



Mémoire de fin d'études

Master Electrotechnique, Option Machines électriques

Étude de l'influence du changement de la pression d'extraction sur les performances du groupe turbo-alternateur de Cevital

Présenté par :

- YOUSFI Ahmed
- ZERKAK Houria

Promoteur :

- K. ALITOUCHE

Encadrant Entreprise :

- K. YAYA

Remerciement

A l'issue de ce travail, nous adressons nos remerciements premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, le courage, la patience et la force qu'il nous a donné durant toute la période d'étude.

Nous remercions particulièrement l'encadreur de stage monsieur YAYA KHODIR pour sa disponibilité, ses conseils et pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long du projet.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur K.ALITOUCHE pour avoir dirigé ce travail, et pour sa disponibilité, ses conseils pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail, son expérience et sa connaissance ont contribué à notre formation scientifique.

Nos remerciements sont distingués aussi à tous les enseignants du département génie électrique qui ont contribués à notre formation durant ces années d'études.

Nos vifs remerciements au membre de jurys de bien vouloir accepter d'évaluer notre travail.

Dédicace

Du profond de mon cœur je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chère.

A mes chers parents

En témoignage de reconnaissance et ma gratitude pour tous les efforts et sacrifices qu'ils n'ont cessés de faire afin que je puisse poursuivre mes études.

A mes chers frères

Je voudrais exprimer à travers ces quelques lignes tout l'amour et toute l'affection que j'ai pour vous Mounir, Lamine, Sabri et Rayan

A mes chers cousins

Vos soutien et encouragement dans les bons et mauvais moments m'ont toujours donné la force, Sofiane et Nassim, je vous remercie infiniment.

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes mes années d'études.

Y.AHMED

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercier pour tous le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulé, le fruit de vos innombrable sacrifices, puisse dieu, le très haut, vous accorde, santé, bonheur et longue vie.

A mon cher père

A mon cher père, qui m'as toujours poussé et motivé dans mes études, qui ma donnée toute sa confiance depuis mon enfance.

A mes chers frères et sœurs

Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour, pour me donner la force et le courage.

A mes chères cousines et mes amis

Vos soutient et encouragement dans les bons et mauvais moments mont toujours donner la force, je vous remercie infiniment.

Merci à Slimane, Lily, Hmimi, Nabil, Taher, je vous offre cette magnifique dédicace d'amitié.

Z.HOURIA

Sommaire

Introduction générale.....	5
Chapitre I : Généralités sur la cogénération	6
I.1 Introduction	7
I.2 Les centrales thermiques	7
I.2.1 Description.....	7
I.2.2 Différents types.....	8
I.3 Présentation de la cogénération.....	8
I.3.1 Définition.....	8
I.3.2 Principe de la cogénération.....	9
I.3.3 Centrale de cogénération	9
I.3.4 Ressources énergétiques de la cogénération.....	10
I.3.5 Principe de base	10
I.3.5.a Génération électrique.....	10
I.3.5.b Génération thermique	11
I.3.5.c Avantages et inconvénients de la centrale thermique	11
I.3.6 Différentes technologies de cogénération.....	11
I.3.7 Intérêt de la cogénération.....	12
I.3.8 Grandes familles de cogénération.....	12
I.3.9 Contexte de production de l'énergie par une centrale de cogénération.....	13
I.3.10 Rendement exégétique d'une cogénération	13
I.3.11 Techniques de cogénération	14
I.3.11.a Technologies courantes	14
I.3.11.b Groupe turbo-alternateur.....	14
i. Turbine à vapeur.....	14
ii. Turbine à gaz	16
I.3.11.c Moteur à piston	19
I.3.11.d La chaudière	20
i. Description	20
ii. Fonctionnement	20
iii. Différents types de chaudières	20
I.3.11.e. Les condenseurs	21
i. Description	21

ii. Le rôle d'un condenseur	22
iii. Le poste d'eau	22
I.3.11. Description de L'alternateur	22
I.3.12 Avantages de la centrale de cogénération.....	24
I.3.12.a Avantages économiques.....	24
I.3.12.b Avantages sociaux	24
I.3.12.c Avantages environnementaux	24
1.4 Conclusion	25
Chapitre II : Les principales sources utilisées dans la cogénération	26
II.1 Introduction.....	27
II.2 Présentation du complexe agro-alimentaire Cevital-Bejaia.....	27
II.2.1 Historique	27
II.2.2 Situation géographique.....	27
II.2.3 Activités de Cevital	28
II.2.4 Mission et objectifs	28
II.2.5 Différents organes constituant le complexe Cevital.....	29
II.2.6 Unité énergie et utilités	30
II.3 Cogénération groupe CEVITAL.....	30
II.4 Description de la centrale thermique de CEVITAL	31
II.5 Description de la centrale cogénération CEVITAL.....	31
II.5.1 Partie production de vapeur.....	32
II.5.1.1 Les principales sources utilisées	32
II.5.1.2 L'eau ultra pure	32
II.5.1.3 Alimentation en air des bruleurs	32
II.5.1.4 La bâche alimentaire	32
II.5.1.5 La chaudière (Générateur de vapeurs)	33
II.5.1.6 Fonctionnement de la chaudière	34
II.5.2 Partie production d'électricité	34
II.5.2.1 Groupe turbo-alternateur	35
II.5.2.1.1 La turbine	36
II.5.2.1.2 Réducteur	38
II.5.2.1.3 Alternateur	40
II.5.2.1.4 Transformateur.....	44

II.6 Conclusion	45
ChapitreIII : Calcul des rendements du Complexe	46
III.1 Introduction	47
III.2 Aspect thermodynamique	47
III.2.1 Application thermodynamique.....	47
III.2.1.1. Application du premier principe dans un système ouvert	47
II.2.1.1.a. Cas d'une turbine :	48
II.2.1.1.b. Cas d'une pompe :	48
III.2.1.2. Changement de phase.....	48
III.2.1.3 : Rappel sur les diagrammes thermodynamiques.....	49
II.2.1.3.a. Diagramme PV.....	49
II.2.1.3.b. Diagramme TS	49
II.2.1.3.c. Diagramme HS	49
III.2.2 Cycles des centrales à vapeur.....	50
III.2.2.1 Cycle de Rankine.....	50
III.2.2.2 Cycle de Hirn	51
III.2.2.3 Cycle de resurchauffe.....	51
III.2.2.4 Cycle à soutirage	52
III.3. Cycle thermodynamique de la cogénération au niveau Cevital	52
III.3.1 Présentation de cycle de Hirn.....	53
III.3.2 Interprétation du Cycle.....	53
III.4 Détermination des caractéristiques thermodynamiques	54
III.4.1 Calculs au débit minimal	54
III.4.1.1 Détermination des enthalpies aux différents points du cycle	55
III.4.1.2 Calcul des différentes quantités énergétiques	56
III.4.1.3 Rendement thermodynamique	56
III.4.1.4 Calcul du rendement de l'alternateur	57
III.4.2 Cas d'un débit maximal	57
III.4.2.1 Détermination des enthalpies aux différents points du cycle	57
III.4.2.2 Calcul des différentes quantités énergétiques	59
III.4.2.3 Rendement thermodynamique.....	59
III.4.1.4 Calcul du rendement de l'alternateur	59
III.4.3 Interprétation des résultats	60

III.5 Performance du groupe turboalternateur	61
III.5.1 Caractéristique de fonctionnement	61
III.5.2 Courbe de performances	61
III.5.3 Courbe de température d'échappement.....	62
III.5.4 Commentaire sur les courbes	63
III.5.5 Courbes de correction des performances	63
III.5.1.1 Commentaire sur les courbes	65
III.5.5.2 Application des courbes de correction	66
III.5.5.3 Calcul de consommation spécifique corrigé	67
III.5.5.3.1 Au point mesuré.....	67
III.5.5.3.2 Au point maximal	67
III.5.5.3.3 La comparaison.....	67
III.5.6 Etude expérimentale du groupe par rapport à une pression de 3,2 bar.....	68
III.5.6.1 Courbe de fonctionnement instantané du GTA pendant le mois janvier (voir annexe B)	68
III.5.5.6.2 Commentaires sur les courbes.....	71
III.6 Conclusion	71
Conclusion générale	72
Liste des tableaux	91
Liste des figures	92
Chapitre I	92
Chapitre II	92
Chapitre III.....	93
Références bibliographiques	95

Introduction générale

L'énergie électrique se définit comme étant la capacité d'un système à produire un travail. C'est ce qui fait fonctionner les choses. Elle a marqué d'une façon considérable le mode de vie de l'homme, elle est devenue l'une des sources d'énergie les plus courantes dans sa vie quotidienne.

L'énergie électrique est obtenue par la transformation d'énergie mécanique engendrée par une turbine à gaz, une turbine à vapeur dans les centrales thermique ou par turbine hydroélectrique dans les centrales hydrauliques. Cette énergie mécanique représente la grandeur de sortie de la turbine et la grandeur d'entrée de l'alternateur et le couplage entre turbine et alternateur s'appelle turbo-alternateur.

Dans les centrales thermiques, le gaz est brûlé dans les chambres de combustion en présence d'air comprimé pour produire des gaz chauds. Ces gaz chauds sous pression, entraînent la turbine à une vitesse de 3900tr/min. L'énergie mécanique qui est fournie par la turbine est transformée en énergie électrique par l'alternateur. Les gaz chauds sont, ensuite, dirigés vers l'échappement.

L'objectif de ce travail est de faire augmenter la pression d'échappement du groupe turbo alternateur de 3.7 bar qui est limité par le constructeur à 4.2 bar pour les besoins du complexe CEVITAL et de calculer le rendement du groupe.

Pour atteindre cet objectif notre mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les turbines.

Dans le second chapitre on présentera une étude théorique de l'alternateur.

Et le dernier chapitre sera dédié à l'étude expérimentale et comparative des performances de la centrale thermique de Cevital, pour deux pressions d'admission différentes.

Chapitre I

Généralités sur la

cogénération

I.1 Introduction

La production d'électricité à partir des centrales thermiques est l'un des moyens les plus efficace et les plus répondu dans le monde, vu leurs capacités de production d'une façon rapide et efficace. En effet, il existe plusieurs types de centrales thermiques distinguées à partir de la source de chaleur utilisée.

Ce chapitre aborde en premier lieu le contexte énergétique actuel et la description générale des centrales de production d'énergie. Notre intérêt est porté sur la filière cogénération, en énergies thermique et électriques. Les centrales de cogénérations de différentes technologies sont en permanente évolution afin d'améliorer le rendement énergétique et la qualité de l'énergie produite. A cet effet, les structures les plus couramment utilisées dans les centrales de cogénération basées sur les turbines à vapeur, les turbines à gaz, moteur à piston, chaudière et le condenseur sont abordées. En second lieu, nous présentons une installation de cogénération, les éléments de cette installation et leurs principes de fonctionnement.

I.2 Les centrales thermiques

I.2.1 Description

Une centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Cette source peut être un combustible brûlé (gaz naturel, certaines huiles minérale, charbon, déchets industriel, déchets ménagers), ou la chaleur dégagée par la fission de noyaux d'uranium 235 ou plutonium 239.

La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux, afin d'entrainer une turbine accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique.

Pour entraîner la turbine, il faut que la pression soit plus faible à sa sortie qu'à l'entrée. La baisse de pression à la sortie de la turbine est obtenue en condensant le gaz, en aval de la turbine, à l'aide d'une source de froid.

Le fluide condensé est en général réutilisé comme source de vapeur et effectue un cycle thermodynamique fermé.

I.2.2 Différents types

Les centrales thermiques se répartissent en trois grandes catégories, selon la nature de leurs sources de chaleur :

- Centrales récupérant de la chaleur préexistante (solaire, géothermique)
- Centrales à flamme (charbon, fioul ou gaz)
- Centrales nucléaires

I.3 Présentation de la cogénération

I.3.1 Définition

La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Elle se base sur le fait que la production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) dégage une grande quantité de chaleur habituellement inutilisée. La cogénération valorise cette chaleur afin d'atteindre un rendement énergétique global pouvant atteindre 85%.

Une installation classique obtient un rendement électrique d'environ 35%, tandis que le reste de l'énergie (65%) est perdu sous forme de chaleur. Dans un système en cogénération, 30 à 35% de l'énergie primaire est transformée en électricité grâce à un alternateur, tandis que 65% se retrouve sous forme de chaleur, dont 50 à 55% est récupérée pour chauffer un circuit d'eau au travers d'un échangeur. Cette eau peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, de l'eau chaude sanitaire, ou pour des procédés industriels. L'électricité produite sera quant à elle consommée sur place ou revendue sur le réseau électrique public [1].

La cogénération permet aussi d'optimiser la consommation du combustible initial et de réduire les rejets de gaz à effet de serre. Toutefois, les installations de cogénération doivent produire au plus près des lieux de consommation car la chaleur se transporte mal.

La cogénération peut être utilisée à grande échelle (installations industrielles, centrales électrothermiques), ainsi qu'à petite échelle : dans le résidentiel, la micro-cogénération peut produire une base de chaleur et d'électricité.

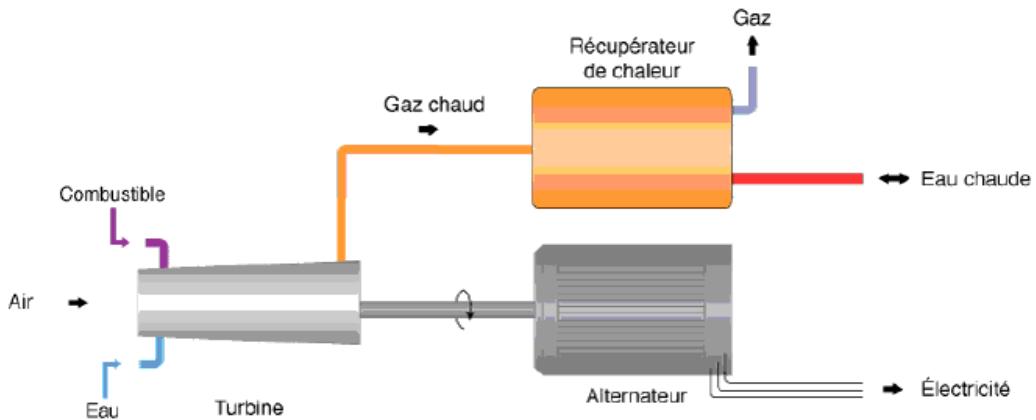


Figure I.1 : Principe de fonctionnement de la cogénération.

I.3.2 Principe de la cogénération

Cette technique, réservée aux industriels pouvant produire de grandes quantités de vapeur, permet de produire de l'électricité lorsque la vapeur est produite en excédent. Ainsi, la consommation est régularisée par conversion énergétique.

L'énergie thermique (chaleur) et l'énergie mécanique. (Figure I.2) [2-3].

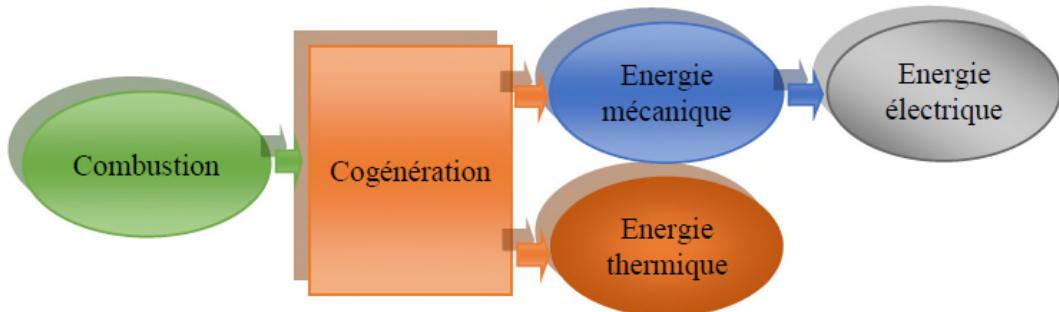


Figure I.2 : Schéma du principe général de la cogénération.

I.3.3 Centrale de cogénération

La chaleur Q_{utile} et le travail C_m à partir de l'énergie primaire du combustible. Les équipements de production d'énergie sont habituellement activés par la combustion de pétrole, de gaz naturel ou de biomasse. Une partie de la chaleur de combustion qui n'a pu être convertie en électricité peut être récupérée pour répondre aux besoins de charges thermiques locales : chauffage de bâtiments ou utilisation dans les procédés industriels.

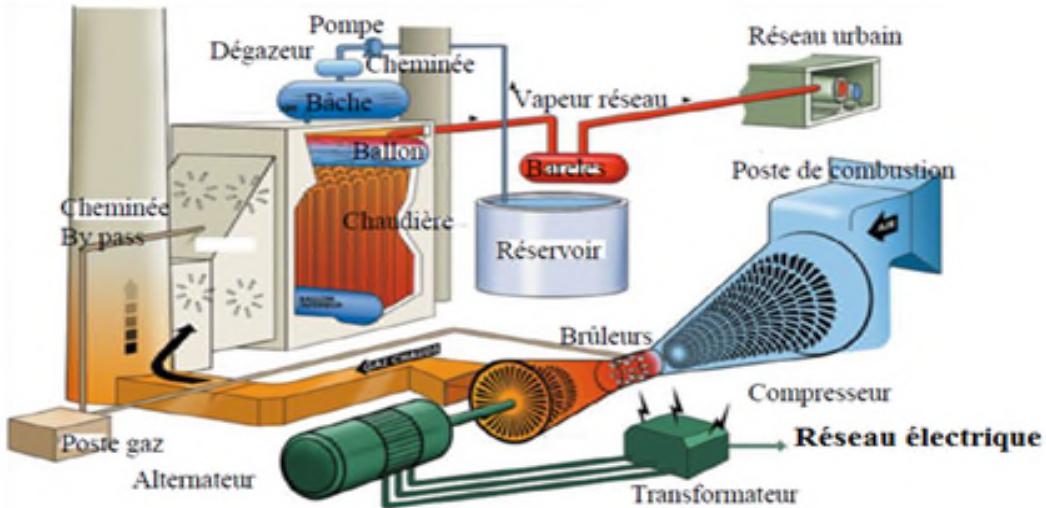


Figure I.3 : Schéma d'une centrale de la cogénération à cycle combiné

I.3.4 Ressources énergétiques de la cogénération [4]

Les ressources de la cogénération sont des sources non-renouvelables, contrairement aux énergies solaires, hydroélectriques, éoliennes Etc. Les énergies fossiles résultent d'une accumulation d'énergie solaire captée par des êtres vivants pendant des millions d'années.

Elles regroupent trois sources d'énergie que l'on connaît bien :

- Le charbon ;
- Le gaz naturel ;
- Pétrole ;

I.3.5 Principe de base

La plupart des consommateurs ayant des besoins de chaleur ont aussi des besoins d'électricité. Ces deux formes d'énergie finale sont généralement produites séparément :

- La chaleur à partir d'une chaudière à haut rendement ;
- L'électricité prélevée du réseau alimenté par des centrales électriques diverses ;

La cogénération permet d'obtenir ces deux énergies dans la même installation comme citée ci-dessous [5].

I.3.5.a Génération électrique

L'électricité est produite par la conversion de l'énergie mécanique du moteur ou de la turbine, au travers d'un alternateur. Pour générer une tension, l'alternateur doit entraîner par un moteur ou par une turbine et au même temps excité soit par du courant continu ou des aimants permanents [5].

I.3.5.b Génération thermique

Dans une centrale de production électrique la quasi-totalité de l'énergie consommée est transformée en chaleur, cette dernière est considérée habituellement comme un déchet inexploité.

La cogénération consiste à récupérer au mieux cette énergie, afin de la valoriser pour atteindre un rendement total pouvant aller jusqu'à 80-90%. Dans le cas des turbines à gaz comme des moteurs à combustion, il est possible de récupérer une partie de la chaleur en sortie sous forme de vapeur haute pression et haute température pour une utilisation industrielle.

Les principaux moyens d'utilisation de cette chaleur sont la production de vapeur, la production d'eau chaude et la production d'air chaud [5].

I.3.5.c Avantages et inconvénients de la centrale thermique

➤ Avantages

*L'énergie thermique permet de produire de l'énergie électrique.

*Elle est, souvent, plus puissante que les autres types de centrales.

*L'emplacement de la centrale peut être à proximité d'un lieu où la consommation est forte.

*La production d'énergie est relativement indépendante des conditions météorologiques.

*La source d'énergie peut être facilement stockée et la puissance est très élevée.

➤ Inconvénients

*Les ressources de charbon s'épuisent.

*La dépendance des mines de charbon ou de sources de gaz.

*La pollution de l'air due à ce type de centrales est très importante malgré les efforts liés à la désulfurisation.

I.3.6 Différentes technologies de cogénération

Le terme de cogénération est générique et définit un principe qui se décline en différentes technologies. Parmi elles, on peut citer :

- Moteur à piston ;
- Turbine à vapeur ;
- Turbine à gaz ;
- Pile à combustible.

Chaque installation de cogénération est caractérisée par son type de combustible, un rendement de travail, la quantité et la température de la chaleur récupérable. Une caractéristique importante d'une installation de cogénération est connue sous le nom

chaleur/force pour un certain point de fonctionnement choisi ; ce terme désigne le rapport entre la puissance contenue dans la chaleur et la puissance électrique [6].

I.3.7 Intérêt de la cogénération [7]

L'intérêt d'une production locale de chaleur et d'électricité dans une unité intégrée peut être résumé dans les points suivants :

- Bénéficier des rejets thermiques qui peuvent servir à des procédés industriels, chauffages des locaux, production d'eau chaude, etc.
- Point de vue financier, il est possible d'atteindre des rendements globaux de cogénération (thermiques+électriques) de 80% à 90% alors qu'un rendement électrique ne dépasse pas 40% dans une centrale électrique (Figure I.4).
- L'utilisation de cette technologie, est une solution pour réduire les émissions des gaz à effet de serre.

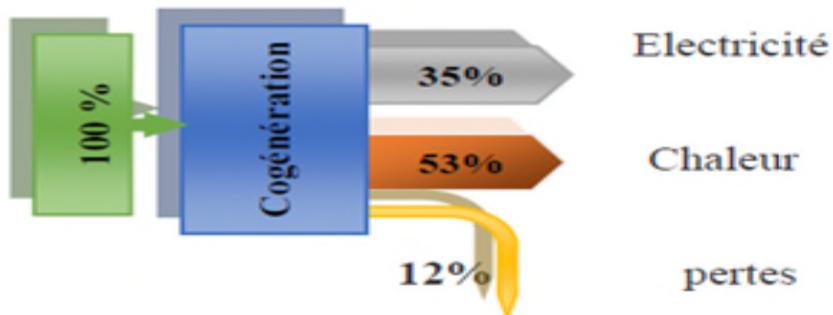


Figure I.4 : Comparaison entre la production conventionnelle séparée et la cogénération [7]

I.3.8 Grandes familles de cogénération [8]

La cogénération rassemble trois grandes familles qui se distinguent essentiellement en fonction de leurs puissances :

- La cogénération : elle fonctionne sur de fortes puissances (au-delà de 500 kW à 600 MW) ;
- La mini-cogénération : les puissances sont comprises entre 36 et 250 kW ;
- La micro-cogénération : 0,01 kW à 36 kW.

On peut regrouper les installations de cogénération en trois classes :

* $\mathbf{P}_{\text{usine}} \geq \mathbf{P}_{\text{cogé}}$: les installations "chaleur-force" où la chaleur constitue le produit de base, l'électricité n'étant qu'un sous-produit permettant de mieux valoriser le combustible. C'est le cas des usines grosses consommatrices de chaleur ou des centrales de chauffage. La priorité

Chapitre I| Généralités sur la cogénération

est accordée à la fourniture de la chaleur. Dans ce cas, la force motrice sera supérieure à celle nécessaire à l'usine : l'électricité, facilement transportable, est alors valorisée par revente des excédents sur le réseau ;

* $P_{\text{usine}} = P_{\text{cogén}}$: les installations à "énergie totale" qui cherchent à assurer l'autonomie sur le plan électrique, la chaleur étant le sous-produit. Il s'agit généralement d'usines non reliées au réseau ou de navires par exemple ;

* $P_{\text{usine}} \leq P_{\text{cogé}}$: les installations non autonomes, sous-dimensionnées pour des raisons économiques, pour lesquelles un complément est assuré, pour l'électricité par le réseau, et pour la chaleur par une chaufferie classique d'appoint. L'installation ne fonctionne que quand les tarifs de l'électricité sont élevés et les besoins de chaleur importants. Ce type d'installation est assez fréquent, car c'est souvent celui qui conduit au meilleur bilan financier pour l'entreprise [9].

