar} = 20.0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 365.81^\circ\text{C}$) | | | | | $p = 240 \text{ bar} = 24.0 \text{ MPa}$ | | | |
| Sat. | 0.00583 | 2293.0 | 2409.7 | 4.9269 | | | | |
| 400 | 0.00994 | 2619.3 | 2818.1 | 5.5540 | 0.00673 | 2477.8 | 2639.4 | 5.2393 |
| 440 | 0.01222 | 2774.9 | 3019.4 | 5.8450 | 0.00929 | 2700.6 | 2923.4 | 5.6506 |
| 480 | 0.01399 | 2891.2 | 3170.8 | 6.0518 | 0.01100 | 2838.3 | 3102.3 | 5.8950 |
| 520 | 0.01551 | 2992.0 | 3302.2 | 6.2218 | 0.01241 | 2950.5 | 3248.5 | 6.0842 |
| 560 | 0.01689 | 3085.2 | 3423.0 | 6.3705 | 0.01366 | 3051.1 | 3379.0 | 6.2448 |
| 600 | 0.01818 | 3174.0 | 3537.6 | 6.5048 | 0.01481 | 3145.2 | 3500.7 | 6.3875 |
| 640 | 0.01940 | 3260.2 | 3648.1 | 6.6286 | 0.01588 | 3235.5 | 3616.7 | 6.5174 |
| 700 | 0.02113 | 3386.4 | 3809.0 | 6.7993 | 0.01739 | 3366.4 | 3783.8 | 6.6947 |
| 740 | 0.02224 | 3469.3 | 3914.1 | 6.9052 | 0.01835 | 3451.7 | 3892.1 | 6.8038 |
| 800 | 0.02385 | 3592.7 | 4069.7 | 7.0544 | 0.01974 | 3578.0 | 4051.6 | 6.9567 |
| $p = 280 \text{ bar} = 28.0 \text{ MPa}$ | | | | | $p = 320 \text{ bar} = 32.0 \text{ MPa}$ | | | |
| 400 | 0.00383 | 2223.5 | 2330.7 | 4.7494 | 0.00236 | 1980.4 | 2055.9 | 4.3239 |
| 440 | 0.00712 | 2613.2 | 2812.6 | 5.4494 | 0.00544 | 2509.0 | 2683.0 | 5.2327 |
| 480 | 0.00885 | 2780.8 | 3028.5 | 5.7446 | 0.00722 | 2718.1 | 2949.2 | 5.5968 |
| 520 | 0.01020 | 2906.8 | 3192.3 | 5.9566 | 0.00853 | 2860.7 | 3133.7 | 5.8357 |
| 560 | 0.01136 | 3015.7 | 3333.7 | 6.1307 | 0.00963 | 2979.0 | 3287.2 | 6.0246 |
| 600 | 0.01241 | 3115.6 | 3463.0 | 6.2823 | 0.01061 | 3085.3 | 3424.6 | 6.1858 |
| 640 | 0.01338 | 3210.3 | 3584.8 | 6.4187 | 0.01150 | 3184.5 | 3552.5 | 6.3290 |
| 700 | 0.01473 | 3346.1 | 3758.4 | 6.6029 | 0.01273 | 3325.4 | 3732.8 | 6.5203 |
| 740 | 0.01558 | 3433.9 | 3870.0 | 6.7153 | 0.01350 | 3415.9 | 3847.8 | 6.6361 |
| 800 | 0.01680 | 3563.1 | 4033.4 | 6.8720 | 0.01460 | 3548.0 | 4015.1 | 6.7966 |
| 900 | 0.01873 | 3774.3 | 4298.8 | 7.1084 | 0.01633 | 3762.7 | 4285.1 | 7.0372 |

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Basée sur les principes de la thermodynamique du transfert de chaleur et de la mécanique des fluides, des calculs détaillés ont été effectués pour déterminer toutes les propriétés énergétiques des différents éléments de l'installation combiné de Cap-Djinet.

Les résultats de calculs thermodynamique repose sur des données pratique montrent que le rendement thermique d'installation combine et très largement supérieur que celui des cycles simples.

Une fois la chaudière de récupération est installée on récupéré la moitié de la puissance de la turbine à gaz. On va essayer de réculé une grande partie de gaz brulée mais pas lissée l'énergie c'est à dire sans aller dans l'air (par exemple c'est on a groupe de 200 MW ont récupéré 100 MW en cour de la journée).

Il faut que la température de gaz soit inférieure à 120°C pour récupérer le max de la chaleur et qu'elle soit supérieur à 90°C pour éviter la condensation de souffre qui attaque directement le calorifique

Il est préférable de toujours opter pour le cycle combiner en but d'éviter le gaspillage de gaz.

