

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
BADJIMOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY



جامعة باجي مختار-عنابنة

Faculté : technologie

Département : génie mécanique

Domaine : sciences et technologies

Filière: génie mécanique

Spécialité: énergétique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème

Étude des performances énergétiques d'une Turbine à vapeur

Présenté par: *DERRADJI Lina*

Encadrant: *DIB Amar*

MCA

UBMA

Jury de Soutenance:

Pr. DIB Amar	MAA	Université BADJI MOKHTAR- ANNABA-	
Pr ECHIGHEL Farid	PROF	Université BADJI MOKHTAR- ANNABA-	
Pr. SARI Mohamed Rafik	MCB	Université BADJI MOKHTAR – ANNABA-	

Remerciements

Je remercie avant tout, notre Dieu qui nous a éclairé la bonne voie et Nous avons aidé à la parcourir.

Je tiens à exprimer no vif remerciement à promoteur (Pr : Dib Amar), pour nous avoir proposé ce sujet, leurs précieux conseils tout au long de notre travail, son aide et sa confiance.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nous exprimons nos profondes reconnaissances à tous les enseignants De l'université de BADJI MOKHTAR, et en particulier nos enseignants de l'énergétique, pour le savoir qu'ils nous ont transmis, pour leur disponibilité et leur gentillesse durant ces deux dernières années.

Nous aimerions adresser du fond du cœur nos plus fervents remerciements à nos parents, car nul autres qu'eux se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets.

Ils ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Nous leurs sommes très reconnaissants.

Dédicace

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le très miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.

Je dédie ce modeste travail à **ma très chère mère**, qui m'a accompagné durant les moments les plus pénibles de ce long parcours de mon éducation, celle qui a fait preuve de ces plus copieux desseins pour me permettre de goûter le fardeau de ce monde et de chercher la voie de ma vie avec ces précieux conseils, donc je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant. Je prie Dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète,

Et te protège et te garde en bonne santé.

A mon père qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments rudes de ma vie.

A mes braves frères. A mes chères sœurs

Et tous mes collèges.

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment

DERRADJI LINA

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de principe d'une turbine.....	3
Figure 2 : Rotor d'une turbine à vapeur.....	4
Figure 3 : Vue schématique de la production d'énergie électrique.....	6
Figure 4 : SS Savannah, première traversée atlantique à vapeur en 1819, terminée à.....	7
Figure. 5 : Montage d'une pompe en aspiration et en charge.....	9
Figure 6 : Organigramme Classification des pompes.....	9
Figure 7 : Classification des compresseurs.....	11
Figure 8 : Compresseur - Etape 1 : aspiration.....	13
Figure 9 : Compresseur - Etape 2 : refoulement.....	13
Figure 10 : Turbine à vapeur du groupe électrogène dans une centrale thermique industrielle.....	16
Figure11 : Turbine à vapeur.....	17
Figure 12 :Schéma décrivant la différence entre une turbine à action et une turbine à réaction.....	18
Figure 13 :Turbine à condensation.....	21
Figure14 : Turbine à soutirage.....	22
Figure15 :Différents types de turbines à vapeur.....	23
Figure 16 : L'hybridation : une stratégie disruptive pour l'énergie.....	32
Figure 17 : Diagramme De Molier.....	35