I.3.9 Contexte de production de l'énergie par une centrale de cogénération

Dans une centrale de cogénération à turbine à vapeur, on distingue trois zones essentielles de conversion d'énergie (figure I.5)

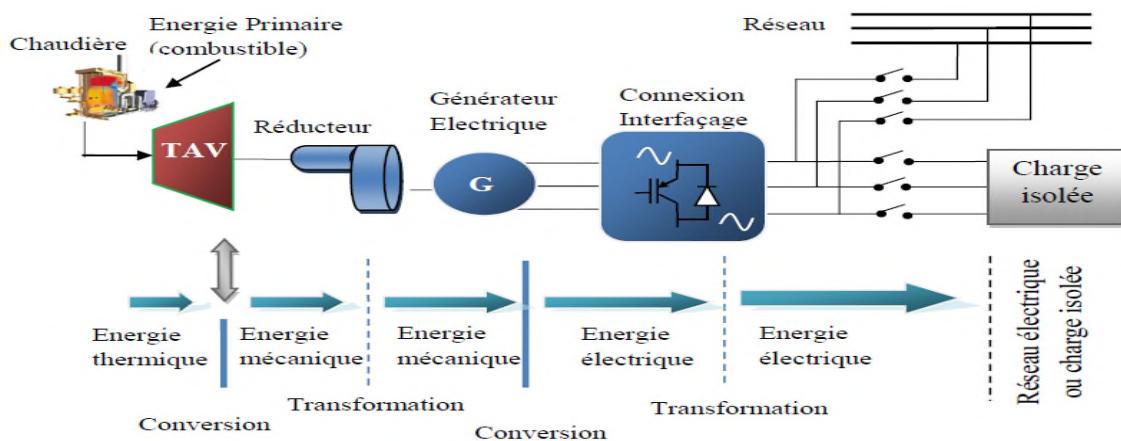


Figure I.5 : Chaîne de transformation d'énergie d'une centrale de cogénération

I.3.10 Rendement exégétique d'une cogénération

La méthode la plus correcte pour caractériser les performances d'une installation de cogénération est d'utiliser le rendement exégétique. Si la chaleur utile a été fournie à une température T , le rendement exégétique est égal : $\alpha_{\text{ex}} = \alpha_E + \alpha_{\text{th}} (1 - T/T_0)$ [10].

I.3.11 Techniques de cogénération

I.3.11.a Technologies courantes

Les installations de force motrice classiques les plus utilisées pour les applications de cogénération sont du type turbine à vapeur, turbine à gaz et moteur à piston.

I.3.11.b Groupe turbo-alternateur

Par définition, un turbo-alternateur est l'accouplement d'une turbine à un alternateur en vue de transformer l'énergie de la vapeur en énergie mécanique au niveau de la turbine, de manière à faire tourner l'alternateur. Ce dernier à son tour transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'alternateur entraîné par la turbine à vapeur est couplé par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique afin d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse synchrone de l'alternateur (Figure I.6).

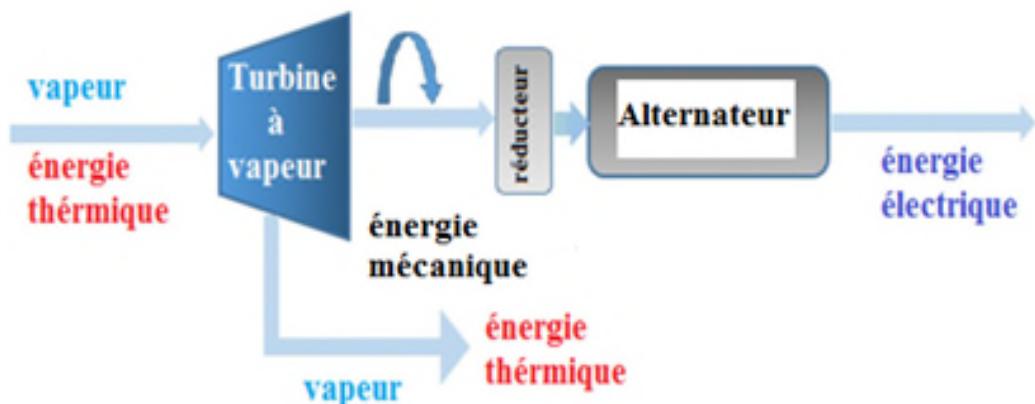


Figure I.6 : schéma simplifié du groupe turbo-alternateur.

i. Turbine à vapeur

Cette technique, réservée aux industriels pouvant produire de grandes quantités de vapeur, permet de produire de l'électricité lorsque la vapeur est produite en excédent, permettant de régulariser sa consommation, par conversion énergétique. C'est aussi la principale technique utilisée dans les grosses centrales électriques, nucléaires ou à combustibles fossiles, pour convertir l'énergie thermique du combustible en électricité (figure 7)

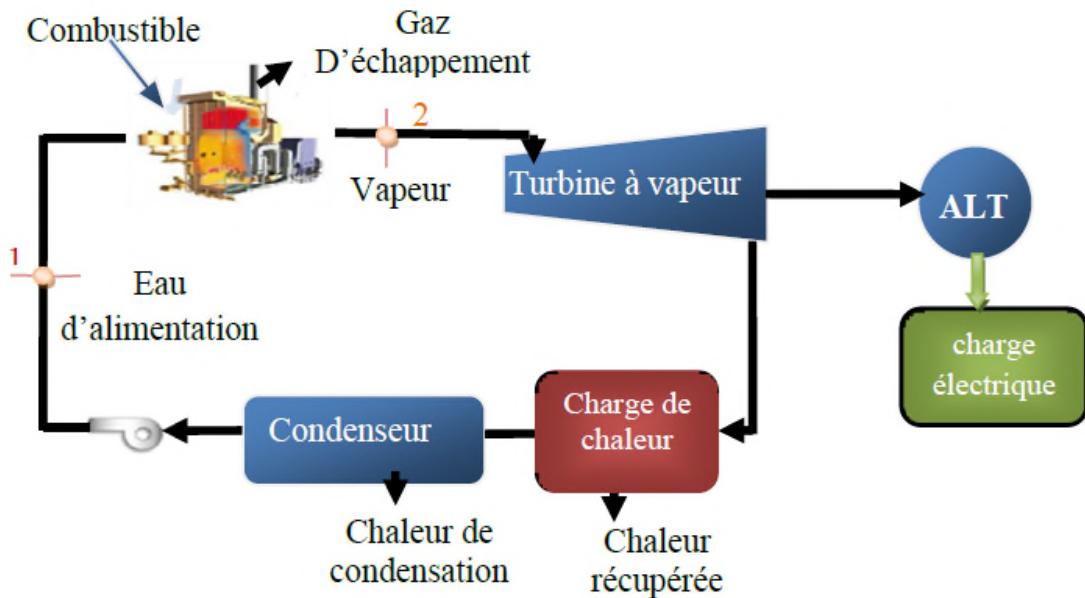


Figure I.7 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de la TAV

La cogénération par turbine à vapeur permet d'utiliser des sources d'énergie primaires variées, dont entre autres les sources d'énergie diverses issues de la valorisation des déchets de l'industrie, de l'incinération des déchets ménagers ou de la biomasse. Elles sont présentes dans les centrales électriques courantes. Le schéma de principe est représenté dans la figure (I.7). Plus la qualité de vapeur mise à disposition augmente, plus la puissance mécanique livrée par la turbine diminuera. Selon les pressions et les températures choisies au courant du processus, le rapport chaleur/force peut adopter des valeurs allant de 3 à 4[10].

Différents types de turbines à vapeur

- Les turbines à condensation.
- Les turbines à contre-pression.
- Les turbines à soutirage et condensation.
- Les turbines à sous tirage et contre pression.

Avantages et inconvénients[11]

Le tableau (I) donne les principaux avantages et inconvénients de la technologie à base des turbines à vapeur (TAV).

Avantages	Inconvénients
Convient à tous types de combustibles	Peu intéressant pour les faibles besoins de chaleur
Très bon rendement global	Investissement élevé
Coût d'entretien modique	Fonctionnement quasi-continu
Durée de vie élevée	
Convient bien lorsque les besoins de vapeur sont nettement plus importants que les besoins électriques.	

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'une turbine à vapeur

Cogénération à base des turbines à vapeur

Le cycle de Rankine (de William J. Rankine, ingénieur et physicien écossais, 1820–1872) est le cycle de base des machines thermodynamique utilisant de l'eau comme fluide de travail dans les centrales thermiques, classiques ou nucléaires (figure I.8)

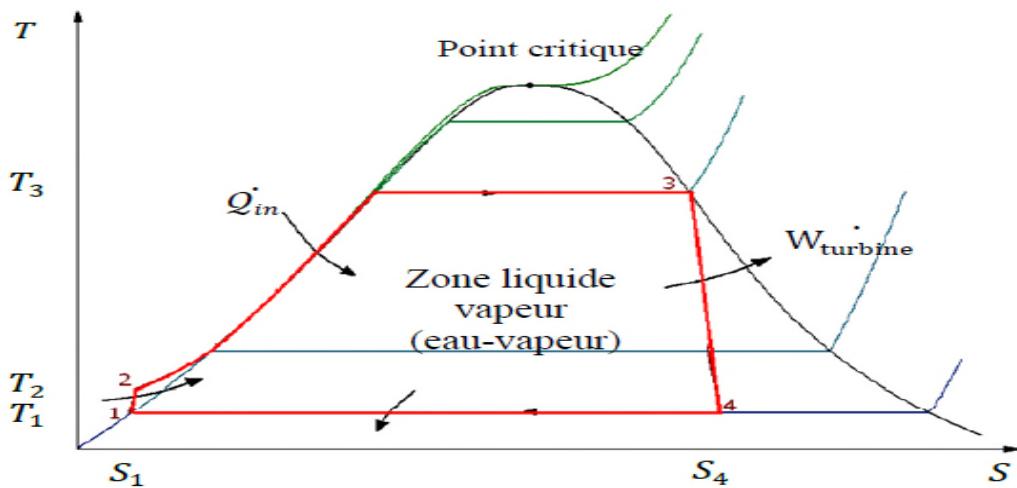


Figure I.8 : Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme T-S de l'eau. [12]

ii. Turbine à gaz

Il s'agit d'une technologie dérivée des réacteurs d'avion. Le combustible (généralement du gaz naturel) est brûlé dans une chambre de combustion alimentée en air sous pression en provenance d'un compresseur. Les gaz produits sont introduits dans une turbine où leur

Chapitre I| Généralités sur la cogénération

énergie thermique est transformée en énergie mécanique pour l'entraînement du compresseur d'air et d'un générateur d'électricité (figure I.9).

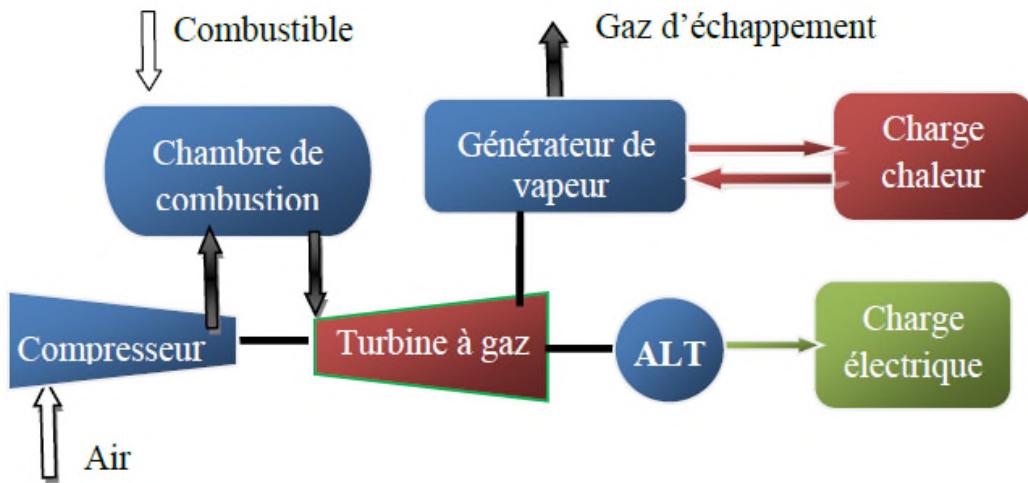


Figure I.9 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de turbine à gaz

Différents types de turbine à gaz

Une turbine à gaz comporte une ou deux lignes d'arbre pour l'ensemble des éléments tournants :

- Une ligne d'arbre

Le système est entraîné d'abord par un moteur jusqu'à une certaine vitesse, ensuite c'est la turbine HP qui continue l'entraînement de l'ensemble des éléments (Figure I.10)

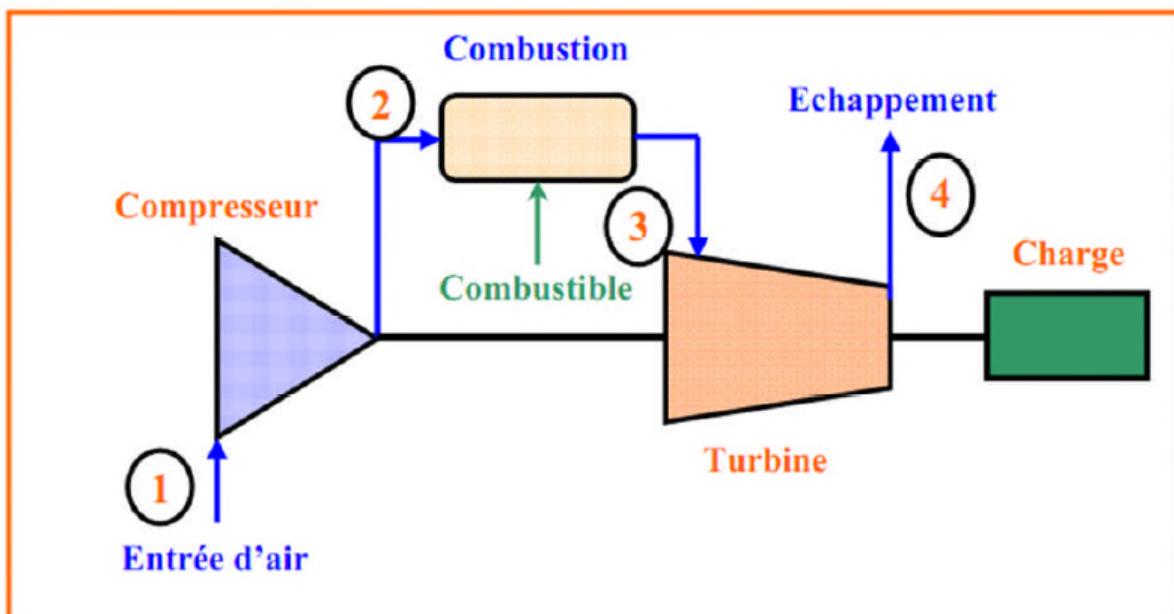


Figure I.10 : Schéma d'une turbine à gaz à une ligne d'arbre

Chapitre I| Généralités sur la cogénération

- Deux lignes d'arbre

La conception à deux lignes d'arbres représente la maximum souplesse et, est retenue pour les applications de grande puissance. (Figure I.11)

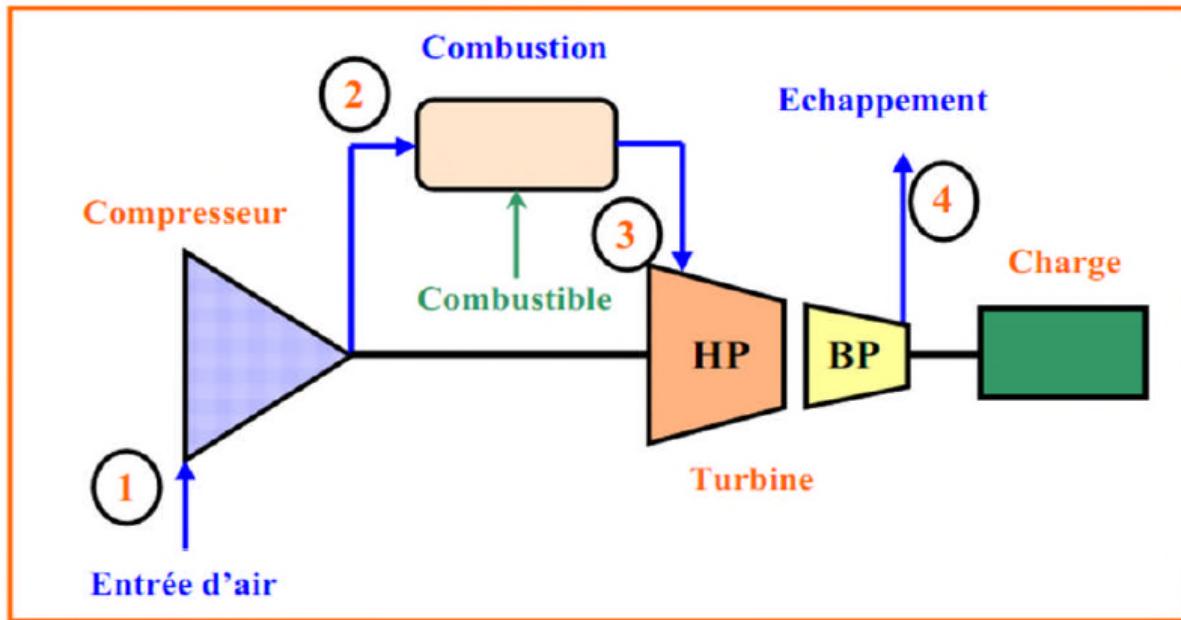


Figure I.11 : Schéma d'une turbine à gaz à deux lignes d'arbres

Cogénération à base des turbines à Gaz

Le cycle de Joule, appelé cycle de Brayton, est le cycle de base des machines thermique utilisant de l'air comme fluide de travail dans les centrales thermiques à base des turbines à gaz figure (1.12).

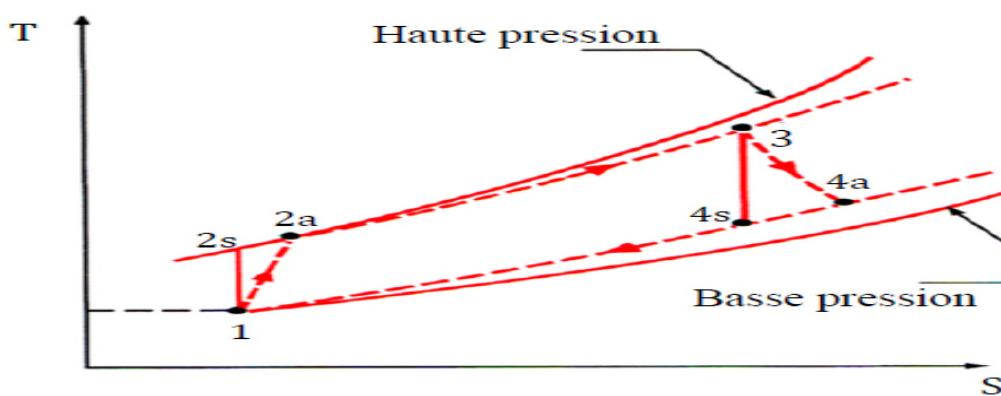


Figure I.12 : Cycle d'une turbine à gaz idéal-Cycle [13].

I.3.11.c Moteur à piston

Les moteurs diesel servent à générer les puissances élevées (100 kW à 60 MW), tandis que les moteurs à gaz, qui sont en fait une version légèrement modifiée de la version des moteurs à essences, sont plutôt employés pour les puissances basses (allant de 5 kW à 4 MW)

Les moteurs de petite puissance sont jusqu'à présent peu rentables, leur coût d'achat et d'entretien ne permettant pas souvent de rentabiliser de tels investissements [14].

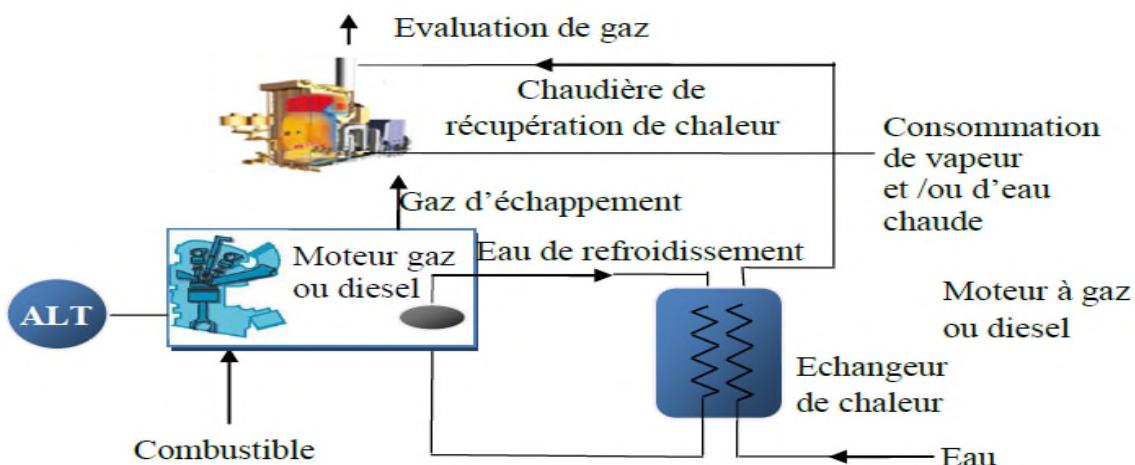


Figure I.13 : Schéma de principe de la cogénération basée sur un moteur à piston

Le tableau (I.2) donne les principaux avantages et inconvénients de la technologie à base des moteurs à piston.

Avantages	Inconvénients
Puissance à partir de 5 kW	Coût de maintenance assez élevé
Bien adapté à la préparation d'eau chaude	Peu propice à la production de vapeur
Bien adapté pour des besoins électriques du même ordre de grandeur que les besoins de chaleur	Durée de vie limitée (10 à 15 ans)
Coût d'achat abordable	Entretiens programmés indispensables
Bien adapté pour suivre une demande variable	
Peut jouer le rôle de groupe de secours d'appoint en cas de panne	

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients d'un moteur à piston

I.3.11.d La chaudière

i. Description

C'est un appareil permettant de transférer de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion soit la chaleur contenue dans un autre fluide, soit encore d'autres sources de chaleur [15].

ii. Fonctionnement

Elle assure la transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie calorifique. Cette fonction est faite par différentes composantes de chaudière :

- Les bruleurs assurent la combustion.
- L'économiseur et les écrans vaporisateurs assurent le chauffage de l'eau.
- Les écrans vaporisateurs et ballon chaudière assurent la vaporisation de l'eau.
- Les échangeurs surchauffeurs assurent le sur chauffage et le resurchauffe de la vapeur.

iii. Différents types de chaudières

On distingue deux grandes catégories de chaudières, dénommées d'après le fluide qui circule à l'intérieur des tubes : les chaudières à **tubes de fumée**, et les chaudières à **tubes d'eau**.

- **Chaudière à tube d'eau**

Dans cette construction, c'est le fluide caloporteur qui circule dans des tubes, les gaz chauds circulant à l'extérieur de ceux-ci. L'avantage de la formule est surtout la sécurité de ne pas avoir de grandes quantités d'eau dans la chaudière même, qui pourraient en cas de rupture mécanique, entraîner une création explosive de vapeur. Elles ont également l'avantage d'avoir une plus faible inertie. Dans ce type de chaudière, le foyer a toujours un volume très important. De plus, le foyer a la possibilité d'être ouvert dans sa partie inférieure. Ce sont ces deux caractéristiques qui font qu'elles sont souvent utilisées avec des combustibles solides même pour des puissances de quelques MW seulement [15].



Figure I.14 : Chaudière à tube d'eau

- **Chaudière à tube de fumée**

Une chaudière à tube de fumée est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Le premier tube du parcours de fumée est un tube de plus gros diamètre qui constituent le foyer. La construction et la forme des chaudières à tube fumé rend difficile l'extraction des cendres. Lorsqu'elles sont utilisées avec des combustibles solides le foyer est placé à l'extérieur de la chaudière. Dans ce cas, le foyer est un avant foyer à tubes d'eau ou un réfractaire. Ce type de construction est généralement réservé à des puissances n'excédant pas 20 ou 30 MW [15].

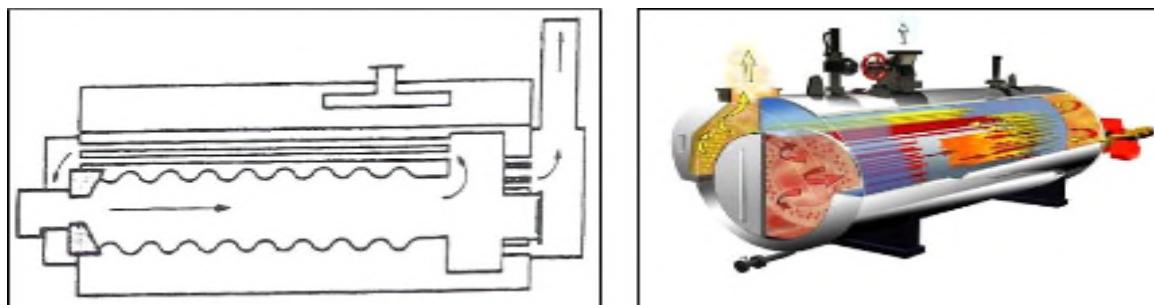


Figure I.15 : Chaudière à tube fumée

I.3.11.e Les condenseurs

i. Description

Un condenseur dit aussi échangeur thermique est un appareil dont la fonction principale est de liquéfier ou condenser (transformation d'un gaz en liquide) de la vapeur sur une surface.