En basculant vers le cycle turbine simple on aura minimisé la consommation excessive au premier lieu et optimiser la consommation à l'échelle national au seconde en récupérant la chaleur perdue dans l'air.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Documentation d'école technique de Sonelgaz IFEG à Blida
- [2] Documentation de la centrale cab-djinet à Boumerdes
- [2] Manuels d'exploitation RDJPP
- [3] Mémoire de fin d'étude : système de refroidissement de la centrale hybride de hassi rmel
sppi
- [4] Cours conversion 1 3
- [5] Rapport de performance
- [6] <https://www.abcclim.net/diagramme-mollier.html>
- [7] https://thesciencepan.com/the-ideal-reheat-rankine-cycle/?fbclid=IwAR1Q71yk7SK0U9A13UqF8ZspZzuPURaPeMHiC2GaTvAqU2mKd6y_UpxqLJc
- [8] <https://www.dcode.fr/lagrange-interpolation-polynome>
- [9] Livre : THERMODYNAMICS (An Engineering Approach) Eighth Edition
- [9] Livre : APPLIED THERMODYNAMICS (ONKAR SINGH) NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS

LA LISTE DES FIGURES

LA LISTES DES FIGURES

- Figure 1-1 : Répartition des sources d'énergie dans le monde
- Figure 1-2 : Centrale thermique à gaz
- Figure 1-3 : Fonctionnement d'une centrale thermique à Turbine à gaz
- Figure 1-4 : Centrale thermique à Turbine à vapeur
- Figure 1-5 : Fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur (TV)
- Figure 1-6 : Fonctionnement d'une centrale à cycle combiné (TG/TV)
- Figure 1-7 : Centrale thermique Diesel
- Figure 1-8 : Centrale éolienne de « wayfinder flickr » (Californie)
- Figure 1-9 : Centrales solaires photovoltaïque
- Figure 2-1 : La centrale cap-djinet
- Figure 2-2 : schéma présentable de la centrale
- Figure 2-3 : Image présentable des cheminées et HRSG et le département de la turbine
- Figure 2-4 : Schéma de la ligne d'arbre.
- Figure 2-5 : Fonctionnement des turbines (gaz et vapeur) et la HRSG
- Figure 2-6 : Turbine à gaz
- Figure 2-7 : Turbine Série SST-3000 (schématique, irresponsabilité d'exactitude et de complétude)
- Figure 2-8 : Schéma présente le montage de générateur entre la turbine
- Figure 2-9 : Vu Générale d'une unité (TG-Générateur-TV...)
- Figure 2-10 : Vu générale d'une tranche de la centrale
- Figure 2-11 : Schéma présente l'emplacement de condenseur
- Figure 2-13 : Fonctionnement de cycle combiné
- Figure 2-12 : Fonctionnement de cycle combiné RDPP
- Figure 3-1 : Cycle thermodynamique théorique d'une turbine à gaz.
- Figure 3-2 : Cycle réel d'une turbine à gaz.
- Figure 3-3 : Représentation de la notion de travail d'un compresseur.
- Figure 3-4 : exemple de diagramme de Mollier
- Figure 3-5 : diagramme de Mollier [6]
- Figure 3-7 : Cycle Hirn sans soutirage et avec resurchauffe [7]
- Figure 3-8 : Cycle Hirn sans soutirage et avec resurchauffe [7]
- Figure 3-9 : interpolation de la grange [8]
- Figure 3-10 : calcule d'enthalpie par l'interpolation linéaire [8]

LA LISTE DES FIGURES

Figure 3-11 : diagramme de Mollier [6]

Figure 3-12 : Cycle combine gaz-vapeur [9]

Les Tableau

Les Tableau

Tableau 3-1 : de paramètres du calcule de cycle combine

Tableau 3-2 de comparaison de consommation spécifique entre 2019 et 2021

Table 3-3 : (T-2) propriétés de l'eau saturée (liquide vapeur) : tableaux des températures [4]

Table 3-4 : T-3 propriétés de l'eau saturée (liquide vapeur) : tableau de pression [4]

Table 3-5 : T-4 : propriétés de la vapeur d'eau surchauffée [4]

NOMENCLATURE

| <i>Symbol</i> | <i>Definition</i> | <i>Unité</i> |
|-----------------------|--|--------------|
| c_p | Capacité thermique massique isobare | (J/Kg k) |
| H | Enthalpie massique | (J/Kg K) |
| P | Pression | (bar) |
| P | Puissance mécanique | (W) |
| P_{Ci} | Pouvoir calorifique inferieur | (kJ/Kg) |
| Q | Quantité de chaleur | (J/Kg) |
| R_{air} | Constant de l'air | (J/Kg k) |
| T | Température | (°C) |
| W | Travail | (J/Kg) |
| <i>symboles grecs</i> | | |
| η_{cc} | Rendement Cycle combiné | |
| η_g | Rendement de turbine à gaz | |
| η_s | Rendement de Turbine à vapeur | |
| η_{tv} | Rendement de turbine à vapeur de cycle combine | |
| \square | Taux de compression | |
| γ | Coefficient polytropique | |
| <i>Les indices</i> | | |
| <i>c-c</i> | <i>Chambre de combustion</i> | |