Table des matières

Liste des figures

Introduction Générale

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur les turbomachines

Introduction..... 3

I.1 Description Des Turbomachines..... 3

I.2 Turbine 4

I.2.1Généralités sur les turbines à vapeur..... 4

1.2.1.1 Définition de la turbine à vapeur 4

I.2.1.2 Principe d'une turbine à vapeur 5

I.2.1.3 Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie..... 6

I.2.1.4 Avantages de la turbine à vapeur..... 8

I.3 Généralités sur les pompes 9

I.3.1 Les types de pompe : 11

I.4 Généralités sur les Compresseurs 12

I.4.1. Définition de compresseur 12

I.4.2 Organigramme de différents types de compresseur 12

I.4.3 Types de compresseurs 12

I.4.4. But de la compression 13

I.4.5 Principe de fonctionnement..... 13

Chapitre II: Description des turbines à vapeur

Introduction..... 15

II.1. Définitionsetprincipe de fonctionnement..... 15

II.2 Historique des turbines à vapeur 16

II.3 Innovations majeures et impact sur l'industrie..... 16

II.4. Classification des turbines à vapeur : 17

II.4.1 Selon le mode d'action de la vapeur : 17

II.4.2 Selon la direction du flux de vapeur:..... 18

II.4.3 Selon les conditions d'échappement..... 19

II.4.4 Selon le nombre d'étages 19

II.4.5 Selon la pression de la vapeur à l'admission 19

II.4.6 Selon la méthode de régulation 19

II.4.7 Selon l'utilisation industrielle 20

II.5 Différents types de turbines à vapeur 20

II.5.1 Turbine à condensation 20

II.5.2 Turbine à contre-pression	21
II.5.3 Turbine à soutirage :.....	22
Comparaison des performances des turbines.....	23
II.5.4 Rendement énergétique	24
II.5.5 Impact environnemental	27
Innovation et tendance actuelle	28
II.5.6 Nouvelle technologie dans les turbines à vapeur	28
II.5.7 Intégration avec les énergies renouvelables.....	31
II.6 Rôle des turbines à vapeur dans les systèmes hybrides	32
II.6.1 Intégration dans les systèmes hybrides renouvelables.....	32
II.7 Conclusion	33
Chapitre III :Bilan énergétique d'une centrale thermique	
Introduction	34
III.1. Bilan énergétique du central thermique:.....	34
III.1.1 Détermination du rendement de la turbine:	34
III.1.2 Détermination du rendement isentropique de la turbine HP:	36
III.1.4 Détermination du rendement isentropique de la turbine MP:	36
III.1.5 Détermination du rendement isentropique de la turbine BP:	37
III.1.6. Détermination du rendement isentropique des Groupes D`Etag entre Deux Soutirage:.....	37
III.2. Récapitulatif Des Rendements De Chaque Corps :.....	42
III.2.1 Calcul des débits de soutirage:.....	42
III.3. Calcul des différents rendements.....	44
III.3.1 Rendement du condenseur:.....	44
III.3.2. Calcul du rendement du cycle réel:.....	44
III.3.3. Calcul du rendement mécanique:	44
III.4. Rendement global:	48
Conclusion générale	
Conclusion générale	49

NOMENCLATURE

- H, h : Enthalpie (kJ/kg)
- S : Entropie ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2\cdot\text{K}$)
- η_{th} : Rendement thermique
- $W_{transvasement}$: Travail avec transvasement (kJ/kg)
- W_{Cis} : Travail de compression isentropique (kJ/kg)
- W_{Dis} : Travail de détente isentropique (kJ/kg)
- **HP** : Haute pression
- **MP** : Moyenne pression
- **BP** : Basse pression
- H_i : Enthalpie réelle du point i (kJ/kg)
- H_{is} : Enthalpie isentropique (kJ/kg)
- Q : Chaleur acquise ou cédée par le cycle (kJ/kg)
- W : Travail acquis ou cédé par le cycle (kJ/kg)
- h_e : Enthalpie massique à l'entrée (kJ/kg)
- h_s : Enthalpie massique à la sortie (kJ/kg)
- \dot{m}_{HP} : Débit du corps HP (kg/s)
- \dot{m}_{MP} : Débit du corps MP (kg/s)
- \dot{m}_{BP} : Débit du corps BP (kg/s)
- $W_{isentropique}$: Travail isentropique de la turbine (kJ/kg)
- Q' : Quantité de chaleur fournie par le générateur de vapeur
- P_s : Puissance de sortie recueillie sur l'arbre de la turbine (kg/s)
- W_{vap} : Travail de la vapeur (kJ/kg)
- W_s : Travail (kJ/kg)
- W_t : Travail (kJ/kg)
- $W's$: Travail (kJ/kg)