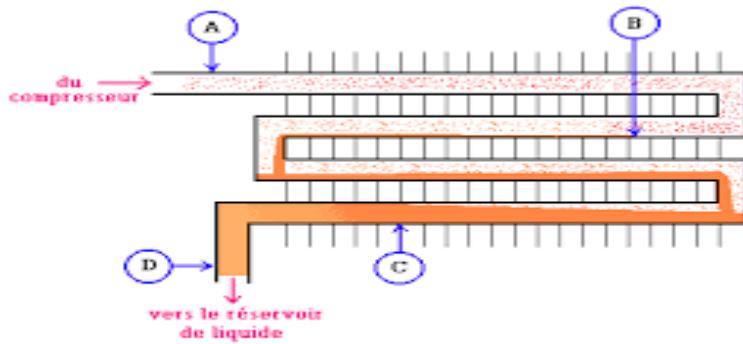


Figure I.16 : Schéma d'un condenseur

ii. Le rôle d'un condenseur

Le condenseur est la source froide du cycle thermodynamique. La puissance thermique qu'il échange sous forme d'énergie calorifique est perdue. C'est un échangeur par surface, des milliers de tubes sont parcourus par l'eau de refroidissement (eau de rivière ou eau de mer). La vapeur d'eau se condense à l'extérieur des tubes. Donc, il assure la condensation de la vapeur évacuée par la turbine [16].

iii. Le poste d'eau

Le poste d'eau est l'ensemble des matériels d'une centrale thermique qui permettent d'acheminer l'eau contenue dans le condenseur vers le générateur de vapeur.

Ses deux fonctions principales, sont :

- Le pompage de l'eau.
- Le réchauffage de l'eau.

I.3.11.f L'alternateur

i. Description

L'alternateur est une machine synchrone à courant alternatif qui est utilisée dans l'industrie comme dans la production d'énergie électrique dans les centrales (hydraulique, thermique, nucléaire), groupes électrogène automobile, la marine, etc. Cette machine constitue le plus gros convertisseur d'énergie au monde. Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs. L'alternateur converti l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif. Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation par la turbine qui assure l'énergie mécanique, ce dernier fourni des tensions alternatives de fréquence

proportionnelle à leur vitesse de rotation. Il est donc constitué de deux parties principales. Une partie fixe, appelée stator et une partie mobile, appelée rotor.

- **Le stator :** est appelé induit. Il est constitué d'un circuit magnétique encoché où loge les conducteurs de l'enroulement statorique qui engendrera des tensions induites par le changement du flux inducteur dû au mouvement du rotor. L'ensemble circuit magnétique-enroulement est accroché à la carcasse de l'alternateur qui distribue aux fondations les efforts mécaniques engendrés en fonctionnement normal ou accidentel. L'ensemble du stator forme un guide de ventilation des organes internes et supporte également les structures d'extrémités [17].
- **Le rotor :** est nommé l'inducteur. D'une part, ce rotor peut comporter des aimants permanents (engendrant dans ce cas, un champ constant), c'est-à-dire, la tension fournie par la machine n'est pas réglable (si on considère que les pertes dans les conducteurs sont négligeables) et sa valeur efficace et sa fréquence varient avec la vitesse de rotation (exemple : micro turbine à gaz qui entraîne l'alternateur). D'une autre part, ce rotor, pour produire le champ inducteur, peut être constitué d'une bobine (un électroaimant) alimentée en courant continu par un collecteur à bague rotatif (une double bague avec balais) ou par un excitateur à diodes tournantes et sans balais. Un système de régulation permet l'ajustement de la tension et de la phase du courant produit (exemple : turbine à gaz ou à vapeur qui entraîne l'alternateur). La division de l'enroulement inducteur est faite en plusieurs bobines domiciliées dans des encoches longitudinales fraîsées dans le noyau ferromagnétique du rotor. Le rotor de l'alternateur tourne dans des coussinets montés sur des paliers. Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur. Dans notre étude, c'est le rotor à pôles lisses qui est utilisé [17].

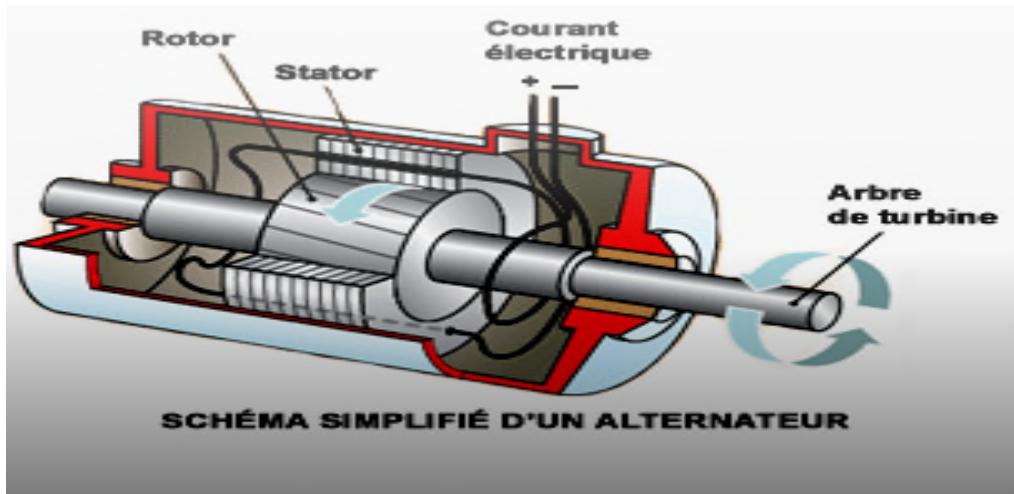


Figure I.17 : Alternateur

I.3.12 Avantages de la centrale de cogénération

I.3.12.a avantages économiques

*Une réduction significative de la facture d'achat d'électricité :

Pour un propriétaire d'une unité de cogénération, la facture d'achat d'électricité diminuera de manière significative suite à :

- Une diminution de la pointe quart-horaire ;
- Une baisse de la quantité d'électricité achetée au réseau ;
- Un régime tarifaire parfois plus intéressant.

Une centrale de cogénération permet une meilleure exploitation de l'énergie contenue dans le combustible, c'est-à-dire que pour la même énergie électrique et thermique utilisée, on consomme moins de combustible.

I.3.12.b Avantages sociaux

Une cogénération ne remplace pas totalement une chaudière, mais elle la complète utilement. Cet investissement supplémentaire est donc synonyme de la création de nouveaux emplois, tant pour l'étude technique détaillée, de préférence précédée d'une étude de faisabilité, que pour l'installation et l'entretien de cette cogénération dans un établissement.

I.3.12.c Avantages environnementaux

- De l'énergie pour nos enfants, contrairement à ce que pourrait laisser croire la mondialisation des échanges, l'abondance des ressources énergétiques n'est qu'apparente et l'approvisionnement n'est pas acquis. En effet, les ressources fossiles sont épuisables. A consommation constante, les réserves prouvées de gaz seront complètement épuisées d'ici

Chapitre I| Généralités sur la cogénération

environ 60 ans, celles du pétrole d'ici à peine 40 ans [18]. En tant que détenteur d'une unité de cogénération vous contribuez fortement à prolonger les dernières réserves d'énergie fossile, dans la mesure où cette technologie permet une économie d'énergie primaire significative voire d'utiliser un combustible renouvelable comme la biomasse.

- Une faible consommation de combustible implique une grande diminution d'émissions nocives dans l'environnement et par conséquent, une diminution des coûts sociaux de la pollution.
- Sauvegarde des ressources d'énergie primaire : la cogénération permet une utilisation plus efficace des ressources énergétiques traditionnelles (pétrole, charbon, gaz naturel), et en réduit le gaspillage.

1.4 Conclusion

Dans un contexte lié à la conception des systèmes de conversion d'énergie, nous avons présenté les différents concepts de production d'énergie des centrales thermique et en particulier la centrale de cogénération. Nous avons abordé aussi les différentes technologies et leur principe de fonctionnement utilisés dans les systèmes de cogénération.

Chapitre II

Les principales

sources utilisées dans

la cogénération

II.1 Introduction

CEVITAL comme toute autre entreprise industrielle a besoin de développer son secteur d'activité et de faire des extensions pour ses installations pour augmenter la productivité et la compétitivité de ces produits et assurer la continuité de service pour faire face à la concurrence. Ces extensions exigent une demande de puissance supplémentaire, alors CEVITAL a opté pour la cogénération. Dans le but de produire de façon autonome l'énergie dont elle a besoin.

Il a été procédé donc à l'installation de deux groupes blocs (turbine-alternateur, transformateur) de 25 MW de puissance chacun. Cette puissance installée étant largement supérieure au besoin du complexe. Pour mieux expliquer la procédure de fonctionnement de cette installation nous présentons l'enchaînement d'éléments qui assurent la production électrique et thermique à la fois commençant par la bâche alimentaire jusqu'à la récupération de la vapeur nécessaire au processus de fabrication de sucre et la puissance électrique nécessaire pour l'alimentation du complexe, passant par le groupe turbo alternateur l'élément qui sépare la production électrique de la thermique.

II.2 Présentation du complexe agro-alimentaire Cevital-Bejaia

II.2.1 Historique

Cevital SPA est parmi les entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché. Elle a été créée par des fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe dans le port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 45000m².

Le complexe contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale, elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant une large gamme de produits de qualité.

II.2.2 Situation géographique

Cevital est implanté au niveau quai du port de Bejaia à 3 km du sud-ouest de cette ville, à proximité de la RN26. Cette situation géographique de l'entreprise lui a beaucoup profité étant donné qu'elle lui confère l'avantage de proximité économique. En effet elle se trouve proche du port et l'aéroport.

II.2.3 Activités de Cevital

Les activités de Cevital sont lancées en Mai 1998, le complexe a débuté son activité par le conditionnement d'huile en Décembre 1998.

En Février 1999 ont débuté, les travaux de génie civil de raffinerie sucre, elle est devenue fonctionnelle en Août 1999. Les activités de Cevital sont concentrées sur la production, la commercialisation des huiles végétales, de margarines et de sucre, ainsi que la production de l'énergie électrique.

Elles se présentent comme suit :

- Raffinage des huiles (1800 tonnes/jours).
- Conditionnement d'huile (1400 tonnes/heure).
- Fabrication d'emballage (PET) : Polyéthylène.
- Production de margarine (600 tonnes/jour).
- Raffinage du sucre (4600 tonnes/jour), repartie en deux unités de raffinages, première raffinerie (1600 tonnes/jour), deuxième raffinerie (4000 tonnes/jour).
- Unité de conditionnement sucre 1 kg et 5 kg.
- Stockage des céréales (120000 tonnes) (20 silos de stockage).
- La cogénération, elle est constituée de deux turbines à vapeur couplées à deux chaudières respectivement, ces dernières sont alimentées par le gaz naturel pour générer de la vapeur à partir d'eau liquide. La vapeur est ensuite utilisée pour actionner les turbines puis entraînées deux alternateurs électriques qui produisent au final de l'énergie électrique.

II.2.4 Mission et objectifs

L'entreprise a pour mission principale de développer la production et d'assurer la qualité et le conditionnement des huiles, des margarines et du sucre à des prix nettement plus compétitifs et cela dans le but de satisfaire le client et le fidéliser.

Les objectifs visés par Cevital se présentent comme suit :

- L'extension de ses produits sur tout le territoire national.
- L'importation des graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes.
- L'optimisation de ses offres d'emploi sur le marché de travail.

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

- L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses.
- La modernisation de ses installations en termes de machine et technique pour augmenter le volume de sa production.

II.2.5 Différents organes constituant le complexe Cevital

L'organigramme suivant donne une vue générale des différents organes constituants le complexe Cevital.

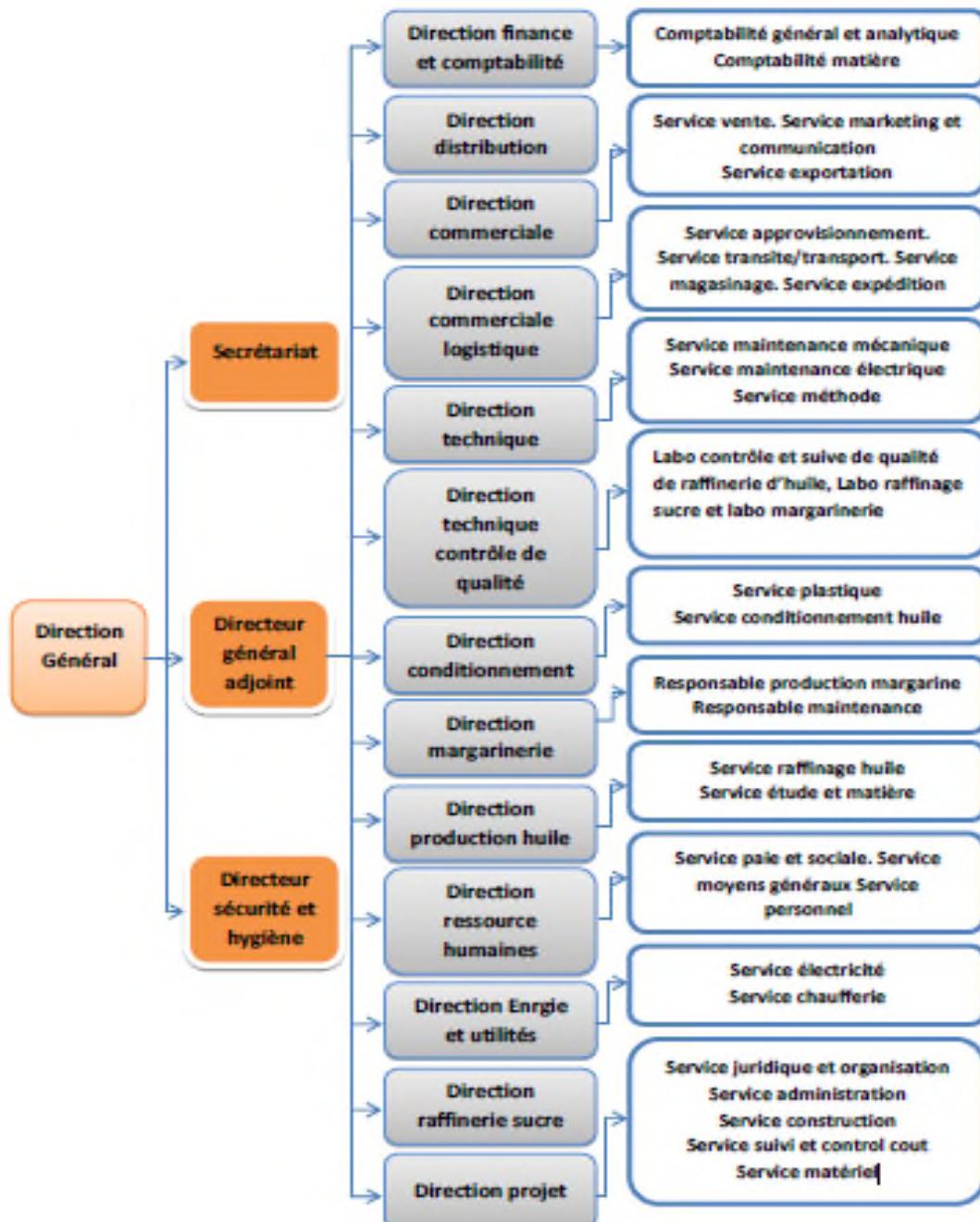


Figure II.1 : Organigramme du complexe Cevital

II.2.6 Unité énergie et utilités

La direction énergie est constituée de deux départements qui sont :

-Département électrique (production et distribution de l'énergie électrique) on distingue :

- Le poste 60 kV.
- Le poste 30 kV.
- La cogénération.

-Département chaufferie (production et distribution de la vapeur).

Les différents départements de la direction énergie sont représentés dans l'organigramme suivant :

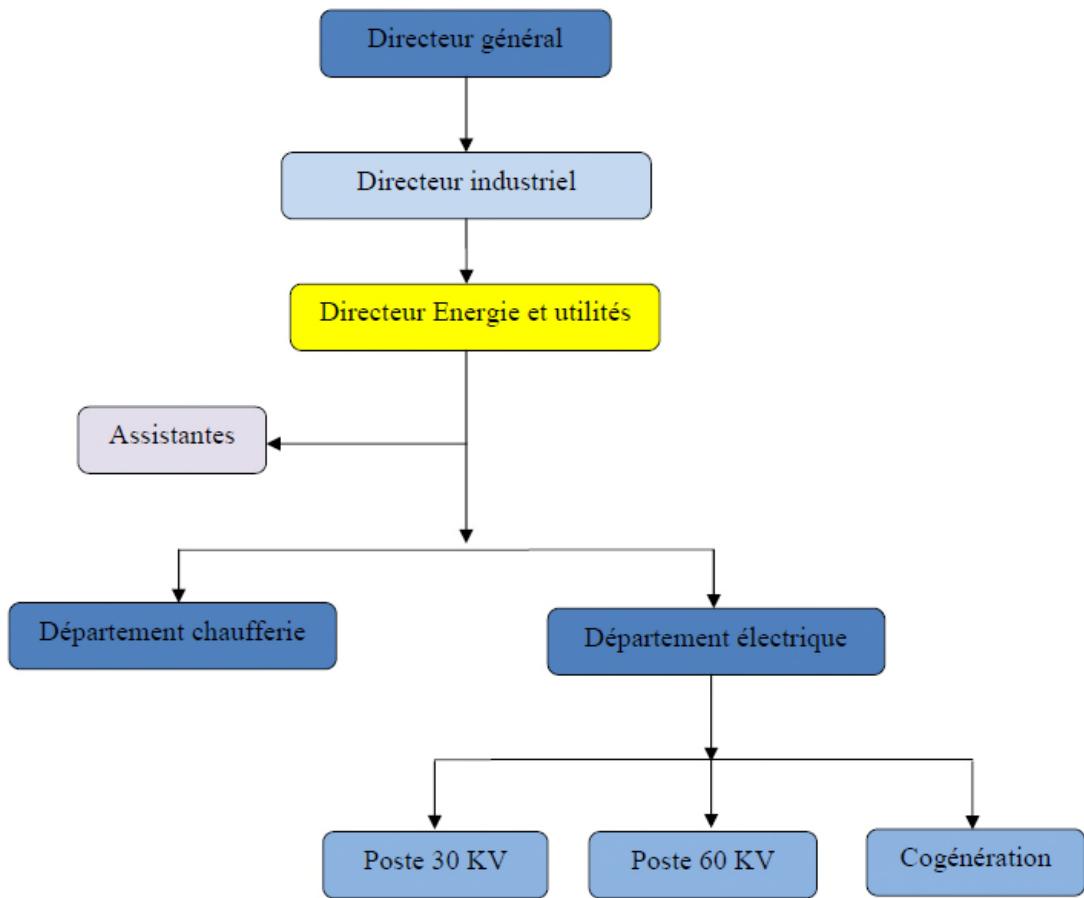


Figure II.2 : Organigramme du service d'énergie

II.3 Cogénération groupe CEVITAL

Définition et principe

La cogénération est un procédé qui consiste à produire simultanément de l'énergie mécanique et de la chaleur. L'énergie mécanique est le plus souvent destinée à produire de l'électricité (activer un moteur, une turbine ou une pile combustible), et la chaleur pour des procédés

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

industriels (souffleuse, nettoyage, etc...), tout cela dans une même installation et à partir d'une même source d'énergie (le combustible).

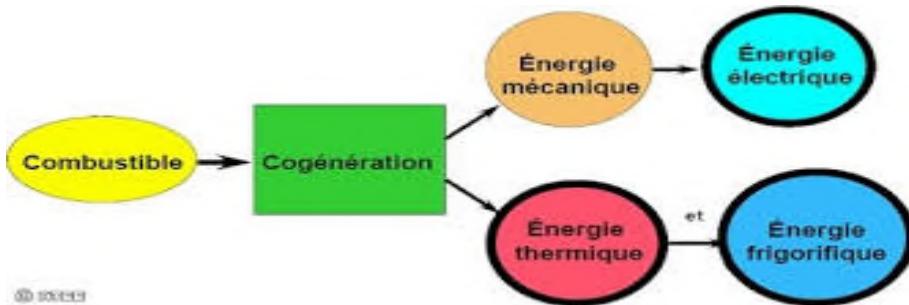


Figure II.3 : principe de la cogénération

Pour la centrale de CEVITAL, l'installation utilise le gaz naturel comme combustible (CH_4), deux chaudières de 150 t/h, et de deux turbines de 25 MW, choisie afin de répondre aux besoins en énergie électrique et thermique du complexe. Le gaz d'échappement CO_2 et la vapeur osmose sont récupérés pour les utiliser dans la production du sucre.

II.4 Description de la centrale thermique de CEVITAL

Au début, l'eau ultra pure dans la bâche alimentaire est chauffée grâce à l'économiseur, puis envoyée dans le ballon chaudière. Ensuite, la chaudière produit la vapeur nécessaire pour l'alimentation de la turbine afin de produire une énergie mécanique avec une vitesse de rotation de 5900 tr/min, qui sera utilisée pour l'entrainement de l'alternateur qui à son tour produit de l'énergie électrique.

A la sortie de la turbine, la vapeur surchauffée est dirigée vers le condenseur dont le circuit froid permet de retransformer la vapeur en liquide. Finalement, l'eau retourne par la suite vers la bâche alimentaire pour un niveau cycle.

II.5 Description de la centrale cogénération CEVITAL

L'installation de l'unité cogénération a pour but de satisfaire les besoins du complexe en matière d'énergie. Elle sert, essentiellement, à produire de la vapeur, et à avoir de l'énergie thermique qu'on exploite pour obtenir la vapeur utilisée dans tout le complexe qu'on utilise aussi dans les raffineries d'huile et de sucre et à obtenir de l'énergie électrique nécessaire à différents niveaux du complexe CEVITAL.

Cette installation est, donc, composée de :

- La partie production de vapeur.

- La partie production d'électricité.

II.5.1 Partie production de vapeur

II.5.1.1 Principales sources utilisées dans l'installation

Les combustibles sont soit solides comme le charbon, ou liquides comme le fioul ou encore gazeux tel que le gaz naturel. Chaque chaudière ne peut en utiliser qu'un seul type car chaque combustible exige un brûleur particulier. Contrairement au charbon et au fioul, le gaz ne nécessite aucun traitement ; car directement envoyé dans les brûleurs.

La combustion par les deux brûleurs dans le foyer est réalisée par un mélange d'air comburant et d'un combustible. Le complexe agroalimentaire utilise le gaz naturel comme source d'énergie primaire. La consommation actuelle nécessaire à la production est de l'ordre de 54,19 10 Nm³ / an [19].

II.5.1.2 L'eau ultra pure

La centrale de cogénération CEVITAL utilise l'eau ultra pure ne contenant presque aucune impureté ionique, avec un très faible taux de particules et éléments chimiques, c'est une eau ne contenant presque que les molécules H₂O.

❖ Intérêt d'utilisation de l'eau ultra pure : Cette qualité d'eau est exigée afin d'assurer le bon fonctionnement des turbines qui nécessite l'évitement de tout phénomène d'entartrage et de corrosion dans les chaudières et les conduites de canalisation (tuyauterie).

II.5.1.3 Alimentation en air des brûleurs

L'air nécessaire à la combustion est amené dans le brûleur au moyen d'un ventilateur centrifuge. Ce ventilateur doit assurer le débit d'air nécessaire à la combustion. Le réglage de la quantité d'air de combustion ainsi que le mesurage sont effectués en commun pour les deux brûleurs.

II.5.1.4 La bâche alimentaire

Elle sert à alimenter deux chaudières en eau pure, et aussi pour un dégazage de l'eau. Ses caractéristiques sont :

- Capacité volumique : 88m³
- Pression de service : 1,21 bar
- Température de travail : 105C°
- Diamètre externe : 3400 mm

II.5.1.5 La chaudière (Générateur de vapeurs)

La chaudière est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique [4].

Au niveau de la centrale CEVITAL, la chaudière utilisée est une chaudière STEIN à circulation naturelle de type « tube d'eau » - PAM-54 bars[20].

i. Constitution de la chaudière

Le groupe de chaudière est composé des parties suivantes :

- La chambre de combustion ;
- Les bruleurs ;
- Ventilateurs de soufflage ;
- Les réchauffeurs d'air ;
- L'économiseur ;
- La surchauffeur et le resurchauffeur ;
- Les désurchauffeurs ;
- La cheminée.

ii. Economiseur

C'est une tuyauterie en forme de serpentin, qui reçoit de l'eau venant de la bâche avec une température de 105°C. Il a pour rôle de récupérer un maximum de calories des gaz de combustion après leur sortie de la chaudière.

iii. Vaporisateurs

Le rôle du vaporisateur est de vaporiser l'eau qui venait du ballon puis la renvoyer de nouveau vers ce dernier.

iv. Surchauffeur

Situé sur le parcours des fumées entre la sortie du foyer et le ballon. Il se divise en deux étages. Un étage à basse température SBT qui sert à surchauffer la vapeur saturée sortante de l'économiseur et permet d'élèver la température sans modifier la pression. Un étage à haute température SHT qui set à récupérer la vapeur sortante du SBT pour la porter à la température de service correspondante à la vapeur finale 480 °C. Il permet d'obtenir une vapeur 100% sèche.

v. Désurchauffeur

C'est une vanne désurchauffe qui injecte l'eau entre les deux étages du surchauffeur (SHT, SBT) pour la régulation de la température de la vapeur.

vi. Ballon chaudière

C'est un collecteur d'eau arrivant de l'économiseur qui est destiné à la séparation de l'eau et de la vapeur pour qu'elles soient distribuées comme suit : l'eau vers l'évaporateur et la vapeur saturée vers le SBT. Il est construit en acier soudé, disposé longitudinalement avec un volume total de 23,665 m³ et une surface de plan d'eau de 21,5 m².

II.5.1.a.6 Fonctionnement de la chaudière

La chaudière fonctionne en véhiculant l'eau des tubes à l'intérieur, et la source de chaleur à l'extérieur de ces tubes. L'eau ultra pure dans la bâche alimentaire est envoyée à l'aide des pompes à une température 105°C vers l'économiseur, puis rentre dans le ballon chaudière à une température de 210°C, qui sera dans la surchauffeur basse température (BT) afin d'augmenter la température de ce dernier à 420°C. L'eau sortant du surchauffeur basse température (SBT) est contrôlé par la vanne qui va injecter l'eau venant de la bâche alimentaire pour baisser sa température à 350°C, puis rentre dans la surchauffeur haute température (SHT), pour avoir les 480 °C, avec une pression de 54 bar, et enfin obtenir les 150 tonnes de vapeur par heure.

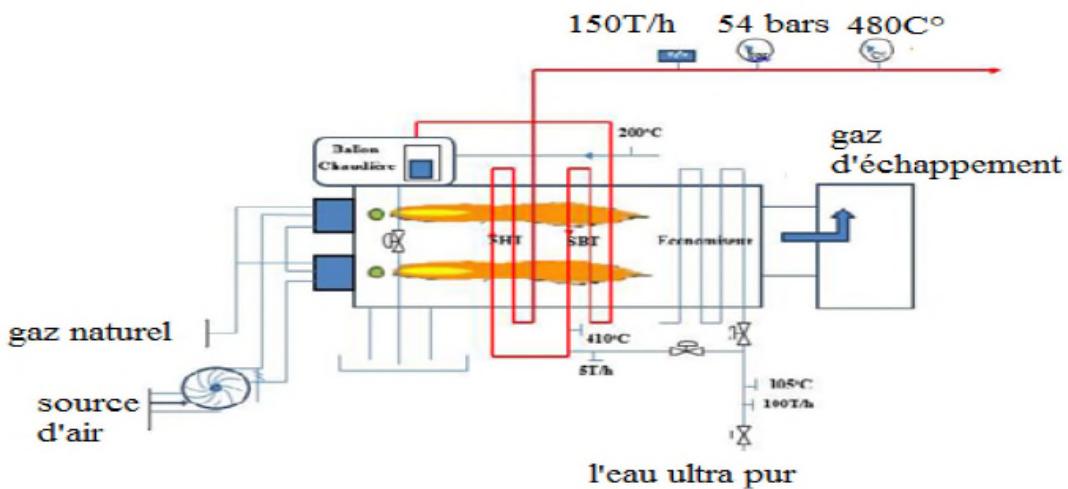


Figure II.4 : schéma fonctionnel de la chaudière.

II.5.2 Partie production d'électricité

La partie production d'électricité se compose de deux groupes turbo-alternateur. La vapeur produite dans la partie précédente est transportée sous haute température et haute pression

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

vers une turbine où l'énergie thermique se transforme en énergie mécanique, celle-ci sera par la suite transformée en énergie électrique par le biais d'un alternateur.

C'est ce qu'on appelle le groupe turbo-alternateur.

II.5.2.1 Groupe turbo-alternateur

Un groupe turbo-alternateur est un accouplement d'une turbine et d'un alternateur en vue de transformer la puissance mécanique d'un fluide en mouvement pour obtenir de l'électricité, avec l'intermédiaire d'un réducteur ou d'un multiplicateur de vitesse pour réguler la vitesse de la turbine à celle de l'alternateur [21].

La ligne d'arbre se compose de :

- Une turbine THYRMODYN à contre pression type 6-7 MP5.
- Un réducteur de vitesse de $\frac{1}{4}$.
- Un alternateur JISLAT type MEGA435.

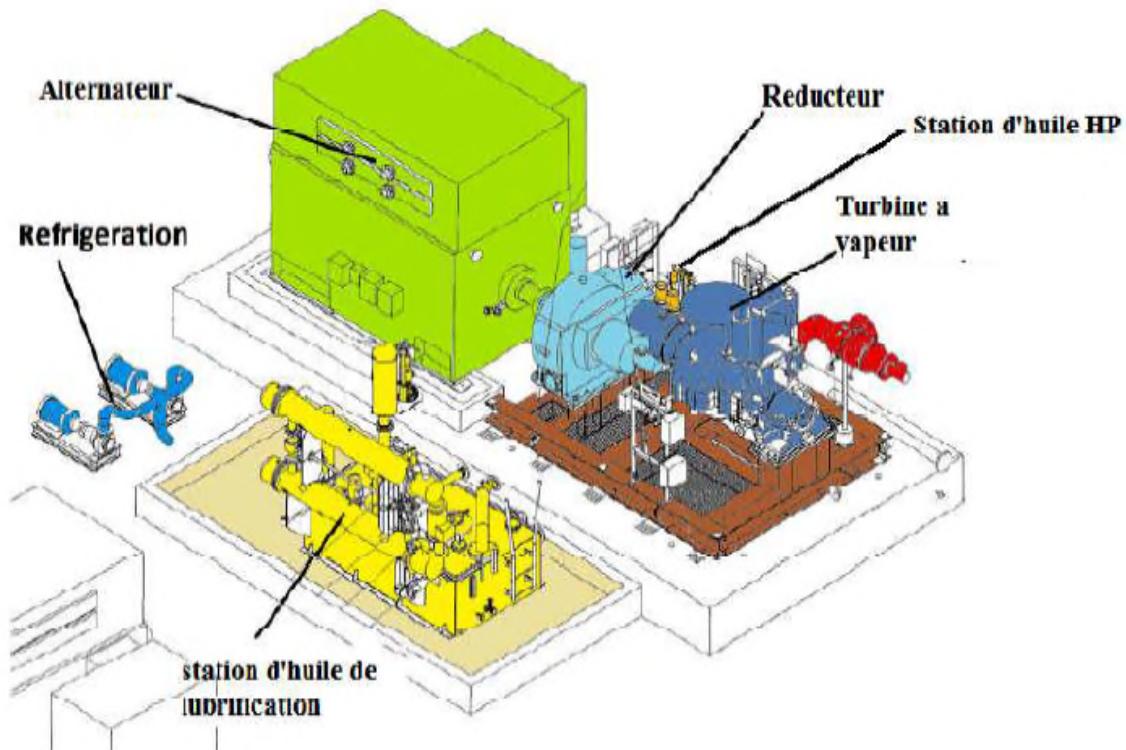


Figure II.5 : Vue général du groupe turbo-alternateur CEVITAL

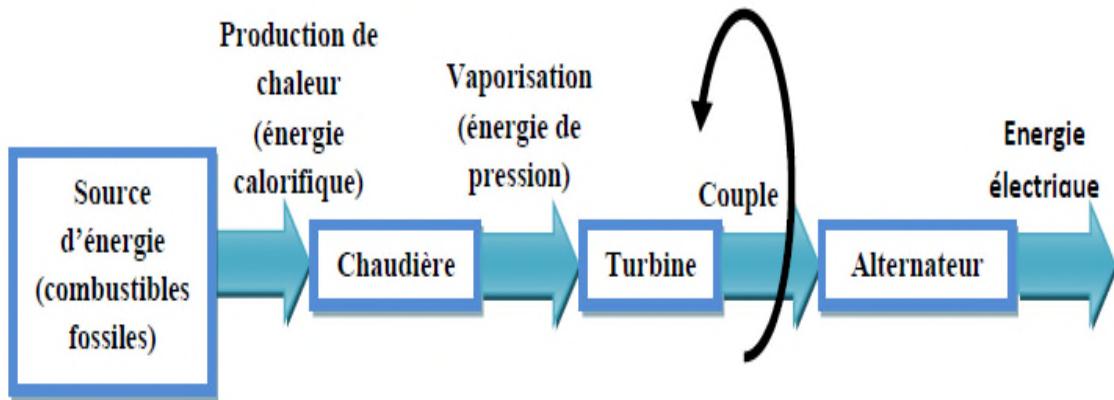


Figure II.6 : Schéma de fonctionnement du groupe turbo-alternateur.

II.5.2.1.1 La turbine

C'est une turbine à contre pression de type 6-7 MP5 transformant l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique à une vitesse de 5900 tr/min. La turbine est capable de détendre 150 t/heure de vapeur à 54 bar et 480 °C, à la sortie 2,7 bar et 140 à 180 °C pour avoir une puissance de 25 MW.

La turbine comprend le stator et le rotor.

Elle est aussi équipée :

- D'une centrale d'huile de contrôle lubrification ;
- D'un ensemble d'armoire de contrôle commande ;
- D'une vanne d'arrêt à commande hydraulique qui permet l'ouverture et la fermeture de la vanne d'admission vapeur ;
- De 4 soupapes pour la régulation de la vapeur (régulation de 0 à 100 %)
- Une centrale de lubrification BP 1,5 bar pour lubrification des paliers de la turbine ;
- Une centrale d'huile HP 130 bar pour l'ouverture et la fermeture de la vanne d'arrêt et les soupapes d'admission ;

i. Principe de fonctionnement

La vapeur admise dans la turbine par la vanne d'admission est détendue dans une rangée de tuyères en parallèle (appelée distributeur ou aubages fixes) (figure II.7). La vapeur se déplaçant sur une tuyère fixe se dilate. Ainsi sa température diminue et son énergie cinétique augmente, passe sur les ailettes incurvées qui absorbent une partie de l'énergie cinétique de la vapeur dilatée.

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

La vapeur en mouvement exerce une pression contre les ailettes, entraînant leur rotation en traversant d'abord les roues de petit diamètre avant d'atteindre les roues de plus grand diamètre. A la sortie de l'ensemble mobile la vapeur est évacuée par la tubulure d'échappement [22].

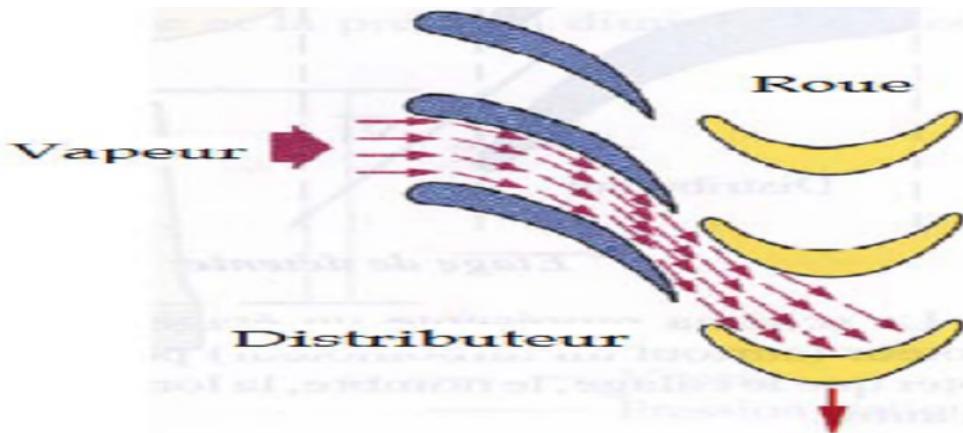


Figure II.7 : géométries des aubages.

ii. Caractéristique de fonctionnement [20]

Les caractéristiques de fonctionnement de la turbine sont regroupées dans le tableau (II.1) suivant :

Vitesse de rotation turbine	5900 tr/min
Survitesse électrique	6490 tr/min
La pression normale de fonctionnement	54 bar
La pression maximale de fonctionnement	60 bar
La température normale de fonctionnement	476 °C
La température maximale de fonctionnement	480 °C
Le taux moyen maximal de variation de la température vapeur admission	165°C/heur
Le taux maximal admissible	540°C/heur

Tableau II.1 : Caractéristiques de la turbine à vapeur de CEVITAL.

II.5.2.1.2 Réducteur

Il s'agit d'un réducteur à engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales à deux arbres parallèles verticaux décalés, afin d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la rotation de l'alternateur.

Ce réducteur est monté sur le socle et l'alignement de l'arbre entre la turbine et l'alternateur est effectué selon la procédure de JEUMONT dans les ateliers.

i. Réducteur à arbre parallèles à dentures hélicoïdales



Figure II.8 : Structure générale du réducteur à arbres parallèles.

ii. Rôle du réducteur

- Convertir la vitesse de 5 900 tr/min à 1500 tr/min de façon à ce que le générateur à 4 pôles puisse être piloté à la fréquence de 50 Hz ;
- Rapport de conversion : 3,93 sur ce réducteur.

iii. Interprétation de la plaque signalétique du réducteur :

La figure II.9 qui suit présente la plaque signalétique du réducteur étudié, d'où sont prélevées les grandeurs suivantes qui le caractérisent :

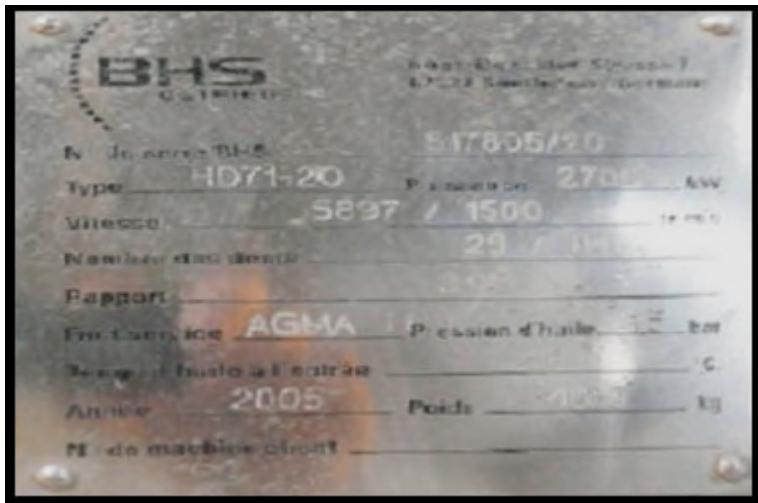


Figure II.9 : Plaque signalétique du réducteur

Numéro de série : 517805/20 Type : HD71-20

Puissance : 27000 kW

Vitesse : 5897/1500 tr/min

Nombre de dents : 29/114dents

Rapport de réduction : 3,93

Facteur de série : AGMA

Pression d'huile : 1,5 bar

Poids : 1 tonne

IP=54 : protégé contre les poussières et projection d'eau de toutes directions.

iv. Avantages et inconvénients d'utilisation des dentures hélicoïdales

➤ Les avantages

- Transmission du couple plus progressive et moins bruyante, conduite plus grande 2, 3 ou 4 couples de dents toujours en prise ;
- Transmission d'effort important à vitesse élevée ;
- Réalisation facile d'un entraxe imposé en faisant varier l'angle d'hélice.

➤ Les inconvénients

- Efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (les forces axiales sur les paliers et augmentation des couples de flexion).
- Rendement moins bon ;
- L'utilisation est impossible sous forme de baladeur ; ces engrenages doivent toujours rester en prise.

II.5.2.1.3 Alternateur

a. Construction de l'alternateur

L'alternateur est composé par une partie fixe qui s'appelle stator et une partie tournante dite rotor.

Le stator est constitué par des enroulements qui vont être le siège de courants électriques alternatifs induits par la variation du flux du champ magnétique rotorique (inducteur) due au mouvement relatif du rotor par rapport au stator (dit induit).

Le rotor est nommé l'inducteur.

- D'une part, ce rotor peut être constitué par des aimants permanents (engendrant dans ce cas un champ constant), c'est-à-dire, la tension fournie par la machine n'est pas réglable (si on considère que les pertes dans les conducteurs sont négligeables) et sa valeur efficace et sa fréquence varient avec la vitesse de rotation (exemple : micro turbine à gaz qui entraîne l'alternateur).

- D'autre part, ce rotor peut être l'équivalent d'un électroaimant, l'alimentation du bobinage se fait en courant continu par un collecteur à bague rotatif (une double bague avec balais) amenant une source extérieure ou par un excitateur à diodes tournantes et sans balais (voire la section II.5.3). Un système de régulation permet l'ajustement de la tension et de la phase du courant produit (exemple : turbine à gaz ou à vapeur qui entraîne l'alternateur).

i. Stator

Le stator de l'alternateur est constitué par un ensemble d'enroulements fixes (statiques). C'est la partie active où se produit la conversion de l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique et permettant sa transmission vers l'extérieur.

L'ensemble circuit magnétique-enroulement est accroché à la carcasse de l'alternateur qui distribue aux fondations les efforts mécaniques engendrés en fonctionnement normal ou accidentel. L'ensemble du stator forme un guide de ventilation des organes internes et supporte également les structures d'extrémités (7). Les éléments constitutifs du stator sont :

i.1. La carcasse

L'ensemble des tôles soudées électriquement entre elles qui couvre l'extérieure de l'alternateur est appelé carcasse. Cette carcasse porte à chacune de ses extrémités les paliers. Elle possède aussi un caisson de bornes, de plus, elle est dimensionnée pour pouvoir supporter sans encombre les sollicitations dues à ses fonctions (transport, fonctionnement normal ou accidentel, etc.).

i.2. Le caisson des bornes

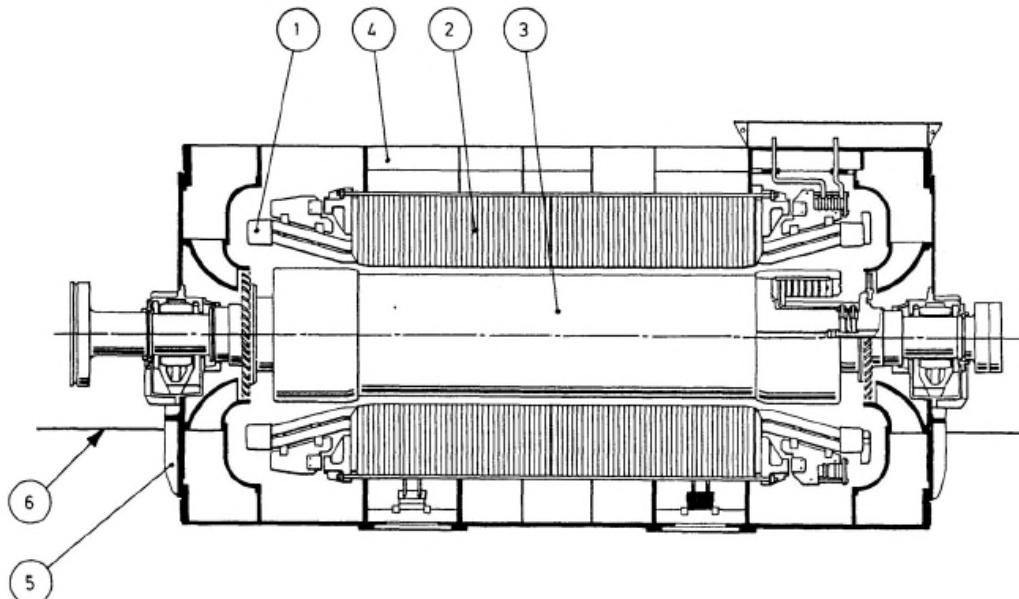
La fixation du caisson des bornes est faite sur la partie supérieure de la carcasse et la réalisation de son cadre est par des tôles soudées. La fermeture du caisson est effectuée par une plaque isolante.

i.3. Le circuit magnétique

L'utilisation d'un empilage de segments de tôle magnétique spéciale pour construire le circuit magnétique. Il considère parmi les deux composants actifs du stator. Un système de ressorts nommé suspension élastique est utilisé pour connecter le circuit magnétique avec la carcasse. Cette suspension permet la réduction de propagation des vibrations radiales aux composants du stator, ainsi qu'aux fondations.

i.4. L'enroulement stator

L'enroulement stator est la partie principale de l'alternateur. L'ensemble des conducteurs sont immobilisés dans les encoches creusées dans le circuit magnétique du stator. Il est le siège de la puissance électrique générée par l'alternateur et il doit évacuer cette énergie vers l'extérieur. L'enroulement stator est refroidi par un système de refroidissement indirect. Dans les barres stator, le passage du courant engendre des pertes thermiques qui sont évacuées par le circuit magnétique lui-même refroidi par circulation d'air et par circulation d'air frais dans les têtes de bobines.



1 - Enroulement stator.

4- Carcasse alternateur.

2 - Circuit magnétique.

5- Paliers.

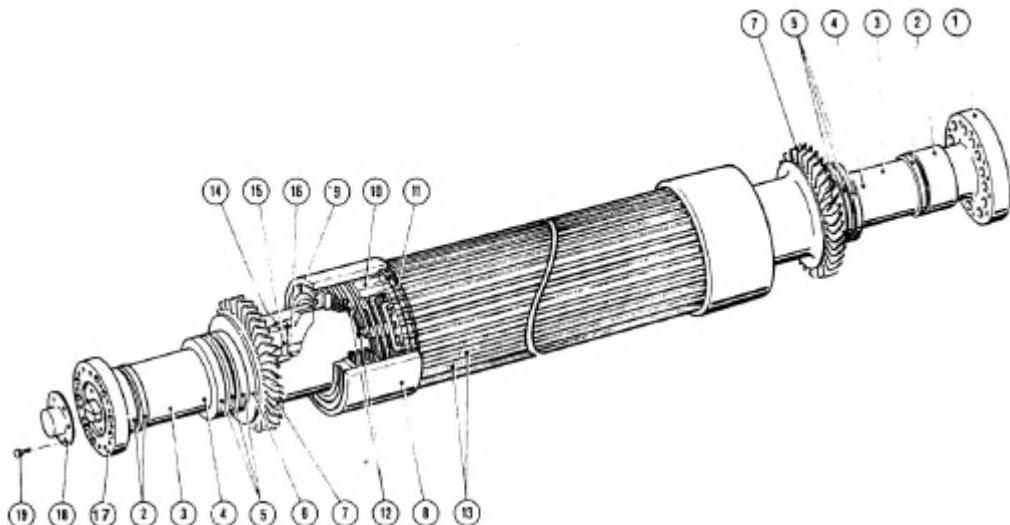
3 - Rotor.

6- Fondation.

Figure II.10 : Vue d'ensemble de l'alternateur

ii. Rotor

La partie tournante de l'alternateur est le rotor qui est entraîné par la turbine. Le rotor porte deux paires de pôles successivement nord et sud, avec une alimentation de ses bobines inductrices par un courant continu. L'enroulement inducteur est logé dans des encoches longitudinales creusées dans le fer du rotor. Il comporte, aussi, deux ventilateurs axiaux, reliés à la turbine par le plateau d'accouplement. Le rotor de l'alternateur tourne dans des coussinets montés sur des paliers (7). Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur (11). Dans notre étude, c'est le rotor à pôles lisses qui est utilisé.



- | | |
|---|---|
| 1- Plateau d'accouplement coté turbine. | 11- Verrou de frettés. |
| 2- Portée des couvercles extérieurs. | 12- Calage des têtes de bobines. |
| 3- Fusées. | 13- Encoches longitudinales. |
| 4- Sans objet. | 14- Connexion extérieure. |
| 5- Portée des couvercles intérieurs | 15- Tiges de connexions radiales. |
| 6- Plateaux porte-ventilateurs. | 16- Connexion centrale. |
| 7- Ventilateurs axiaux. | 17- Plateau d'accouplement coté excitation. |
| 8- Frettés. | 18- Couvercle de protection. |
| 9- Plateau porte-frette. | 19- Vis de fixation du couvercle. |
| 10- Amortisseurs. | |

Figure II.11 : Rotor de l'alternateur [17]

ii.1. L'arbre

Deux fonctions principales de l'arbre sont montrées ci-après:

- La production d'un champ tournant est une fonction électrique.
- La transmission du couple est une fonction mécanique.

Il se compose de deux éléments principaux :

- **Le fer :** Une pièce en fer forgé monobloc.

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

- **Les accouplements** : Il existe deux façons d'accouplements, qui sont l'accouplement coté turbine qui garantit le centrage des rotors présents et l'accouplement coté excitation qui permet le centrage et la fixation de la partie mobile de l'excitateur à diodes tournantes par des boulons d'accouplements.

ii.2. L'enroulement du rotor

On distingue deux zones, la première incluse dans le fer et la deuxième hors du fer. Il est formé d'un empilage de spires domicilié dans les encoches du rotor.

ii.3. Les flettes et les plateaux porte-flettes

Les flettes sont des cylindres en acier maintenant les têtes de bobines contre les effets de la force centrifuge et les plateaux porte-flettes sont des anneaux montés avec serrage à l'extrémité de la flette. Ces derniers permettent de réduire les déformations que la flette pourrait subir si elle était seule, montée avec serrage sur le fer.

ii.4. Les connexions d'excitation

Le système d'excitation fournit un courant qui alimente l'enroulement rotor à l'aide des connexions, reliées directement aux bobines rotor.

ii.5. Les ventilateurs axiaux

Sur chaque côté du rotor on monte des ventilateurs axiaux, pour créer la surpression nécessaire pour obtenir une circulation d'air à travers le circuit rotor et stator. Directement le rotor est refroidi. Les pertes thermiques principales d'un rotor sont engendrées par l'enroulement inducteur. Elles sont évacuées par circulation d'air dans les bobines. Les pertes résiduelles de surface du rotor sont évacuées par convection, avec l'air circulant dans l'entrefer.

b. Caractéristique de fonctionnement [20]

Les caractéristiques de fonctionnement de l'alternateur sont présentées dans le tableau (II.2) suivant :

Chapitre II Les principales sources utilisées dans la cogénération

puissance apparente Sn	31375 KVA
Puissance active Pn	25100 KW
Facteur de puissance cos ϕ	0.8
Vitesse	1500 tr/min
Survitesse	1800 tr/min pendant 2 min
Tension nominal Un	11 KV
Courant nominal In	1647 A
Fréquence f	50 Hz
Indice de protection	IP 54
Indice de refroidissement	IC 8A1W7
Mode d'excitation	Tournante

Tableau II.2 : Caractéristiques de fonctionnement de l'alternateur

II.5.2.1.4 Transformateur

Le transformateur permet de transférer de l'énergie sous forme alternative d'une source à une charge tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue.