Rendements

- η_D : Rendement polytropique de détente
- η_C : Rendement polytropique de compression
- η_C : Rendement isentropique de compression
- η_D : Rendement isentropique de détente
- η_{HP} : Rendement du corps haute pression
- η_{MP} : Rendement du corps moyenne pression
- η_{BP} : Rendement du corps basse pression
- η_T : Rendement de la turbine
- $\eta_{réel}$: Rendement du cycle réel
- η_{Ch} : Rendement de la chaudière
- η_{alt} : Rendement de l'alternateur
- η_C : Rendement du condenseur
- η_{aux} : Rendement des auxiliaires
- η_{mec} : Rendement mécanique
- η_{th} : Rendement théorique
- η_G : Rendement global

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie est un pilier fondamental du développement industriel et économique. Dans ce contexte, les turbines à vapeur jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique, puis électrique, notamment dans les centrales thermiques. L'étude des performances énergétiques de ces turbines revêt une importance majeure pour optimiser leur rendement, réduire les pertes et améliorer l'efficacité globale des systèmes de production d'énergie.

Ce mémoire de fin d'études s'inscrit dans cette perspective et vise à analyser les aspects théoriques et pratiques liés au fonctionnement des turbines à vapeur. La première partie est consacrée aux **généralités sur les turbomachines**, présentant leurs principes de base, leurs classifications et leurs applications industrielles. Le deuxième chapitre aborde plus spécifiquement **la description des turbines à vapeur**, en détaillant leurs composants, leurs mécanismes de fonctionnement et les différents types existants (turbines à action et à réaction, turbines à condensation et à contre-pression, etc.).

Enfin, le troisième chapitre traite du **bilan énergétique d'une centrale thermique**, en mettant l'accent sur les échanges thermodynamiques, les pertes d'énergie et les paramètres influençant l'efficacité globale du système. Cette analyse permettra d'évaluer les performances réelles des turbines à vapeur et d'identifier des pistes d'amélioration pour une exploitation plus durable et économique.

À travers cette étude, nous cherchons à apporter une contribution utile à la compréhension des enjeux énergétiques liés aux turbines à vapeur, tout en proposant des perspectives d'optimisation pour les installations industrielles modernes.

Chapitre I :

Généralités sur les turbomachines

Introduction

Tout processus énergétique implique des transferts de travail et de chaleur à travers des dispositifs adaptés. Dans les machines volumétriques, sujet de plusieurs articles de ce traité, ces échanges d'énergie s'effectuent par des variations de volume au sein de chambres où le fluide est temporairement confiné. À l'inverse, dans les turbomachines, les écoulements sont considérés comme permanents dans une première approximation, ce qui ne s'applique pas aux machines volumétriques.

Les turbomachines (pompes, ventilateurs, compresseurs, turbines), capables de traiter des débits de fluide plus importants que les machines volumétriques, jouent un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie. Elles assurent un échange de travail entre, d'une part, le fluide en mouvement, et d'autre part, un organe mécanique également impliqué dans le transfert énergétique.

I.1 Description Des Turbomachines

Les turbomachines sont des machines (ou installations) dans lesquelles un fluide en écoulement continu échange de l'énergie par action dynamique sur les organes mobiles (aubages).

Ces machines existent sous deux formes bien distinctes selon que le fluide cède ou gagne de l'énergie.

- Les machines motrices : Telle que les turbines à vapeur, turbines à gaz, turbine hydraulique et les éoliennes.

- Les machines réceptrices : Telle que les compresseurs, pompes et les hélices.

Il convient de présenter ici brièvement les types de turbomachines sur lesquelles a porté notre travail. Il s'agit des turbines à vapeur industrielles et des compresseurs centrifuges. Ces deux types de machines sont toujours définis pour des applications spécifiques.