Le transformateur de la centrale CEVITAL est un transformateur élévateur qui fait augmenter la tension pour qu'elle soit ensuite transportée.



Figure II.12 : transformateur

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la centrale de l'autoproduction d'électricité au niveau du complexe CEVITAL, avec ses éléments et leurs caractéristiques en se basant, particulièrement, sur le turbo-alternateur, ces détails vont être des outils précieux pour la compréhension des différents comportements du système turbo-alternateur, vu que cette dernière s'intègre dans tout établissement possédant des besoins en électricité importants. L'étude des performances de cette dernière fera l'objet du prochain chapitre

Chapitre III

Calcul des

rendements du

Complexe

III.1 Introduction

Les machines thermiques fonctionnent généralement grâce à un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques, ce système thermique échange du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur. Ces transformations successives et répétitives sont traduites sous forme des diagrammes dits cycles thermodynamiques, dans le but de pouvoir étudier théoriquement ce système et définir ses états de fonctionnement.

Le présent chapitre est consacré à l'étude des performances de la centrale thermique de Cevital. Nous avons abordé en premier lieu, l'étude du cycle thermodynamique de cette dernière, ainsi que le calcul de son rendement. Ensuite nous avons présenté une étude expérimentale sur le groupe turbo-alternateur

III.2 Aspect thermodynamique

La thermodynamique a pour le but d'étudier des phénomènes mécaniques (travail, pression) couplé aux phénomènes thermique (chaleur, température). Cette étude a plusieurs applications. La présente étude s'intéresse au système ouvert. Un système est dit ouvert si les échanges de matière avec le milieu extérieur sont autorisés.

III.2.1 Application thermodynamique

III.2.1.1. Application du premier principe dans un système ouvert

Si on applique le premier principe dans le cas d'un système ouvert, on aura :

$$W' + Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

W' : Travail technique ou utile mesuré sur l'arbre de la machine [J/kg].

Q : Quantité de chaleur échangée avec le milieu extérieur [J/kg].

H_1 : Enthalpie de la masse fluide à l'entrée de la machine [J/kg].

H_2 : Enthalpie de la masse fluide à la sortie de la machine [J/kg].

c_1 et c_2 : Vitesses du fluide respectivement à l'entrée et à la sortie de la machine [m/s].

z_1 et z_2 : Hauteur à l'entrée et à la sortie de la machine respectivement [m].

II.2.1.1.a. Cas d'une turbine :

Dans ce cas : $z_2=z_1$ et $c_2=c_1$

Et comme la turbine est adiabatique La variation d'énergie mécanique est le seul échange avec l'extérieur du système qui modifie alors les paramètres d'états (température, volume, pression). Donc $Q=0$, le premier principe s'écrit comme suite :

$$W = H_2 - H_1 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$h_2 < h_1$ ce qui veut dire qu'il ya une chute d'enthalpie du fluide.

Donc : $W' < 0$ Travail fournit

II.2.1.1.b. Cas d'une pompe :

Et comme $Q=0$

$$W = h_2 - h_1$$

Par ailleurs on montre :

$$\delta W_{\text{ppe}} = V dP \quad (\text{III.3})$$

$$W_{\text{ppe}} = \int V dP \quad (\text{III.4})$$

Comme le volume du fluide dans la pompe est constant : $V = \text{cst}$

$$\text{Donc : } W_{\text{ppe}} = V(P_2 - P_1) \quad (\text{III.5})$$

III.2.1.2. Changement de phase

Un corps pur peut se présenter sous l'une ou plusieurs des trois phases : solide, liquide ou gazeuse. Lorsqu'on chauffe un liquide à pression constante bien choisie, il se transforme en vapeur, et on parle de vaporisation. La température à laquelle cette transformation se réalise dépend de la pression exercée sur le corps considéré. Elle reste constante tant que la vaporisation n'est pas complète.

Pour que ce changement de phase puisse se réaliser, il est nécessaire de fournir ou de retirer de l'énergie, appelée chaleur latente de changement d'état. Au cours de la vaporisation, on observe des variations importantes du volume spécifique, la valeur étant de l'ordre de 600 à 1000 fois moins dense que le liquide. Cette modification de volume spécifique se fait à pression et température constante. [24]

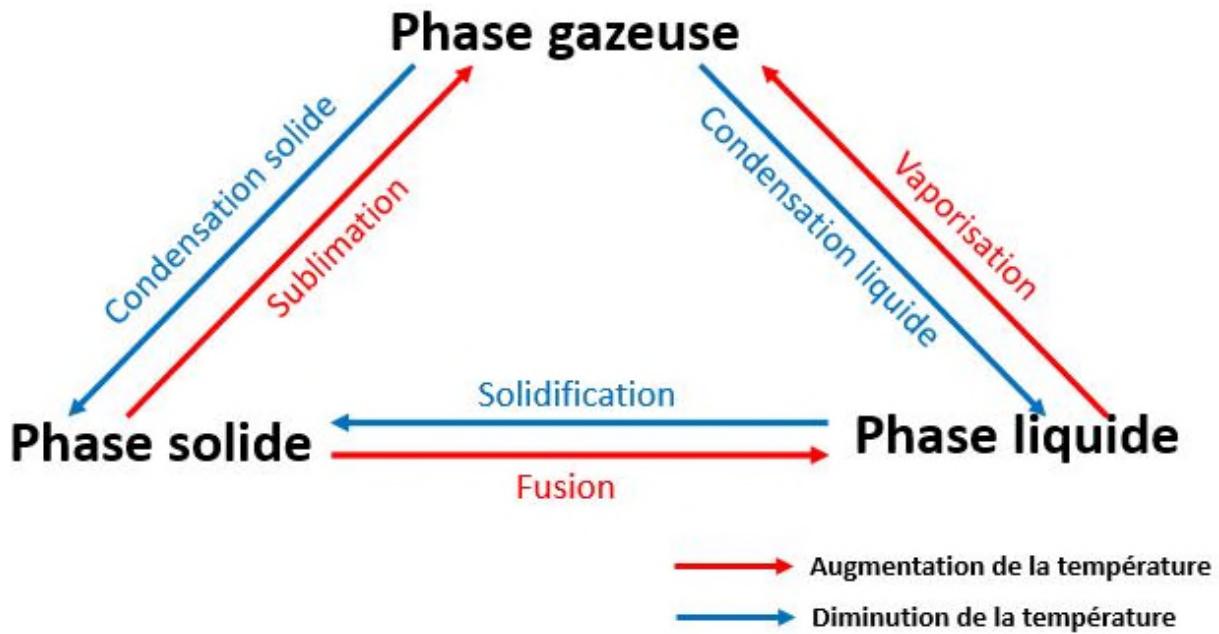


Figure III.1 : Schéma explicatif de changement de phase.

III.2.1.3 : Rappel sur les diagrammes thermodynamiques

II.2.1.3.a. Diagramme PV

Un diagramme PV dit aussi diagramme de Clapeyron est une représentation où on indique la pression d'un système thermodynamique en fonction de son volume massique.

II.2.1.3.b. Diagramme TS

Un diagramme TS dit aussi diagramme entropique est une représentation de la température d'un système thermodynamique en fonction de son entropie.

II.2.1.3.c. Diagramme HS

Un diagramme HS dit aussi diagramme de Mollier est une représentation où on indique l'enthalpie d'un système en fonction de son entropie.

III.2.2 Cycles des centrales à vapeur

On appelle cycles thermodynamiques tous les processus énergétiques qui mettent en œuvre, à température variée, plusieurs formes d'énergie, et les convertissent les unes dans les autres tout en échangeant une partie avec l'environnement. [25]

III.2.2.1 Cycle de Rankine

Le premier processus du cycle de Rankine est l'augmentation de la pression de l'eau provenant de condenseur, à l'aide d'une pompe d'extraction. L'élévation de pression est accompagnée d'une légère augmentation d'enthalpie.

Le deuxième processus de ce cycle correspond à un apport de chaleur à l'eau entrant dans la chaudière passe de l'état liquide à l'état de vapeur, puis est séchée et surchauffée. La production de vapeur est produite à pression constante. La vapeur se détend et se refroidit en traversant la turbine, l'énergie de la vapeur se transforme en travail.

Le dernier processus de ce cycle, est la condensation de la vapeur à la sortie de la turbine. Cette condensation entraîne une perte considérable de chaleur.

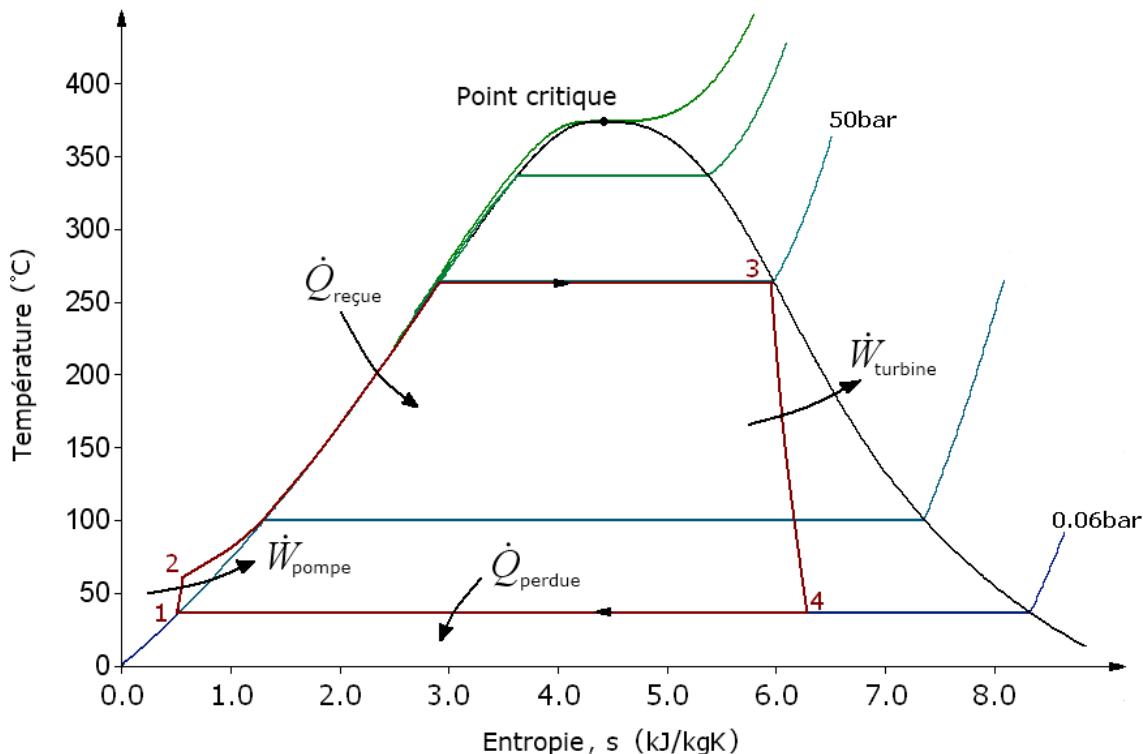


Figure III.2 : Cycle de Rankine

III.2.2.2 Cycle de Hirn

Le cycle de Hirn est un cycle de Rankine avec surchauffe de la vapeur saturante produite. L'intérêt de la surchauffe est d'augmenter l'efficacité de l'installation. Le travail récupéré lors de la détente de la vapeur surchauffée rapporté à la dépense en énergie thermique.

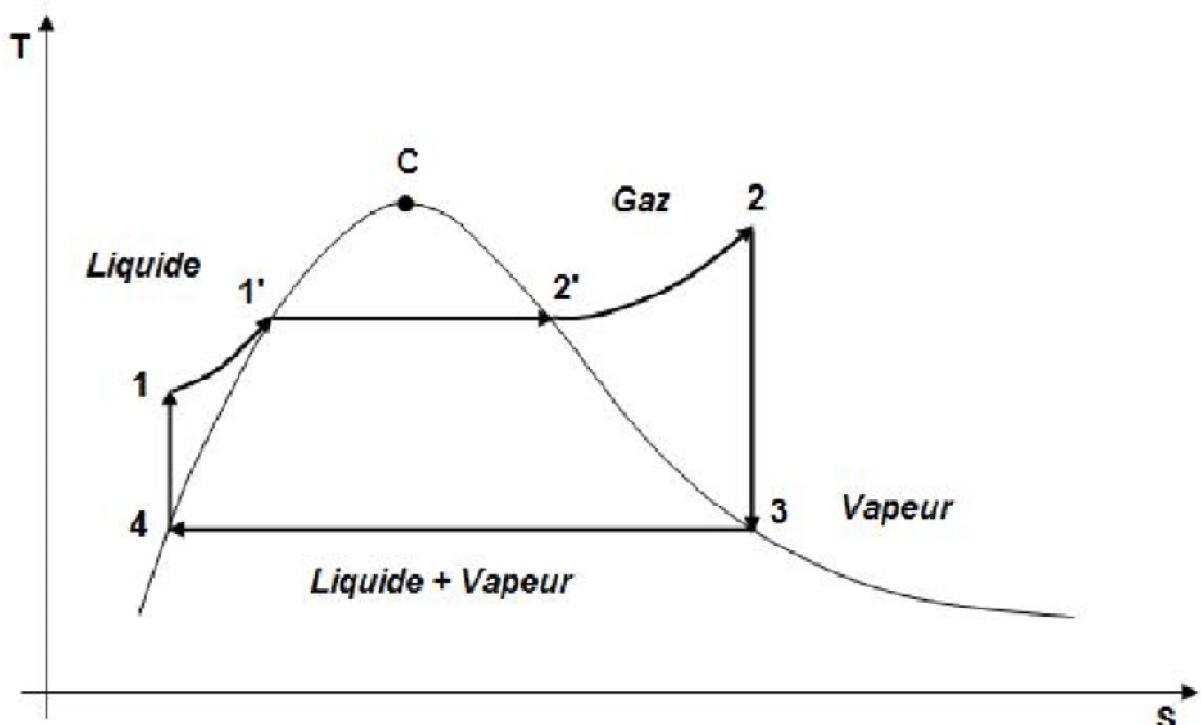


Figure III.3 : Cycle de Hirn

III.2.2.3 Cycle de resurchauffe

A l'entrée de la turbine on aura une vapeur resurchauffé grâce à un autre échangeur de chaleur à la sortie de la chaudière.

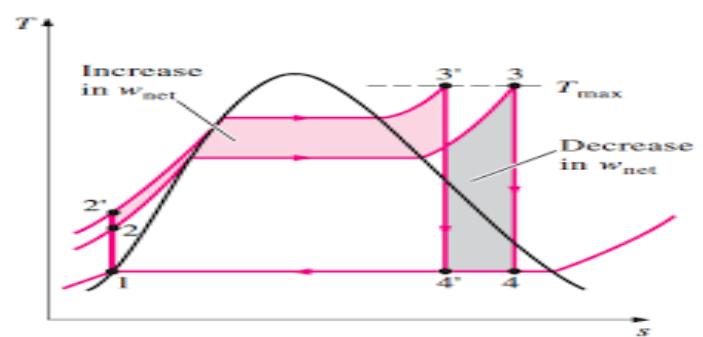


Figure III.4 : Cycle de resurchauffe

III.2.2.4 Cycle à soutirage

Il est connu que la substitution d'un cycle sans soutirage par un autre avec soutirage, engendre un bénéfice thermique. L'optimisation des soutirages repose principalement sur la recherche de la quantité globale de vapeur admise dans la turbine fonctionnant avec des soutirages ainsi que sur la connaissance des débits de vapeur soutirés, qui permettent alors d'aboutir à un maximum de bénéfice thermique par cycle équivalant sans soutirage [26].

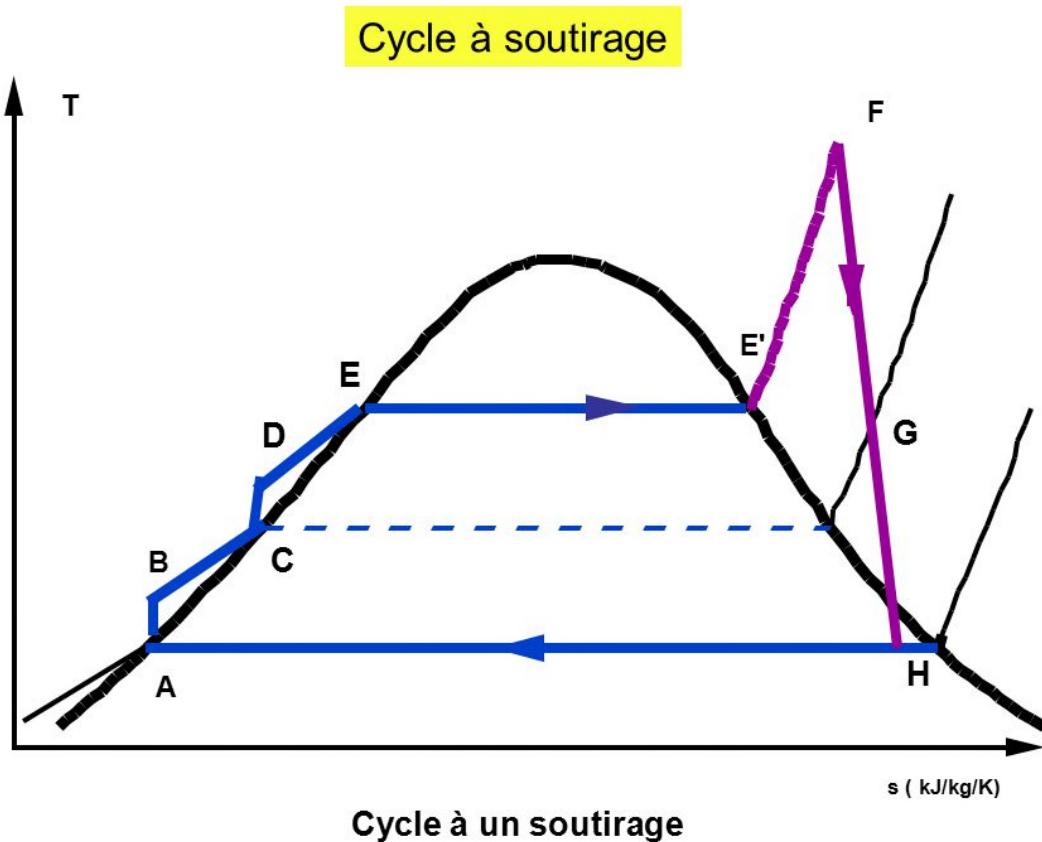


Figure III.5 : Cycle à soutirage

III.3 Cycle thermodynamique de la cogénération au niveau Cevital

La centrale thermique de Cevital est une centrale à cogénération, donc cette dernière n'est pas faite pour la production de l'électricité uniquement, mais aussi pour la production de vapeur qui sera utilisé dans les autres procès. Pour cela ils ont opté pour le cycle de Hirn pour avoir la surchauffe qui dépasse les 400 °C.

III.3.1 Présentation de cycle de Hirn

Dans ce cycle la vapeur sortante de la chaudière est surchauffée à une température qui dépasse les 400 °C avant son entrée dans la turbine, donc on obtient le cycle de Hirn représenté sur la figure (III.6).

Le fluide (est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température) utilisé est l'eau, qui est un fluide facile à se vaporiser et à se condenser.

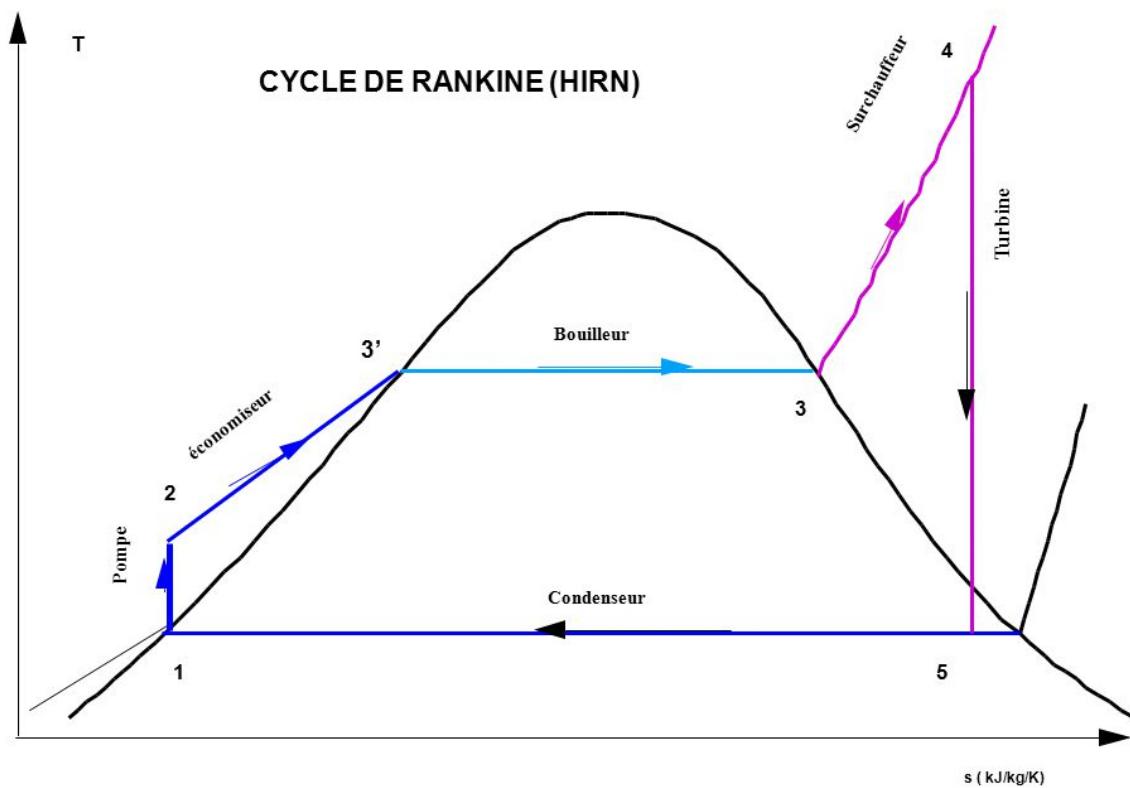


Figure III.6 : Cycle thermodynamique de la centrale Cevital

III.3.2 Interprétation du Cycle

- **Au point 1 :** L'eau initialement est à l'état liquide, à faible température, sous une faible pression.
- **La compression (1-2) :** L'eau liquide peut être légitimement considérée isentropique, à une température 105°C et une pression de 1,21 bar. Comme les isobares liquides sont presque confondues avec la branche montante de la courbe de vaporisation, le point 2 est pratiquement confondu avec le point 1 sur le diagramme entropique.

➤ **Vaporisation et chauffage (2-4)** : L'eau sous pression est ensuite portée à haute température dans la chaudière, l'échauffement comportant les trois étapes suivantes :

- **Evolution (2-3')** : Chauffage du liquide de faible température à la température de début d'ébullition 210 °C à la pression correspondante.
- Le point 3' se trouve sur la courbe vaporisation sur la même isobare que le point 2.
- **Evolution (3'-3)** : Vaporisation à température constante. La vaporisation s'effectuant à la pression et température constantes, elle est traduite sur le diagramme par l'horizontale 3'-3.
 - **Evolution (3-4)** : Surchauffe isobare de la vapeur saturante jusqu'à la température maximale du cycle 480 °C.

III.4 Détermination des caractéristiques thermodynamiques

III.4.1 Calculs au débit minimum

III.4.1.1 Détermination des enthalpies aux différents points du cycle

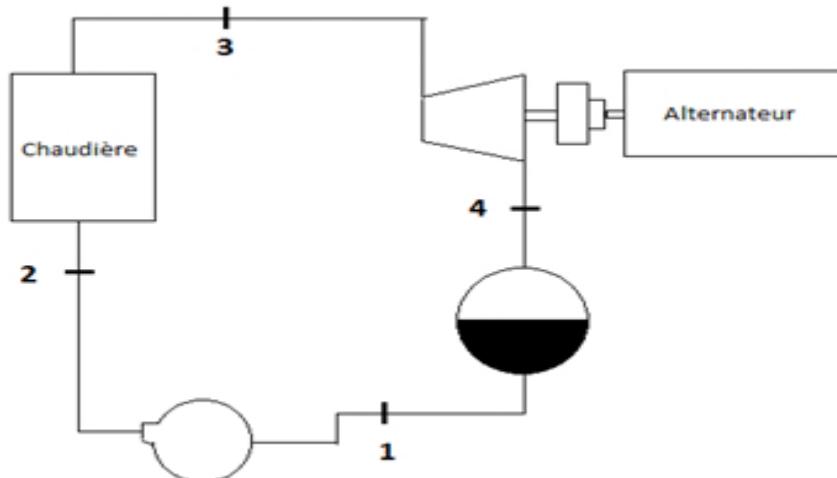


Figure III.7 : Schéma de l'installation de débit

Le calcul des enthalpies à chaque point de cycle (1, 2, 3, 4) dont la pression et la température sont connues, est fait à partir de la table thermodynamique, soit on prend la valeur correspondante directement de la table, soit on fait l'interpolation par rapport à deux valeurs de pression et température.