I.2 Turbine

La turbine est un système rotatif conçu pour convertir l'énergie cinétique d'un fluide, qu'il soit liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), en énergie mécanique. Ce fluide met en mouvement les pales fixées à un arbre de rotation. L'énergie contenue dans le fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est en partie transformée en énergie mécanique, permettant d'entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre dispositif rotatif

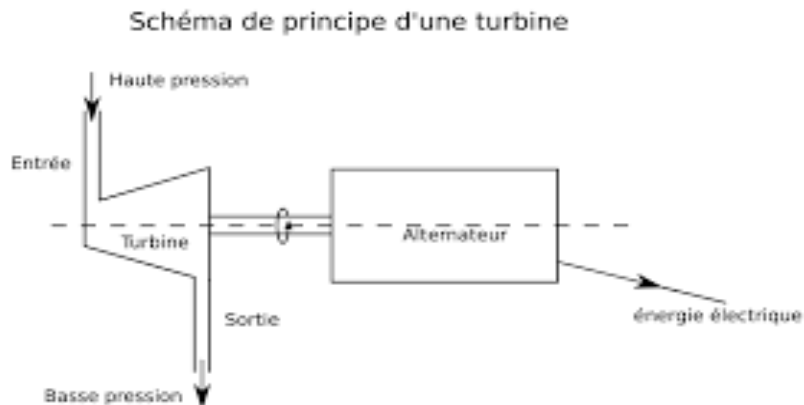


Figure 1 : Schéma de principe d'une turbine

I.2.1 Généralités sur les turbines à vapeur

1.2.1.1 Définition de la turbine à vapeur

La turbine à vapeur est une machine thermique à combustion externe qui fonctionne selon le cycle thermodynamique de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par les transformations d'état subies par le fluide de travail, généralement de l'eau, qui passe successivement de l'état liquide à l'état vapeur, puis retourne à l'état liquide après détente.

Au cours de son fonctionnement, la turbine utilise l'énergie thermique contenue dans la vapeur d'eau pour produire une force de rotation. Cette énergie thermique, convertie lors de la détente de la vapeur à travers les étages de la turbine, est transformée en énergie mécanique, transmise à un arbre en rotation. Ce dernier permet d'entraîner divers dispositifs mécaniques tournants, comme un alternateur, en vue de générer de l'énergie électrique., (voir figure 2).



Figure 2 : Rotor d'une turbine à vapeur

I.2.1.2 Principe d'une turbine à vapeur

Le cycle thermodynamique d'une turbine à vapeur se compose d'un enchaînement d'étapes indispensables au bon fonctionnement du système :

- **Compression initiale** : L'eau, encore à l'état liquide, est d'abord mise sous pression à l'aide d'une pompe, puis dirigée vers la chaudière pour être chauffée.
- **Chauffage et vaporisation** : Dans la chaudière, le liquide est progressivement porté à ébullition, transformé en vapeur, puis surchauffé afin d'atteindre une température et une pression suffisantes pour un rendement optimal.
- **Détente dans la turbine** : La vapeur surchauffée pénètre dans la turbine, où elle subit une détente. Ce processus provoque une diminution de pression et de température, libérant une énergie qui est convertie en énergie mécanique de rotation.
- **Condensation finale** : Après avoir traversé la turbine, la vapeur résiduelle est dirigée vers un condenseur. Là, au contact d'une source froide et dans des conditions de vide partiel, elle est refroidie et redevient liquide pour être réinjectée dans le cycle.

La turbine elle-même est une machine complexe constituée de plusieurs éléments clés :

Chapitre I Généralités sur les turbomachines

Le rotor, pièce mobile centrale, comprend un arbre de transmission sur lequel sont fixées des aubes mobiles (ou aubages), servant à capter l'énergie cinétique de la vapeur pour la transformer en mouvement rotatif.

- **Le stator**, partie fixe de la machine, est généralement formé d'un carter en deux parties jointes selon un plan axial. Il comporte des déflecteurs fixes, qui orientent le flux de vapeur entre les étages successifs.

On y trouve également un tore d'admission segmenté, qui assure la répartition de la vapeur en entrée, ainsi qu'un divergent d'échappement, orienté vers le condenseur pour faciliter l'extraction de la vapeur usée.

Les déflecteurs fixes remplissent deux fonctions essentielles : ils participent activement à la détente de la vapeur, en formant un ensemble de tuyères permettant l'accélération du fluide, et ils orientent correctement le jet de vapeur vers les aubes mobiles de l'étage suivant.

Une turbine à vapeur peut comporter plusieurs étages successifs. Chacun de ces étages assure deux opérations principales :

- La détente de la vapeur, durant laquelle l'énergie potentielle interne du fluide est transformée en énergie cinétique par accélération du flux.
- La conversion de cette énergie cinétique en énergie mécanique, grâce à l'action des aubes mobiles qui exercent un couple sur l'arbre, générant ainsi un mouvement rotatif exploitable.[1]

Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie

Les turbines à vapeur occupent une place importante dans la production d'électricité, notamment au sein des centrales thermiques à vapeur de moyenne et de forte puissance. Leur efficacité et leur fiabilité les rendent particulièrement adaptées à ce type d'installation. Elles sont également utilisées dans le cadre de systèmes de cogénération, qui visent à produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Ces applications incluent par exemple les usines d'incinération des déchets, les réseaux de chauffage urbain, ou encore certains procédés industriels nécessitant une double fourniture énergétique.

Chapitre I Généralités sur les turbomachines

Les turbines à vapeur sont intégrées dans des cycles combinés, où elles récupèrent la chaleur résiduelle issue des gaz d'échappement de turbines à gaz, afin de la convertir en énergie électrique supplémentaire. Ce procédé permet d'augmenter significativement le rendement global de la centrale, en valorisant une énergie qui serait autrement perdue.

Ces turbines ont aussi été largement employées dans le domaine de la propulsion maritime, notamment pour équiper des navires de grande taille tels que les porte-avions ou les pétroliers. Toutefois, cette utilisation tend à décroître, au profit de moteurs diesel ou de turbines à gaz, plus compacts, plus économiques et plus faciles à entretenir, tout en offrant une meilleure réactivité.

L'usage des turbines à vapeur pour l'entraînement direct de machines industrielles connaît également un recul progressif. Elles sont de plus en plus souvent remplacées par des moteurs électriques, qui offrent de nombreux avantages en termes de flexibilité, de précision de contrôle, de rendement énergétique et de maintenance.

[1]

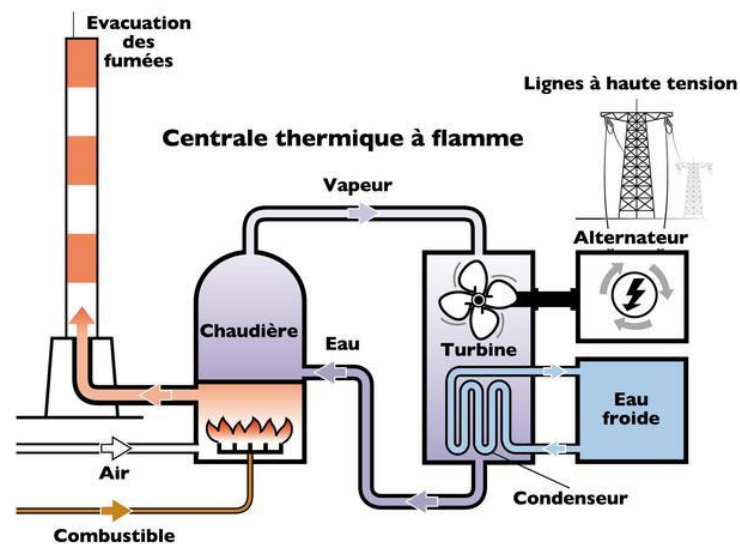


Figure 3: Vue schématique de la production d'énergie électrique. [2]



Figure 4 : SS Savannah, première traversée atlantique à vapeur en 1819, terminée à

I.2.1.4 Avantages de la turbine à vapeur

- La turbine à vapeur est un moteur thermique de type rotatif qui s'avère particulièrement approprié pour entraîner des alternateurs, utilisés notamment dans la génération d'énergie électrique à grande échelle. Grâce à sa conception basée sur le mouvement rotatif continu, elle se distingue par sa capacité à transformer efficacement l'énergie thermique en énergie mécanique, avant de la convertir en électricité.