Avec :

Chapitre III | Calcul des rendements du complexe

- **Etat 1 :** $T = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1,121 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique (voir annexe A) :

$$0,1 \text{ MPa} < 0,112 \text{ MPa} < 0,125 \text{ MPa}$$

$$99,65 \text{ }^{\circ}\text{C} < 105 \text{ }^{\circ}\text{C} < 105,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_1 = 440,1389 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 2 :** $T = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 85 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$5 \text{ MPa} < 8,5 \text{ MPa} < 10 \text{ MPa}$$

$$100 \text{ }^{\circ}\text{C} < 105 \text{ }^{\circ}\text{C} < 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_2 = 444,92 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 3 :** $T = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 54 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$5 \text{ MPa} < 5,4 \text{ MPa} < 6 \text{ MPa}$$

$$450 \text{ }^{\circ}\text{C} < 480 \text{ }^{\circ}\text{C} < 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_3 = 3381,1672 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 4 :** $T = 141 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3,7 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$0,2 \text{ MPa} < 0,27 \text{ MPa} < 0,3 \text{ MPa}$$

$$\text{Saturation} < 141 \text{ }^{\circ}\text{C} < 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$h_4 = 2712,28 \text{ kJ/kg}$

III.4.1.2 Calcul des différentes quantités énergétiques

➤ Travail de la pompe

$$W_{\text{ppe}} = h_2 - h_1 \quad (\text{III.6})$$

$$W_{\text{ppe}} = 444,92 - 440,1389$$

$$W_{\text{ppe}} = 4,7811 \text{ kJ/kg}$$

➤ La chaleur consommée par le cycle

$$Q = h_3 - h_2 \quad (\text{III.7})$$

$$Q = 3381,1672 - 444,92$$

$$Q = 2936,2472 \text{ kJ/kg}$$

➤ Travail de la turbine

Le travail développé par la turbine provient de la chute d'enthalpie du fluide.

$$W_t = h_4 - h_3 \quad (\text{III.8})$$

$$W_t = 2712,28 - 3381,1672$$

$$W_t = -668,8872 \text{ kJ/kg}$$

On introduit le travail au milieu extérieur par la turbine :

$$W_{\text{ext}} = -W_t = 668,8872 \text{ kJ/kg}$$

➤ La chaleur rejetée au condenseur

$$Q_c = h_1 - h_4 \quad (\text{III.9})$$

$$Q_c = 440,1389 - 2712,28$$

$$Q_c = -2272,1411 \text{ kJ/kg}$$

III.4.1.3 Rendement thermodynamique

$$\eta_{\text{th}} = (W_{\text{ext}} - W_{\text{ppe}}) / Q \quad (\text{III.10})$$

$$\eta_{\text{th}} = (668,8872 - 4,781) / 2936,2472$$

$$\eta_{\text{th}} = 22,62 \%$$

III.4.1.4 Calcul du rendement de l'alternateur

La puissance électrique est produite à partir de puissance mécanique délivrée par la turbine telle que la puissance mécanique :

$$P_{mec} = W_{et} * \dot{q} \quad (\text{III.11})$$

Avec : $\dot{q} = 76 \text{ t/h}$

$$\dot{q} = 76 * (1000 / 3600) \text{ kg/s}$$

$$\dot{q} = 21.11 \text{ Kg/s}$$

$$P_{mec} = 668,8872 * 21.11$$

$$P_{mec} = 14120.20 \text{ KW}$$

$$P_{mec} = 14.12 \text{ MW}$$

La puissance électrique c'est la puissance fournie par l'alternateur.

Le rendement d'un alternateur est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée

$$\eta_{alt} = (\text{puissance utile} / \text{puissance absorbée}) \quad (\text{III.12})$$

Dans notre cas la puissance absorbée c'est la puissance mécanique délivré par la turbine et la puissance utile est celle délivrée par l'alternateur sous forme électrique.

La puissance électrique est relevée expérimentalement : (voir tableau annexe C) est de 10.05 MW pour un débit de 76 t/h ; d'où le rendement de l'alternateur :

$$\eta_{alt} = P_{ele} / P_{mec} = 10.05 / 14.12 \quad (\text{III.13})$$

Nous obtenons un rendement d'environ : 71 %

III.4.2 Cas d'un débit maximal

III.4.2.1 Détermination des enthalpies aux différents points du cycle

- **Etat 1 :** $T = 103 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1,11 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique (voir annexe A) :

$$0,1 \text{ MPa} < 0,111 \text{ MPa} < 0,125 \text{ MPa}$$

$$99,65 \text{ }^{\circ}\text{C} < 103 \text{ }^{\circ}\text{C} < 105,99 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_1 = 432,22 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 2 :** $T = 103 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 66 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$5 \text{ MPa} < 6,5 \text{ MPa} < 10 \text{ MPa}$$

$$100 \text{ }^{\circ}\text{C} < 103 \text{ }^{\circ}\text{C} < 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_2 = 436,565 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 3 :** $T = 476 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 53,39 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$5 \text{ MPa} < 5,339 \text{ MPa} < 6 \text{ MPa}$$

$$450 \text{ }^{\circ}\text{C} < 476,032 \text{ }^{\circ}\text{C} < 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_3 = 3372,19 \text{ kJ/kg}$$

- **Etat 4 :** $T = 183 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 4,2 \text{ bar}$

Nous avons d'après la table thermodynamique :

$$0,3 \text{ MPa} < 0,329 \text{ MPa} < 0,4 \text{ MPa}$$

$$150 \text{ }^{\circ}\text{C} < 183 \text{ }^{\circ}\text{C} < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

À partir de la table thermodynamique nous donne :

$$h_4 = 2795,5674 \text{ kJ/kg}$$

III.4.2.2 Calcul des différentes quantités énergétiques

➤ Travail de la pompe

$$W_{ppe} = h_2 - h_1 \quad (\text{III.14})$$

$$W_{ppe} = 436,5659 - 432,22$$

$$W_{ppe} = 4,3459 \text{ kJ/kg}$$

➤ La chaleur consommée par le cycle

$$Q = h_3 - h_2 \quad (\text{III.15})$$

$$Q = 3372,219 - 436,5659$$

$$Q = 2935,6531 \text{ kJ/kg}$$

➤ Travail de la turbine

Le travail développé par la turbine provient de la chute d'enthalpie du fluide.

$$W_t = h_4 - h_3 \quad (\text{III.16})$$

$$W_t = 2795,5674 - 3372,219$$

$$W_t = -576,65 \text{ kJ/kg}$$

On introduit le travail au milieu extérieur par la turbine :

$$W_{et} = -W_t = 576,65 \text{ kJ/kg}$$

➤ La chaleur rejetée au condenseur

$$Q_c = h_1 - h_4 \quad (\text{III.17})$$

$$Q_c = 432,22 - 2795,5674$$

$$Q_c = -2363,34 \text{ kJ/kg}$$

III.4.2.3 Rendement thermodynamique

$$\eta_{th} = (W_{et} - W_{ppe}) / Q \quad (\text{III.18})$$

$$\eta_{th} = (576,65 - 4,3459) / 2935,6531$$

$$\eta_{th} = 19,494 \%$$

III.4.1.4 Calcul du rendement de l'alternateur

La puissance électrique est produite à partir de la puissance mécanique délivrée par la turbine telle que la puissance mécanique:

$$P_{méc} = W_{et}^* \dot{q} \quad (\text{III.19})$$

Avec : $\dot{q} = 122 \text{ t/h}$

$$\dot{q} = 122 * (1000 / 3600) \text{ kg/s}$$

$$\dot{q} = 33.88 \text{ Kg/s}$$

$$P_{méc} = 576, 65 * 33.88$$

$$P_{méc} = 19533.85 \text{ KW}$$

$$P_{méc} = 19.53 \text{ MW}$$

La puissance électrique est relevée expérimentalement (voir annexe C) et vaut:

$P_{éle} = 14.6 \text{ MW}$ pour un débit de 122 t/h, d'où le rendement de l'alternateur :

$$\eta_{alt} = P_{éle} / P_{méc} \quad (\text{III.20})$$

$$\eta_{alt} = 14.6 / 19.53$$

$$\eta_{alt} = 74 \text{ %}$$

III.4.3 Interprétation des résultats

Dans cette partie et pour les deux valeurs de débits minimal et maximal, nous avons calculé les enthalpies de chaque état afin de déterminer les quantités énergétiques qui nous ont servie pour le calcul du rendement thermique et la puissance électrique de la centrale.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (III.1) suivant :

Débit (Tonnes/heure)	Rendement thermique en %	Rendement électrique %
Minimal 76	22.62	71
Maximal 122	19.494	74

Tableau III.1 : Résultat de la partie calcul.

- On remarque que lorsque le débit augmente de 76 t/h à 122t/h le rendement thermique diminue de 22,62 % à 19,494% soit une différence de 3,126 %.
- Le rendement électrique, passe de 71% à 74% soit une croissance de 3%

- Le rendement thermique de cette centrale est faible puisqu'il s'agit d'une turbine à contre pression pour des besoins du process élevés d'où un travail relativement faible et par conséquent un rendement plus faible.
- La puissance électrique fournie par cette centrale est de l'ordre de 14.6MW, à un débit de l'ordre de 122 t/h, cette puissance dépend du travail fourni par la turbine et aussi du débit massique du fluide.

III.5 Performance du groupe turboalternateur

III.5.1 Caractéristique de fonctionnement [26]

À la suite des besoins croissants du complexe, la pression d'échappement a été augmentée de 3,7bar à 4,2bar.

Le tableau (III.2) suivant, nous montre les caractéristiques de fonctionnement du groupe turboalternateur à chaque état de charge à la pression désirée :

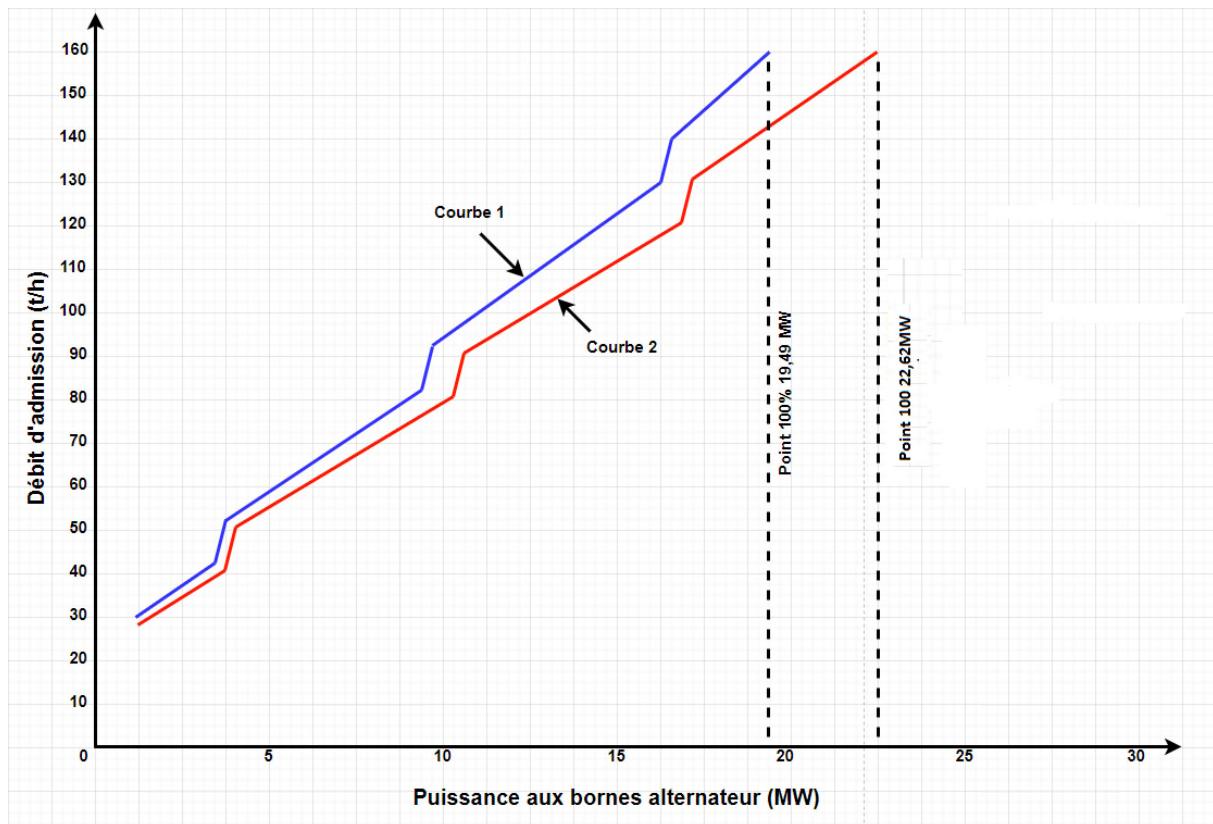
		Unités	100%	75%	50%
Turbine	Précision	Bar abs	54	54	54
Bride entrée	Température	°C	476	476	476
Turbine	Pression	Bar abs	2.7	3.7	4.2
Bride échappement	Enthalpie	Kcal/kg	672	679	689
	Température	°C	177	190	211
Vitesse de rotation	Turbine	RPM	5900	5900	5900
	Alternateur	RPM	1500	1500	1500
Puissance	Bornes alternateur	MW	25	22.62	19.494

Tableau III.2 : Caractéristique de fonctionnement

III.5.2 Courbe de performances

La variation du débit en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur pour les deux valeurs de pression d'échappement (3,7 et 4,2 bar) est illustré dans (figure III.8), en respectant les conditions suivantes qui sont données par le constructeur :

- Vapeur d'admission 54 bar abs_476 °C.
- Vitesse de rotation 5900 tr/min.



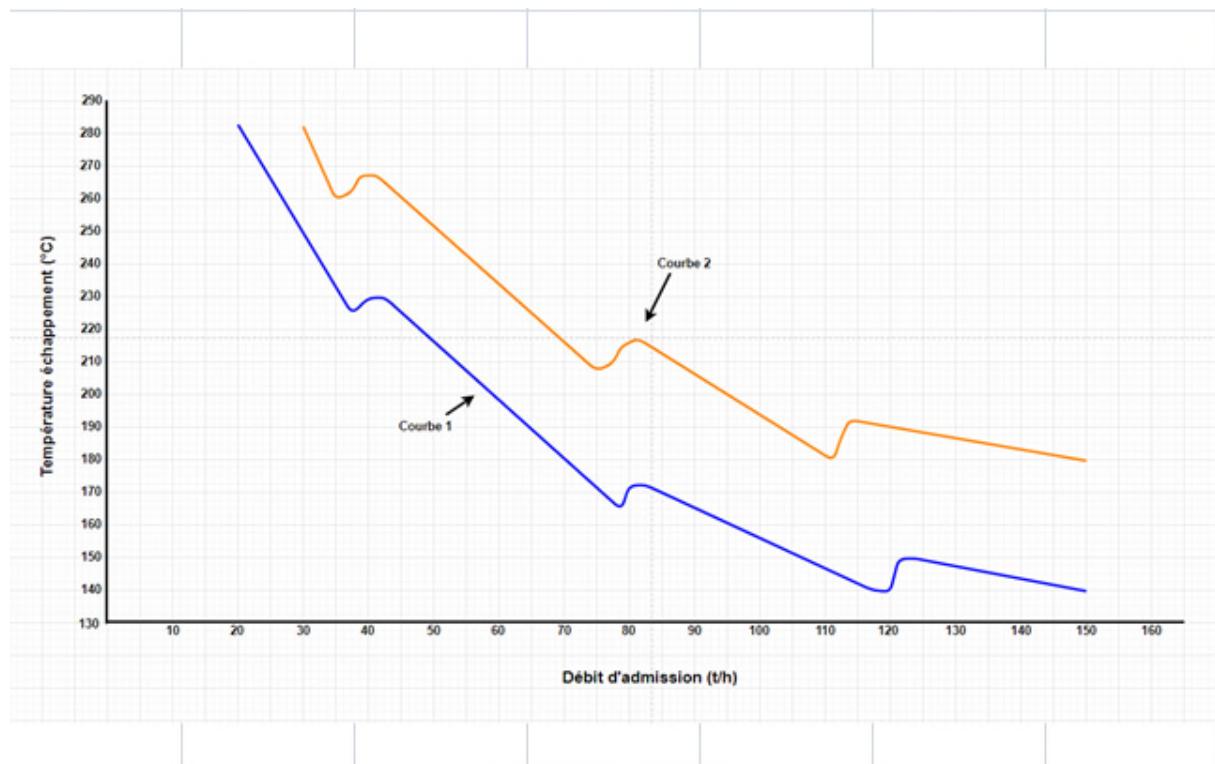
- **Courbe 1 : Pression échappement 3.7 bar**
- **Courbe 2 : Pression échappement 4.2 bar**

Figure III.8 : Courbe de performance

III.5.3 Courbe de température d'échappement

La variation de température d'échappement en fonction débit pour les deux valeurs de pression d'échappement (3,7 et 4,2bar) est illustrée dans la figure dans la (figure III.9), en respectant les conditions suivantes

- Vapeur d'admission 54 bar abs_ 475 °C.
- Vitesse de rotation 5900 tr/min.



- **Courbe 1 : Pression échappement 3.7 bar**
- **Courbe 2 : Pression échappement 4.2 bar**

Figure III.9 : Courbe de température d'échappement

III.5.4 Commentaire sur les courbes

D'après le graphe de la figure (III.8), on remarque que l'augmentation du débit d'admission, entraîne une augmentation de la puissance aux bornes de l'alternateur et cela dans les deux cas (à pression 3,7 bar et 4,2 bar).

La figure (III.9), nous montre que si la température d'échappement diminue le débit d'admission augmente dans les deux cas à pression 3,7bar et 4,2bar.

III.5.5 Courbes de correction des performances

Les courbes de correction pour le point garanti (22,26 MW) sont comme suit :

a) *Courbe de correction de température d'admission*

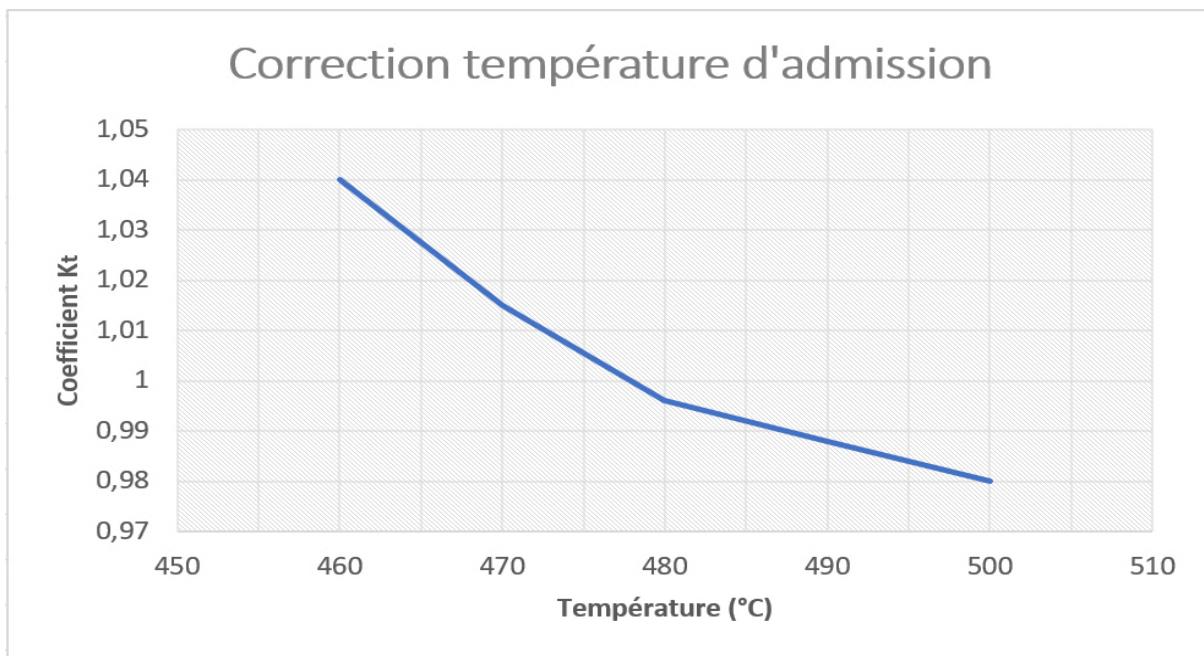


Figure III.10.a : Courbe de correction « température d'admission »

b) *Courbe de correction de la pression d'admission*

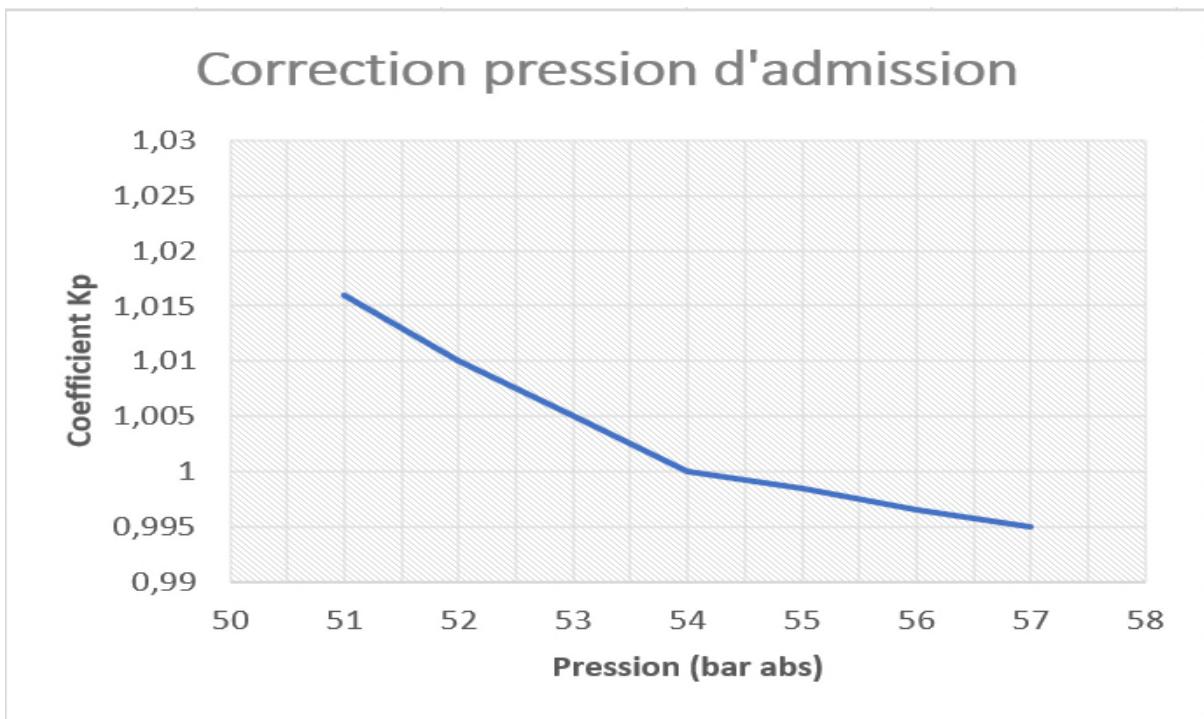


Figure III.10.b : Courbe de correction « pression d'admission »

c) *Courbe de correction de la pression d'échappement*

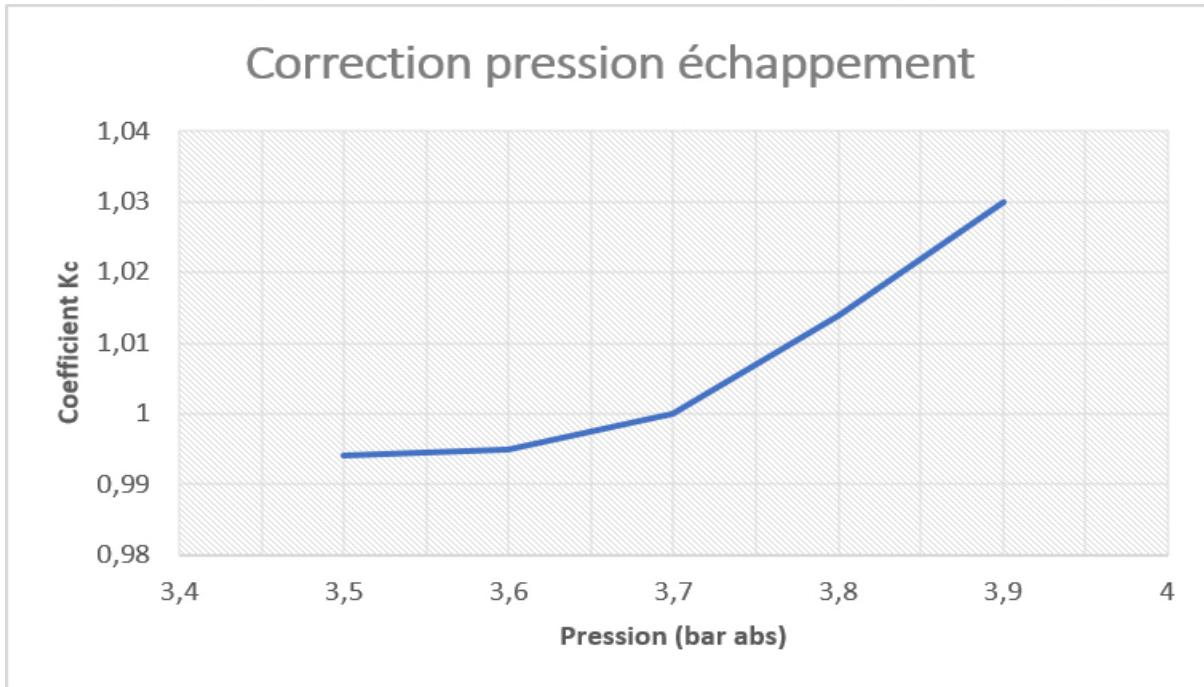


Figure III.10.c : Courbe de correction « pression d'échappement »

III.5.1.1 Commentaire sur les courbes

a) Courbe de correction de température d'admission

D'après la figure (III.10.a), on note une diminution du coefficient Kt avec l'augmentation de la température d'admission, en revanche le débit diminue.

b) Courbe de correction de la pression d'admission

D'après la figure (III.10.b), on note une diminution du coefficient Kp avec l'augmentation de la pression d'admission, donc le débit augmente.

c) Courbe de correction de la pression d'échappement

D'après la figure (III.10.c), on remarque que lorsque la pression d'échappement augmente le coefficient Kc augmente aussi, par suite le débit augmente.

III.5.5.2 Application des courbes de correction

Point garanti (22,26 MW)

	Valeurs contractuelles	Valeurs mesurées	Valeurs maximales des courbes
	(exemple)		
Débit vapeur admission turbine	150000 Kg/h	$Q_m=150000$ Kg/h	$Q_m=150000$ Kg/h
Température admission turbine	476 °C	473 °C	500 °C
Pression admission Turbine	54 bar abs	55 bar abs	57 bar abs
Pression échappement	2.7bar abs	3.75bar abs	4.2bar abs
Puissance garantie	25000 KW	$P1=22620$ KW	$P2=19494$ KW
Consommation spécifique	6.739 Kg/KWh	C_s	C_s

Tableau III.3 : Tableau de correction

❖ Coefficient de correction des valeurs mesurées

- Correction de température d'admission de la turbine à $T = 473$ °C.
 $K_t = 1,0067$ d'après la courbe (**III.10.a**)
- Correction de la pression d'admission de la turbine à $P = 55$ bar.
 $K_p = 0,9979$ d'après la courbe (**III.10.b**)
- Correction de la pression d'échappement de la turbine à $P_c = 3,75$ bar.
 $K_c = 1,007$ d'après la courbe (**III.10.c**)

❖ Coefficient de correction des valeurs maximales

- Correction de température d'admission de la turbine à $T = 500$ °C.
 $K_t = 0,98$ d'après la courbe (**III.10.a**)
- Correction de la pression d'admission de la turbine à $P = 57$ bar.
 $K_p = 0,98$ d'après la courbe (**III.10.b**)
- Correction de la pression d'échappement de la turbine à $P_c = 3,9$ bar.abs
 $K_c = 1,03$ d'après la courbe (**III.10.c**)

III.5.5.3 Calcul de consommation spécifique corrigé

III.5.5.3.1 Au point mesuré

$$Cs \text{ corrigé} = Qm / (P1 * Kt * Kp * Kc) \quad (\text{III.21})$$

$$Cs \text{ corrigé} = 150000 / (22260 * 1,0067 * 0,9979 * 1,007)$$

$$Cs \text{ corrigé} = 6,661 \text{ Kg/KWh}$$

III.5.5.3.2 Au point maximal

$$Cs \text{ max} = Qm / (P1 * Kt * Kp * Kc) \quad (\text{III.22})$$

$$Cs \text{ max} = 150000 / (22260 * 0,98 * 0,995 * 1,03)$$

$$Cs \text{ max} = 6,7093 \text{ Kg/KWh}$$

III.5.5.3.3 La comparaison

	K_t	K_p	K_e	$C_p \text{ [Kg/KWh]}$
Consommation spécifique garantie	1	1	1	6.739
Consommation spécifique corrigé au point mesuré	1.0067	0.9979	1.007	6.661
Consommation corrigée au point maximale	0.98	0.995	1.03	6.7093

Tableau III.4 : Comparaison des valeurs de consommation spécifique

On remarque que la consommation spécifique dépend des coefficients suivants :

K_t , K_c et K_p et cela d'après la formule :

$$Cs \text{ corrigé} = Qm / (P1 * Kt * Kp * Kc)$$

Ces coefficients sont déterminés à partir de la variation des paramètres qui sont les suivants :

- La température d'admission
- La pression d'admission
- La pression d'échappement

On fait varier les paramètres suivants : température d'admission, pression d'admission et Pression d'échappement, on détermine la valeur de chaque coefficient à partir des courbes de correction puis on détermine la nouvelle valeur de consommation spécifique.

III.5.6 Etude expérimentale du groupe par rapport à une pression de 3,7bar

III.5.6.1 Courbes de fonctionnement instantané du GTA pendant le mois janvier (voir annexe B)

Dans cette partie nous présenterons tous les résultats obtenus à partir des relevés expérimentaux de : pression d'admission, pression d'extraction, température d'admission, température d'extraction, pris dans la salle de commande de la centrale thermique de Cevital (salle de supervision).

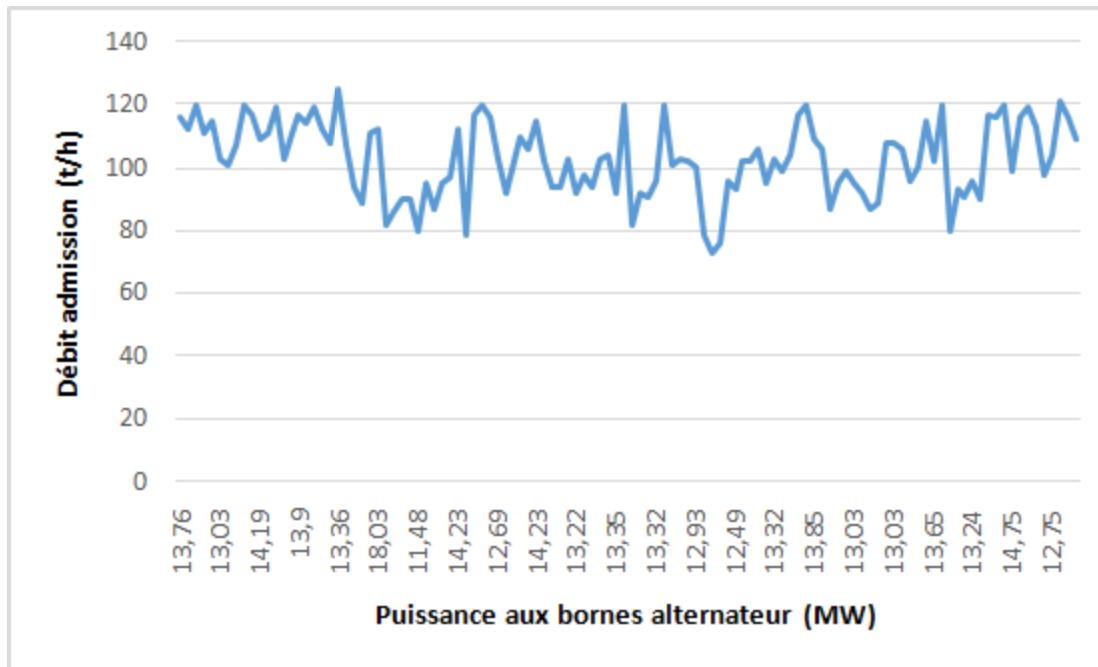


Figure III.11 : Variation du débit d'admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

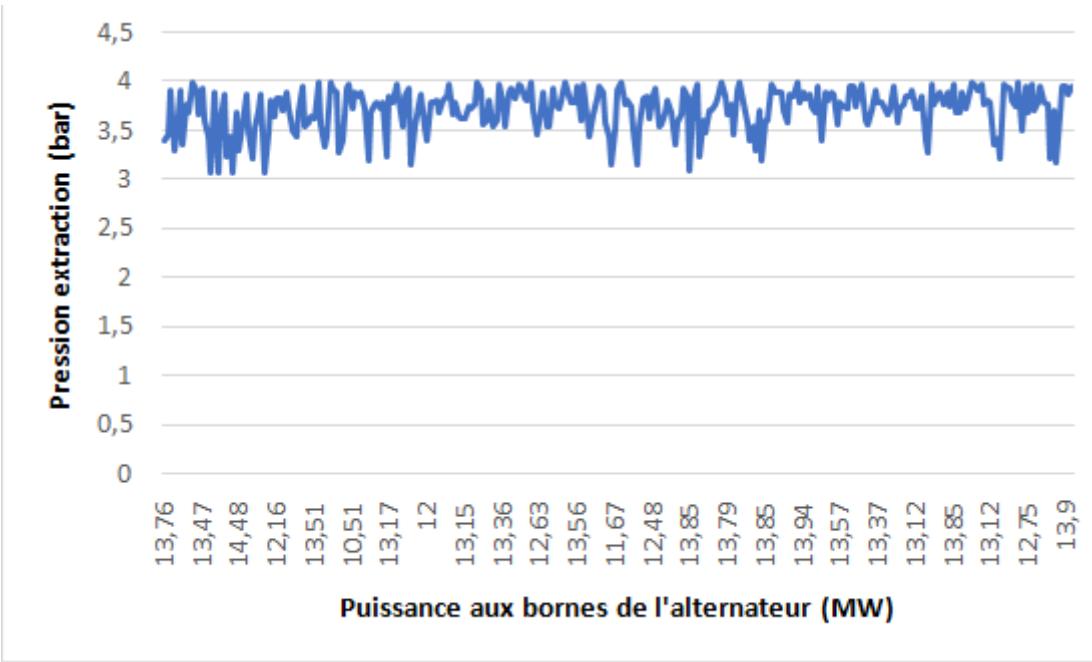


Figure III.12 : Variation de la pression d'extraction en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

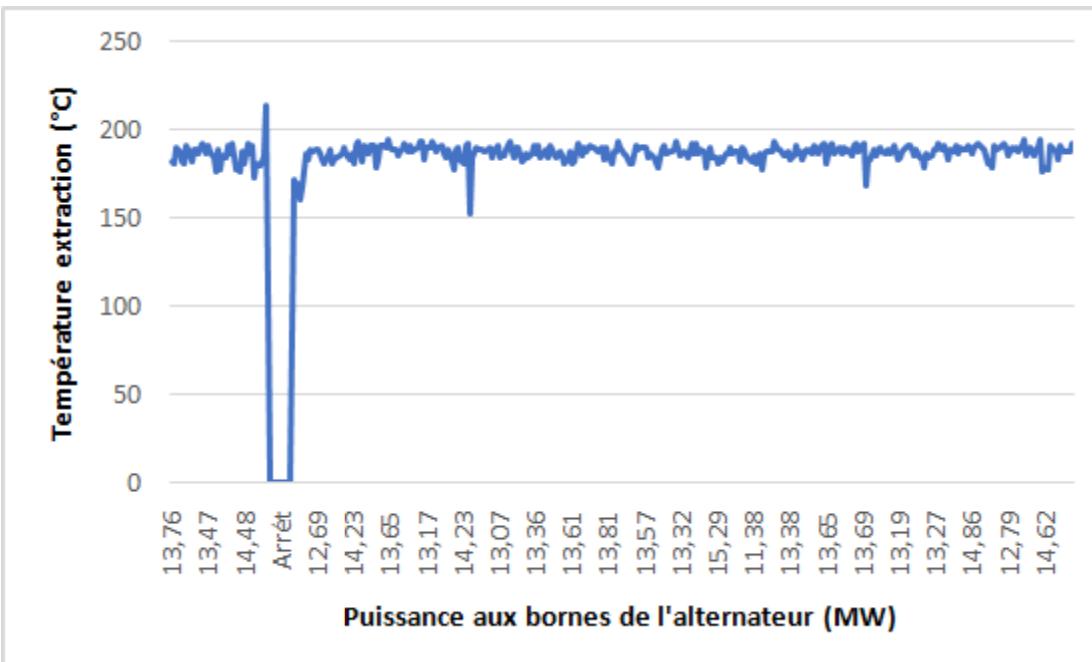


Figure III.13 : Variation de la température d'échappement en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

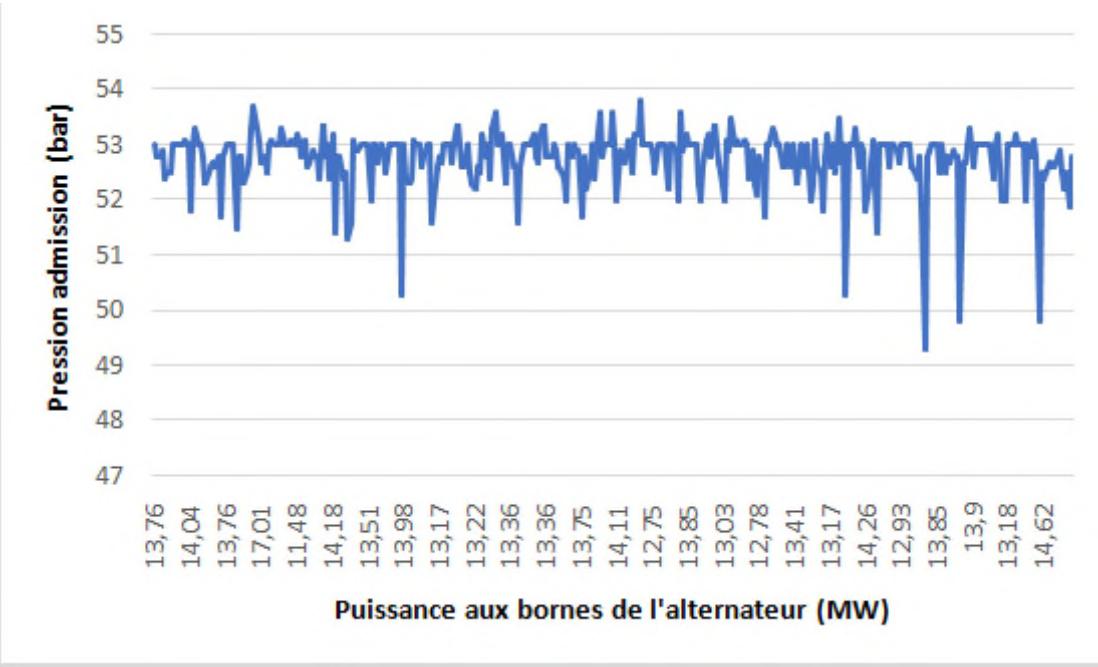


Figure III.14 : Variation de la pression d'admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

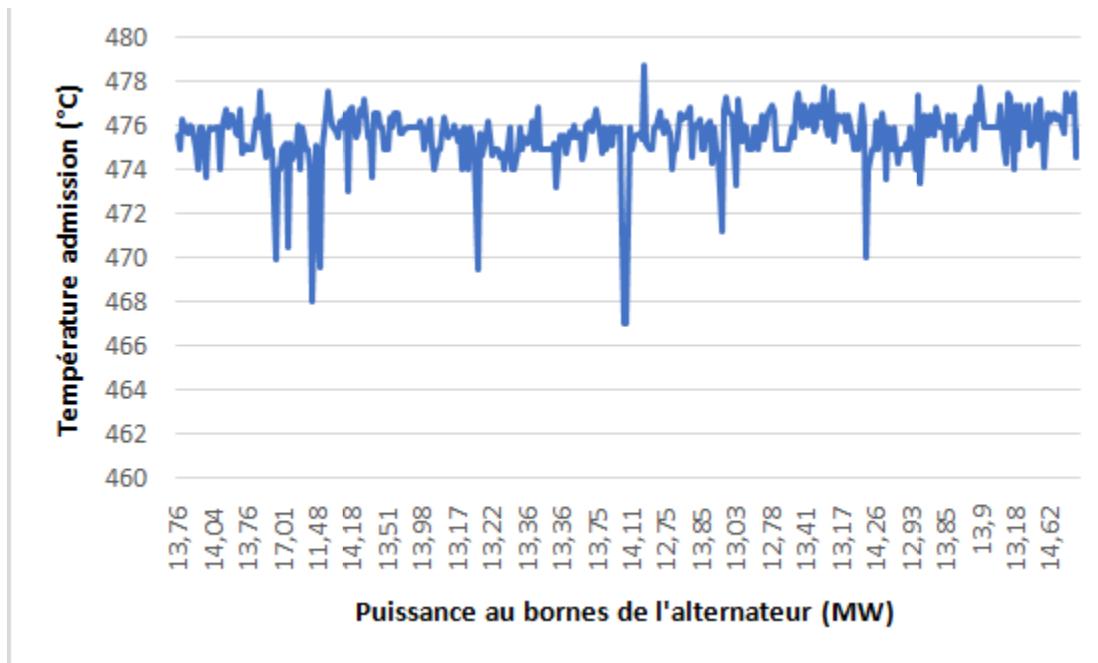


Figure III.15 : Variation de la température d'admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

III.5.6.2 Commentaires sur les courbes

L'analyse des courbes, nous permet de tirer les enseignements suivants :

Les trois premières courbes des figures (III.11), (III.12), et (III.13), nous montrent que le débit, la température d'extraction et la pression d'extraction sont variables selon la variation de la puissance électrique, cette variation est dans l'intervalle du segment [3,7 4,2]. La valeur limite de la pression d'échappement donnée par le fournisseur est de 3,7 bars. Et les pics dans les courbes des figures (III.11), (III.12), et (III.13), représentent les valeurs qui ont dépassé cette valeur et qui est égale à 4,2 bars. On remarque aussi un pic sur chacune de ses courbes. Ce pic signifie une perturbation au niveau de ce groupe. Cette perturbation est due à une brusque baisse de pression.

Dans les deux autres courbes des figures (III.14) et (III.15), on remarque que les paramètres : température d'admission et la pression d'admission sont variables selon la variation de la puissance électrique aux bornes de l'alternateur.

Un pic dû à l'arrêt n'apparaît pas dans ces courbes puisque le redémarrage en température et la pression admission est plus rapide.

III.6 Conclusion

L'énergie thermique est une énergie qui ne peut pas être récupérée totalement, vu qu'il y a toujours une partie qui se dissipe vers l'extérieur, par conséquent le rendement thermique est toujours inférieur à 50%.

Dans ce chapitre, nous avons déterminé en premier lieu le rendement thermique de cette centrale, puis la puissance électrique fournit au niveau de l'alternateur en tenant compte des valeurs de débit maximal et minimal.

Nous avons aussi étudié les performances du groupe turboalternateur après avoir augmenté la pression d'échappement de 3,7bar à 4,2bar. Cette augmentation à une influence sur les autres paramètres de fonctionnement ainsi que sur le travail de la turbine qui a à son tour une influence sur la puissance électrique. On a augmenté la pression d'échappement à 4,2bar pour une production supérieure et cette valeur se trouve être le maximum qu'on puisse atteindre au risque de griller les machines. Nous pouvons donc conclure que la variation de la puissance électrique fait varier la consommation spécifique

Conclusion générale

La centrale thermique à flamme de Cevital est une centrale de production simultanée de chaleur et d'énergie électrique, ce qu'on appelle « une centrale à cogénération ». Cette cogénération est faite grâce à la capacité de la chaudière de fournir une grande quantité de vapeur.

Le présent mémoire a pour principal objectif l'étude comparative du rendement à différentes pressions d'échappement. On a retenu deux valeurs particulières dont la maximale qui est de 4,2bars, et celle donnée par le fournisseur qui est égale à 3,7bar.

Nous avons, en premier lieu, présenté le turboalternateur, système électromécanique qui se compose de deux sous-systèmes : le premier est la turbine dont la fonction est de convertir l'énergie thermique fournie par la chambre de combustion en énergie mécanique et le deuxième est l'alternateur qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique.

En second lieu, nous avons expliqué le fonctionnement de l'unité de production de l'énergie électrique au sein du complexe Cevital. Le mode de fonctionnement et les caractéristiques du groupe turboalternateur, des alternateurs et des turbines à gaz sont passées en revue.

Dans la dernière partie de ce travail nous avons étudié expérimentalement l'influence de la puissance éclectique du groupe turboalternateur sur les paramètres de cette centrale (température admission, température échappement, pression admission, pression d'extraction). Aussi nous avons pu confirmer la faisabilité et l'intérêt d'une production avec une pression d'échappement de 4,2bar comparativement aux valeurs du constructeur.

Annexes

Annexes

Annexe A :

❖ Tables thermodynamiques

T=105°C, P=1.121bar, T=103°C, P=1.11bar

Pression MPa	Température °C	Sat.	Evap	Sat. Vapor	Sat.	Evap.	Sat.
		Liquide	H _{fg}	H _g	Liquide N _f	S _{fg}	Vapor S _g
0.100	99.65	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.111	103	432.22	2250.8	2679.6	1.3255	6.0079	7.3223
0.121	105	440.1389	2243.66	2681.2	1.3601	5.9830	7.3065
0.125	105.99	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844

T=105°C, P=85 bar, T=103°C, P=66bar

P=5MPa				P=10MPa					
T	V	U	H	S	v	u	h	S	
100	0.0010410	417.52	422.72	1.3030	0.0010385	416.12	426.50	1.2992	
103	0.0010452	487.98	436.565	1.3975	0.0010492	470.64	450.78	1.4214	
105	0.0010482	499.36	444.92	1.4695	0.0010499	488.23	465.73	1.5001	
120	0.0010576	501.80	507.09	1.5233	0.0010549	500.08	510.64	1.5189	

T=480°C, P=54bar, T=476°C, P=53.39bar

P=5MPa					P=10MPa				
T	V	U	H	S	v	u	h	S	
450	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186	0.05214	2988.9	3301.8	6.7193	
476	0.06338	3025.2	3372.19	6.8662	0.05291	2998.2	3357.1	6.7823	
480	0.06686	3062	3381.1672	6.9224	0.05432	3012.8	3387.9	6.8223	
500	0.06857	30910	3433.8	6.9759	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803	

Annexes

T=141°C, P=3.7bar

P=0.2MPa					P=0.3MPa				
T	V	U	H	S	v	u	h	s	
Sat	0.8857	2529.5	2708.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	
141	0.9089	2569.3	2712.28	7.2008	0.6118	2560.8	2758.8	7.0364	
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	

T=183°C, P=4,2bar

P=0.3MPa					P=0.4MPa				
T	V	U	H	S	v	u	h	s	
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	
183	1.0235	2594.1	2795.5674	7.3598	0.6865	2587.9	2804.9	7.1589	
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	

Annexe B :

- ❖ **Les intervalles de segments sont donnés par le fournisseur (Thermodyn)**
- Température échappement à 140 °C (> 140 °C) entre [150 °C, 200 °C]
- Température admission : [470°C, 480°C]
- Pression extraction : [3 bar, 3,7 bar]
- Pression admission : maximum à 54 bar (les soupapes sont ouverts de [0 jusqu'à 100%] entre [52 bar, 54 bar]

Annexes

Annexe C :

❖ Paramètres du groupe turboalternateur (GTA) pendant le mois janvier

➤ Annexe C1

Débit Chaudière	Température Admission	Température Extraction	Pression Extraction	Pression Admission	Puissance aux Bornes Alternateur
T/h	°C	°C	Bar g	Bar g	Mw
116	475,6	181,3	3,41	53	13,76
112	475	180,4	3,47	52,8	13,58
114	476,3	190,1	4,05	52,8	14
104	475,8	186,9	3,91	52,9	13,98
120	475,7	181,7	3,3	52,4	13,89
111	476,1	180,1	3,45	52,5	14,07
115	476	190,8	4,1	52,5	14,09
121	475	189	3,91	53	14,18
115	474	182	3,36	53	14,14
115	476	188	3,77	53	13,7
103	476	188	3,7	53	13,03
86	473,7	186,8	4,04	53	13,37
77	475,7	191,6	3,99	53,1	12,89
106	476	190,4	3,91	53	12,82
101	475,9	186,5	3,67	51,8	14,04
110	476	190,5	3,94	53	13,47
107	476	187	3,61	53,3	12,64
120	474	184	3,45	53	12,26
117	476	176	3,08	53	14,47
114	476,8	188,2	3,89	52,8	14,04
109	476	176,6	3,08	52,3	14,19

Annexes

➤ Annexe C2

111	476,5	184,7	3,61	52,5	13,99
112	476,5	184,2	3,88	52,6	13,91
107	475,7	191,1	4,06	52,7	13,9
113	475,6	186,2	4,2	52,6	13,65
106	476,8	191,6	4,27	52,8	14,43
119	474,8	177,5	3,24	51,7	13,99
103	475,1	178	3,44	52,8	13,85
111	475	176	3,09	53	13,76
117	475	187	3,69	53	13,9
114	475	181	3,3	53	14,48
116	476,3	191,5	4,09	53	13,91
119	476	186	3,57	51,5	14,23
118	477,6	191	3,88	52,8	13,46
112	476	173	2,81	52,8	13,77
108	474,6	180,6	3,48	52,3	13,57
125	476,5	179,6	3,23	52,5	13,36
107	475	182	3,53	52,7	13,27
88	475	184,6	3,72	53,3	12,49
58	469,9	213,5	3,87	53,7	7,22
a l'arrêt					
a l'arrêt					
a l'arrêt					
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt

Annexes

➤ Annexes C3

Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt
94	474	171	2,43	53,3	10,52
89	474	168	2,78	53,1	11,38
111	475	169,2	3,09	52,7	17,01
112	475,2	159,6	2,59	52,8	18,03
82	470,5	167	3,48	52,5	20,32
86	475,2	186,7	3,82	53	12,16
86	474,5	183,4	3,65	53,1	12,4
96	475	188,1	3,84	53	12,16
113	476,1	186,9	3,84	53	13,18
110	474	188	3,71	53	13,55
98	476	188	3,9	53,3	12,69
92	475	186	3,73	53	13,46
90	475	183	3,51	53	13,28
90	474	180	3,44	53	13,22
76	468	185	3,72	53,1	10,05
85	475,1	188	3,95	53	11,58
80	471,5	180	3,54	53,2	11,48
95	469,6	182,4	3,6	53,1	11,62
87	475	184,5	3,66	52,8	12,18
95	476,6	185	3,64	53,1	13,51
116	477,6	186,1	4	52,6	13,51
102,1	476,6	190	4,04	52,7	14,04
95	476,1	186,1	4,12	52,9	14,01

Annexes

➤ Annexes C4

97	475,8	182,7	3,57	52,8	14,04
98	475,5	186,4	4,01	52,8	13,95
112	476,2	180	3,35	52,4	14,23
100	476	191,3	4,17	53,4	11,69
103	476,6	193,3	4,1	52,8	11,97
79	473	181,2	3,45	53	11,39
111	476,8	190,6	3,99	52,4	12,98
104	476,9	186,9	3,94	53,2	14,18
117	475,5	186,1	4,04	51,4	14,06
97	475,8	190,6	4,27	52,8	14,01
115	476,8	190,8	3,89	52,8	13,83
117	476,5	178,8	3,29	52,4	13,94
120	477,2	182,8	3,41	52,5	13,94
119	475,5	190,3	3,94	51,3	13,99
120	475,6	191,2	4,04	51,6	14,05
89	473,7	189,3	3,97	53,1	11,01
123	476,6	194,6	3,74	52,9	10,51
112	476,6	189,9	4,08	52,9	13,65
122	476	189	3,9	53	14,6
120	476	189	3,85	53	14,9
100	475	185	3,89	53	14,86
103	475	187	3,74	53	13,51
116	476,4	188,1	3,21	52	13,61
115	476	191,6	4,06	53	12,28
103	476,6	187	3,69	53	12,69
114	476,6	191,3	4,02	52,7	12,59

Annexes

➤ Annexes C5

112	475,7	187,2	3,78	53	12,83
111	475,7	188,2	3,79	52,9	12,64
113	475,9	190	3,74	52,5	12,21
96	476	193,3	4,27	53	13,56
112	476	193	3,8	53	12
92	476	183	3,25	53	11,58
114	476	190	3,85	53	13,17
108	476	190	3,8	53	12,98
118	476,2	192,5	3,97	50,3	14,23
106	476	190,3	4,11	53	13,98
119	475	187,1	4,01	52,4	13,76
107	476	189,5	4,03	52,3	13,98
110	476,3	190,3	4,16	52,4	13,94
96	475	186	3,81	53,1	13,06
102	474	184	3,54	53	13,34
103	475	189	3,85	53	13
96	475	186,8	3,94	52,6	13,12
110	475,8	177,6	3,17	52,8	12,81
106	476,4	188,8	3,56	53	13,21
99	475,5	190	3,77	53	13,12
114	475,7	183,4	3,88	51,6	13,94
115	475,7	180,7	3,53	52	14,23
108	476,1	191,1	4,26	52,6	14,28
110	475,3	191,7	4,16	52,8	13,17
107	475,8	152,5	4,1	52,7	13,04
102	474	184	3,41	53	12

Annexes

➤ Annexes C6

115	476	190	3,8	53	14,14
96	474	188	3,8	53	13,42
102	476	188,6	3,81	52,7	13,47
94	475,5	188	3,69	53	13,06
88	475	187	3,81	53,4	11,87
80,5	469,5	188,7	3,85	53	10,85
100	475,7	189,5	3,97	52,6	12,93
94	474,7	184	3,67	52,6	12,93
95	475,1	187,6	3,79	53	13,05
92	476,2	190,8	4,12	52,5	13,25
103	475,5	184,4	3,66	52,3	13,07
92	474,7	184,7	3,63	52,2	13,22
98	475	185	3,63	52,6	13,15
82	475	188	3,75	52,5	12,16
86	474,6	193	4,08	53,2	10,9
82	474,8	187,3	3,74	52,8	12,25
93	474	184,4	3,78	53	13,03
97	475,1	189,9	3,99	52,4	13,03
109	476	190	3,91	53,3	13,17
94	474	182	3,57	53,6	14,09
103	474	183	3,62	53	14,48
114	475	186	3,81	53	13,16
104	476	184	3,55	53,2	12,45
92	475	185,7	3,62	52,3	13,35
105	475,5	190,7	3,98	53	13,27
94	475,2	186	3,79	53	13,36

Annexes

➤ Annexes C7

114	475,6	191,1	4,17	52,6	14,14
120	476,2	183,5	3,56	52,6	14,38
108	475	185,7	3,89	51,6	14,52
116	476,9	188,9	3,93	52,6	15,06
98	475	184	3,84	53	13,94
119	475	191	3,98	53	14,04
102	475	189	3,95	53	13,56
97	475	184	3,83	53	14,69
95	475	185	3,82	53,2	14,09
109	475	187	3,99	52,8	13,46
89	475,2	184,9	3,71	52,7	13,07
82	473,2	180,5	3,47	53,2	12,26
92	475,6	183,2	3,59	53,4	12,63
90	475,4	187,1	3,9	52,8	13,36
91	475,6	180,4	3,54	52,8	13,61
96	474,8	181,6	3,56	52,8	13,32
91	475,8	191,6	3,94	53	13,22
95	475,5	190,1	4,04	52,9	13,85
95	476,1	185,6	3,77	52,6	13,36
107	475,5	189,3	3,74	52,5	13,06
104	475,7	187,3	3,82	52,4	13,46
113	474,5	191,3	3,99	52	13,94
97	475	189,6	4,06	53	13,36
97	476,1	190,2	3,86	52,8	11,82
106	476,2	188,3	3,79	53	13,12
96	475,8	187,6	3,8	52,9	13,4

Annexes

➤ Annexes C8

105	476,3	189,9	3,96	52,9	13,56
120	476,8	182,9	3,62	51,7	13,75
105	475,6	189,6	3,97	52,8	14,19
101	474,8	184,9	3,65	52,2	13,81
103	476	180,7	3,44	52,6	13,94
102	475	187	3,68	53	13,75
95	476	187,8	3,83	52,4	13,64
103	475,1	192,8	4,19	52,9	13,12
111	476	189,4	3,96	53,6	12,64
98	475,8	186,6	3,9	52,8	14,16
100	476	185	3,6	53	12,93
79	471	183	3,44	53	10,91
73	467	181	3,17	53	10,32
76	467	180	3,53	53,6	11,67
102	476	190,7	3,92	53	12,21
116	475	188,1	4,1	52	14,11
103	475,5	190,1	4,12	52,9	14,16
101	475,6	189,2	4	52,8	13,61
100	475,7	189,2	4,02	52,7	13,57
105	475,4	183,6	3,77	53,1	14,31
102	478,8	186,1	3,81	52,8	13,61
108	475,2	185	3,75	52,5	13,9
96	475	184	3,5	53,2	12,69
93	475	178	3,17	53,2	12,49
102	476	184	3,54	53,8	13,8
98	476	188	3,83	53	14,23

Annexes

➤ Annexes C9

95	476,7	191,3	3,86	53	12,78
102	476	186	3,63	53	12,58
97	475,7	187	3,87	53	12,48
96	476,2	187,7	3,94	52,9	12,75
105	475,7	188,5	4,08	52,5	13,08
106	474	193	3,54	53	12,64
95	475	185	3,57	53	13,05
103	475	186	3,7	53	13,32
110	476,6	187	3,81	53	14,18
99	476,3	185,8	3,69	52,2	13,23
104	476,5	184	3,36	53	13,79
99	476,4	191,7	4,09	53	13,91
117	476,9	185,8	3,6	52,9	13,94
120	474,6	191,6	3,68	52	13,71
106	476,1	186,7	3,93	53,6	13,99
102	476	188,4	4,17	52,9	14,28
101	476,3	186,9	3,86	53,2	13,8
109	475	178	3,1	53	13,85
106	475	185	3,83	53	14,35
118	476	190	3,98	53	14,19
106	476,2	183,5	3,24	53	13,12
87	474,3	184,5	3,62	52,3	13,01
95	476	181	3,48	52	15,29
95	475	184	3,72	52,6	14,04
84	474,7	181,4	3,72	53,1	11,52
83	471,2	185,7	3,77	53,2	11,57

Annexes

➤ Annexes C10

110	476,8	186,5	3,84	52,8	12,78
93	477,3	189,5	4	53,4	12,93
95	476,7	186,7	3,85	53	12,83
99	476,5	187,4	3,68	52,7	13,79
94	475	187,3	3,77	52,5	12,68
95	473,3	181,3	3,47	52	13,03
105	477,2	189,3	3,91	53,1	12,83
86	475,3	188,2	4	52,9	12,88
86	476,1	185,6	3,79	53,5	12,88
92	476	183	3,6	53	13,59
87	475	182	3,41	53,1	11,91
89	475	185	3,54	53	11,38
108	476	181	3,31	53	12,64
119	476	186	3,71	53,1	13,77
108	475	177	3,21	53	13,03
106	476,5	185,2	3,61	52,4	13,85
95	475,4	187,5	4,03	52,9	12,68
96	476	186,9	3,62	52,3	12,93
118	476,6	187,6	4,12	52,1	14,22
111	477	193	4,18	52,8	12,78
117	476,7	190,3	4,16	52,5	14,14
111	475	188,9	4,15	51,7	14,32
102	475	189	3,97	53	14,43
110	475	185	3,9	53	14,47
92	475	185	3,89	53,3	12,58
95	475	187	3,89	53,2	13,84

Annexes

➤ Annexes C11

88	475	183	3,71	53	13,38
100	476	185	3,6	53	11,79
117	475,5	191	3,87	52,6	13,17
107	477,1	186,6	3,85	52,6	13,75
103	477,5	187,7	3,99	53	14,28
104	476	183,2	3,79	52,6	14,14
100	477	188	3,89	53	13,94
116	476,5	187,8	3,84	52,7	13,41
101	476,1	188,3	3,88	52,3	14,52
106	477	186,4	3,75	53	13,94
105	475,8	190,5	4,05	52,8	13,92
115	476	186	3,69	52,6	14,03
106	477	189,6	4,01	53	14,15
118	476,4	190,9	4,04	52	13,56
120	477,8	191,4	3,95	52,3	12,93
102	476	181,1	3,4	53,1	13,65
96	475,6	190,4	4,15	52,6	13,85
116	477,6	192,1	3,89	52,5	13,71
113	475,3	186	3,81	51,8	13,9
105	476,3	187,4	3,9	52,8	13,8
118	476,5	189,3	3,88	53,2	13,58
120	476,2	186,7	3,57	52,6	13,17
101,5	476,5	190	3,79	53	13,57
111	475,8	187,7	3,75	52,5	13,17
100	476,5	188,6	3,73	53,5	12,25
108	475,6	185,5	3,95	52,7	14,71

Annexes

➤ Annexes C12

94	475	190,6	4,04	53	12,11
121	475,5	191,7	3,96	50,3	13,12
101	475	187	3,75	53	13,54
109	477	190	3,92	53	13,28
96	476	192	3,98	53	13,69
80	470	168	2,56	53,3	11,14
93	474	183	3,62	52,6	13,22
91	475	182,8	3,58	53	13,68
93	475	188,4	4,1	52,9	14,2
112	476,2	185,3	3,71	51,8	14,26
108	475	187,1	4,13	52,3	14,18
113	476,6	190	3,91	52,7	13,36
98	475,9	187,8	3,79	53,1	13,37
100	473,6	186,2	3,79	51,4	12,2
102	476	188	3,75	53	13,51
96	475	186	3,68	53	13,24
112	476	187	3,71	53	13,32
101	475	191	3,95	53	13,11
90	474,3	182,5	3,6	52,6	12,25
101	475	183,9	3,73	53	13,19
120	475	187	3,78	53	13,06
107	475,2	189	3,85	52,9	13,17
98	475	190,6	4,11	52,7	13,25
114	476	191	3,86	53	12,93
98	475	189	3,91	53	13,27
96	474	185	3,73	53	13,12

Annexes

➤ Annexes C13

101	477,4	188	3,74	53	14,43
90	473,4	184	3,85	52,6	13,85
117	476,5	183,5	3,41	52,5	13,85
116	476,4	178,1	3,29	52,4	15,73
110	475,6	186,1	3,97	52,8	14,57
122	476,5	183,9	3,77	51,9	14,62
121	475,6	185,3	3,86	49,3	15,15
115	476,9	188,5	3,9	52,8	13,46
113	476,4	188	3,77	52,9	13,27
113	476	192	3,89	53	12,2
108	476	189	3,75	53	13,12
104	475	191	3,98	53	13,85
120	476,5	187,5	3,69	52,5	13,81
99	475,6	183,4	3,69	53	14,75
110	476,5	188	3,89	52,5	13,25
94	475	187,2	3,74	52,8	13,03
95	475	191,1	4,15	52,7	13,27
101	475,1	186,6	3,82	52,9	12,49
98	475,8	189,5	4,04	52,8	13,85
100	475,4	188	3,99	52,8	13,5
118	476,2	189	3,95	49,8	13,22
111	476,4	191,2	3,92	52,7	13,51
88,5	475	189,8	3,97	52,7	14,01
98	477	186,5	3,77	53	14,86
104	476,3	189,3	3,81	53,3	12,34
102	477,8	192,1	4,18	52,6	13,9

Annexes

➤ Annexes C14

108	476	191,1	4,1	53	13,86
117	476	190	4,03	53	14,18
118	476	189	3,8	53	13,12
116	476	181	3,36	53	13,51
119	476	181	3,42	53	14,13
113	476	178	3,23	53	13,78
117	476	191	3,98	53	13,62
120	477	188,8	3,96	52,4	14,13
95	475	190	3,94	53	13,74
83	474,3	191	3,81	53,2	11,67
108	477,5	192,3	4,12	52	13,61
96	477,3	189,1	4,17	52,1	14
100	474	185,1	3,76	52	12,79
102	477	189,9	3,99	53	13,18
98	475	189	3,51	53	14,52
118	477	190	3,96	53	12,45
104	476	187	3,69	53,2	12,75
117	476	191	3,98	53	13,67
120	477	194	3,71	53	13,98
90	475,1	184,8	3,8	53	12,74
105	475,5	187,4	3,95	52	13,06
101	477	189,8	3,79	53	12,39
103	475,4	185,6	3,77	52,8	13,24
111	477,2	188,5	4,01	53,1	13,61
96	474,1	189,5	4,23	52,8	13,56
120	475,7	194,6	4,26	49,8	13,31

Annexes

➤ Annexes C15

121	476,6	176,5	3,23	52,5	14,24
120	476,2	178,5	3,72	52,4	14,62
116	476,6	177	3,18	52,5	13,56
100	476,3	190,4	4,03	52,7	14,57
114	476,5	189,6	4,11	52,6	14,96
107	476,3	187,7	4,01	52,6	14,82
109	475,7	183,4	3,68	52,7	13,77
109	477,5	191,3	4,06	52,9	13,5
108	477,1	188,8	3,96	52,5	13,75
114	476,7	187,6	3,95	52,2	13,9
118	477,5	187,3	3,87	52,5	13,84
113	474,6	187,6	3,96	51,9	13,56
97,9	475,8	191,5	4,13	52,8	13,31

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients d'une turbine à vapeur

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients d'un moteur à piston

Tableau II.1 : Caractéristiques de la turbine à vapeur de CEVITAL

Tableau II.2 : Caractéristiques de fonctionnement de l'alternateur

Tableau III.1 : Résultat de la partie calcul

Tableau III.2 : Caractéristique de fonctionnement

Tableau III.3 : Tableau de correction

Tableau III.4 : Comparaison des valeurs de consommation spécifique

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur la cogénération

Figure I.1 : Principe de fonctionnement de la cogénération.

Figure I.2 : Schéma du principe général de la cogénération

Figure I.3 : Schéma d'une centrale de la cogénération à cycle combiné

Figure I.4 : Comparaison entre la production conventionnelle séparée et la cogénération.

Figure I.5 : Chaîne de transformation d'énergie d'une centrale de cogénération

Figure I.6 : schéma simplifié du groupe turbo-alternateur

Figure I.7 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de la TAV.

Figure I.8 : Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme T-S de l'eau

Figure I.9 : Schéma de principe de la cogénération à l'aide de turbine à gaz

Figure I.10 : Schéma d'une turbine à gaz à une ligne d'arbre

Figure I.11 : Schéma d'une turbine à gaz à deux lignes d'arbres

Figure I.12 : Cycle d'une turbine à gaz idéal-Cycle

Figure I.13 : Schéma de principe de la cogénération basée sur un moteur à piston

Figure I.14 : Chaudière à tube d'eau.

Figure I.15 : Chaudière à tube fumée

Figure I.16 : Schéma d'un condenseur

Figure I.17 : Alternateur

Chapitre II : Les principales sources utilisées dans la cogénération

Figure II.1 : Organigramme du complexe Cevital

Figure II.2 : Organigramme du service d'énergie.

Liste de figures

Figure II.3 : principe de la cogénération

Figure II.4 : schéma fonctionnel de la chaudière

Figure II.5 : Vue général du groupe turbo-alternateur CEVITAL

Figure II.6 : Schéma de fonctionnement du groupe turbo-alternateur.

Figure II.7 : géométries des aubages.

Figure II.8 : Structure générale du réducteur à arbres parallèles.

Figure II.9 : Plaque signalétique du réducteur.

Figure II.10 : Vue d'ensemble de l'alternateur.

Figure II.11 : Rotor de l'alternateur.

Figure II.12 : transformateur

Chapitre III : Calculer les rendements du groupe

Figure III.1 : Schéma explicatif de changement de phase

Figure III.2 : Cycle de Rankine

Figure III.3 : Cycle de Hirn.

Figure III.4 : Cycle de resurchauffe.

Figure III.5 : Cycle à soutirage

Figure III.6 : Cycle thermodynamique de la centrale Cevital.

Figure III.7 : Schéma de l'installation de débit

Figure III.8 : Courbe de performance

Figure III.9 : Courbe de température d'échappement

Figure III.10.a : Courbe de correction « température d'admission »

Figure III.10.b : Courbe de correction « pression d'admission »

Figure III.10.c : Courbe de correction « pression d'échappement »

Liste de figures

Figure III.11 : Variation du débit admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur

Figure III.12 : Variation de la pression extraction en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur.

Figure III.13 : Variation de la température échappement en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur.

Figure III.14 : Variation de la pression admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur.

Figure III.15 : Variation de la température admission en fonction de la puissance aux bornes de l'alternateur.

Liste des symboles

Liste des symboles

g	La gravitation	[m/s ²]
P_j	Pertes joule	[KW]
R	Resistance	[Ω]
W'	Travail technique ou utile mesuré sur l'arbre de la machine	[kJ/kg]
Q	Quantité de la chaleur échangée avec le milieu extérieur	
H₁	Enthalpie de la masse fluide à l'entrée de la machine	[kJ/kg]
H₂	Enthalpie de la masse fluide à sortie de la machine	[kJ/kg]
c₁	Vitesse du fluide à l'entrée et à l'entrée de la machine	[m/s]
c₂	Vitesse du fluide à l'entrée et à la sortie de la machine	[m/s]
z₁	Hauteur à l'entrée et à l'entrée de la machine	[m]
z₂	Hauteur à l'entrée et à la sortie de la machine	[m]
W_{ppe}	Travail de pompe	[kJ/kg]
P	Pression	[Pa]
T	Température	[K]
W_t	Travail de la turbine	[kJ/kg]
Q_c	Chaleur rejetée au condenseur	[kJ/kg]
q̇	Débit massique	[kg/s]
P_{méc}	Puissance mécanique	[MW]
P_{ele}	Puissance électrique	[MW]
C_s	Consommation spécifique	[Kg/KWh]

Liste des symboles

C_s Corrigé	Consommation spécifique corrigée	[kg/kWh]
C_{smax}	Consommation spécifique maximale	[kg/kWh]
A_{ex}	Rendement exégétique	[%]
α_e	Rendement électrique de la cogénération	[%]
A_{th}	Rendement thermique de la cogénération	[%]
T₀	Température initiale	[K]
P₁	La puissance à l'entrée de la turbine	[MW]
P₂	La puissance à la sortie de la turbine	[MW]
P_c	Pression échappement	[bar]
P_a	Pression admission	[bar]
T_{ech}	Température échappement	[K]
T_a	Température admission	[K]
P_{alt}	Puissance aux bornes de l'alternateur	[MW]
K_t	Coefficient de température	
K_p	Coefficient de pression	
K_c	Coefficient de pression d'échappement	
P_{ex}	Pression d'extraction	[bar]
T_{ex}	Température d'extraction	[K]

Abréviations

Abréviation

Pression moyenne admissible	PMA
Surchauffeur basse température	SBT
Surchauffeur haute température	SHT
Turbine à vapeur	TAV
Groupe turboalternateur	GTA
Basse pression	BP
Haute pression	HP
Basse température	BT

Symboles grecs

Rendement thermodynamique	η_{th}
Rendement d'un alternateur	η_{alt}

Indices

Indices

Entrée de la chaudière	1
Sortie de la chaudière (entrée turbine)	2
Sortie de la turbine (entrés condenseur)	3
Sortie du condenseur (entrée de la pompe)	4

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Thiers S., « Bilans énergétiques et environnementaux de Bâtiments à énergie positive », thèse Doctorat L'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 21 novembre 2008.
- [2] : J. AL ASMAR. « Optimisation algorithmique et modèles aléatoires d'un système électrique de cogénération. Application au système électrique Liban », thèse doctorat, Belfort, France.
- [3] : F. MAMERI. « Caractérisation multi-physique et multi-échelle d'une installation de conversion d'énergie : application une unité de cogénération biomasse », thèse doctorat, France, 2018.
- [4] : Amina CHENNA. « Etude et commande d'une centrale de cogénération basé sur une turbine a vapeur » Mémoire de magister. Université A-MIRA Bejaia.2010.
- [5] : Ingénieur et scientifique de France « la cogénération : des technologies éprouvées et performantes au développement encore trop limité en France » IDF-la cogénération-juin 2010.
- [6] : JEAN CLAUDE. S. « Nouvelles technologies de l'énergie : stockage à émission réduite », Edition hermés, 2007.
- [7] : I. DAOUD. « Pré –faisabilité pour les acteurs du secteur tertiaire, PME, PMI », mars 2003.
- [8] : Le cordier B., CessouA., Pasquier-Guilbert N. & Trinité M., « Couplage LIF-PIV pour l'étude de la combustion en mélange stratifié », CNRS – UNIVERSITE et INSA de Rouen, 20ème journée thématique de l'AFVL – 14 Décembre 2006.
- [9] : Michel P., « Conversion d'énergie par turbomachine s », Génie énergétique, ellipses 2005. www.editions-ellipses.fr
- [10] : Jean Claude S., « Nouvelles Technologies de l'Energie 2 : Stockage à Emission Réduite », Edition Hermès, 2007.
- [11] : Yves L., « guide cogénération : Comment estimer la pertinence d'une installation de cogénération », Institut de Bruxelles pour la gestion de l'environnement. Août 2009.
- [12] : Goncalvès et Jean Paul T., « Cycles thermodynamique des machine thermiques », Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2006.
- [13] : Combustion dans les Turbines à Gaz Combustion aéronautique », Master Energie, Fluide et Environnement EFE, Université et INSA de Rouen, Université du Havre.

Références bibliographiques

- [14] : Jean Claude S., « Nouvelles Technologies de l'Energie 2 : Stockage à Emission Réduite », Edition Hermès, 2007.
- [15] : Razach. M, « amélioration du fonctionnement par revue de l'exploitation des chaudières de la SN-SOSUCO », juin 2012.
- [16] : Fethallah.S « Modélisation et Optimisation des Cycles Thermodynamique de Puissance (Rankine-Braytonstirling) En Vue de la Production d'Energie », 2012.
- [17] : Ould Mohamed Brahim et all « étude d'un turboalternateur, modélisation et simulation de l'alternateur » mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010.
- [18] : Umberto D., « Bois énergie ; L'utilisation du bois comme combustible pour la cogénération », Département d'ingénierie Industrielle- Université de Pérouse, N°1/2003.
- [19] : documentation interne de CEVITAL.
- [20] : Thermodyn : IXI593, N de série : 972 et 973. Documentation Cevitale « turbine à vapeur type 6-7-MP-5 ».
- [21] : E. LAID. « Étude et modélisation d'un turbo-alternateur », thèse magister, MSILA, 2014.
- [22] : « fonctionnement et exploitation d'une centrale thermoélectrique à vapeur » partie1 apave.
- [23] : José-Philippe Perez, Patrick Laffont « Travaux Dirigé de Thermodynamique Deug Sciences, Masson Editeur 1997 (Chap. 9).
- [24] : O. Le baigue « Notions thermodynamiques appliquées au changement de phase liquide-vapeur », 2003.
- [25] : R. Bidard, J. Bonnin « Energétique et Turbomachine », Editions Eyrolles Paris 1979 (Chp1, Cpt4,)
- [26] : Documentation Cevital « Turbine A Vapeur, Performance GTA », Thermodyn : 1X1593, N de série 2110