- L'un des avantages majeurs de la turbine à vapeur réside dans son fonctionnement en combustion externe. Contrairement aux moteurs à combustion interne, elle ne dépend pas d'un carburant spécifique pour générer de l'énergie. Elle peut ainsi être alimentée par une large palette de sources thermiques : gaz naturel, fioul lourd, charbon, biomasse, déchets industriels, chaleur résiduelle, ou même énergie solaire concentrée. Cette flexibilité énergétique permet de réduire considérablement les coûts d'approvisionnement en carburant, d'autant plus que certains de ces combustibles sont bon marché ou issus de la récupération.

Chapitre I Généralités sur les turbomachines

- La turbine à vapeur affiche un rendement énergétique notable, pouvant atteindre des niveaux élevés. Cette performance se traduit par des économies substantielles en termes de consommation énergétique et de frais d'exploitation.

- Un autre atout réside dans son rapport puissance/poids exceptionnel, bien supérieur à celui des moteurs alternatifs, ce qui en fait une solution privilégiée pour les installations nécessitant de grandes puissances sans occuper un volume démesuré.

- La turbine à vapeur comporte moins de composants mobiles que les moteurs à pistons, ce qui réduit les risques d'usure, diminue les besoins en maintenance et augmente la durée de vie de l'équipement. De plus, le fonctionnement en rotation continue dans un seul sens limite les vibrations mécaniques et assure une stabilité opérationnelle accrue, favorable à une exploitation prolongée sans interruptions.

- Ces caractéristiques en font des équipements particulièrement bien adaptés aux centrales thermiques de grande envergure, où les turbines peuvent atteindre des puissances allant jusqu'à 1,5 gigawatt (soit 2 millions de chevaux-vapeur). Elles sont fabriquées dans différentes tailles selon les besoins spécifiques des installations.

- Les turbines à vapeur sont reconnues pour leur robustesse et leur fiabilité, notamment dans les contextes où une production énergétique constante et durable est requise. Leur conception éprouvée et leur performance stable font d'elles des éléments essentiels dans le paysage énergétique mondial.[3]

1.3 Généralités sur les pompes

La pompe, nommée en Italie, est appelée « pompe ». Il s'agit d'une zone où toutes les machines hydrauliques peuvent déplacer des liquides ne sont guère potentiels dans la plage de haute pression. La fonction consiste à utiliser l'organe actif de la pompe (piston, roue, etc.) pour créer une différence de pression entre les zones d'aspiration et de suppression. D'un point de vue physique, les pompes convertissent l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Les pompes, comme les machines, sont le cœur des unités de pétrole et de gaz qui durent toute une vie. Votre choix et votre installation doivent accorder une attention particulière à la partie du service d'étude. Votre entretien nécessite un professionnel hautement qualifié, donc dans les meilleures conditions, un service continu garantira de longues heures.[4]

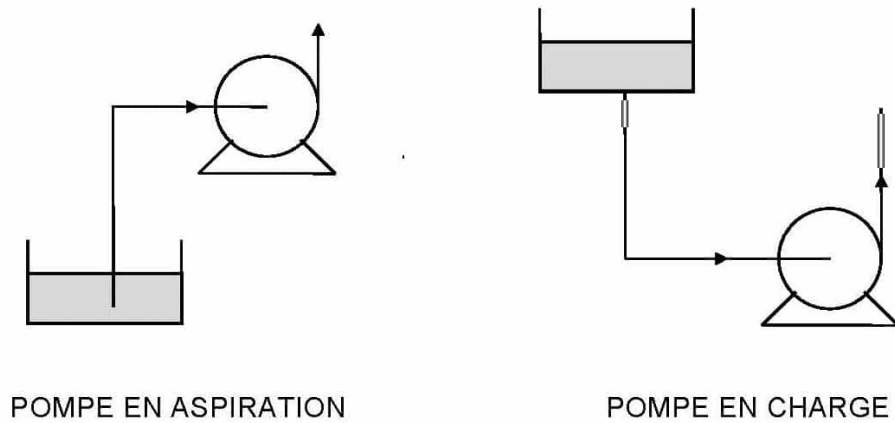


Figure. 5: Montage d'une pompe en aspiration et en charge

Toutes les pompes sont divisées en deux classes principales selon le mode de Fonctionnement :

- Les turbopompes.
- Les pompes volumétriques.

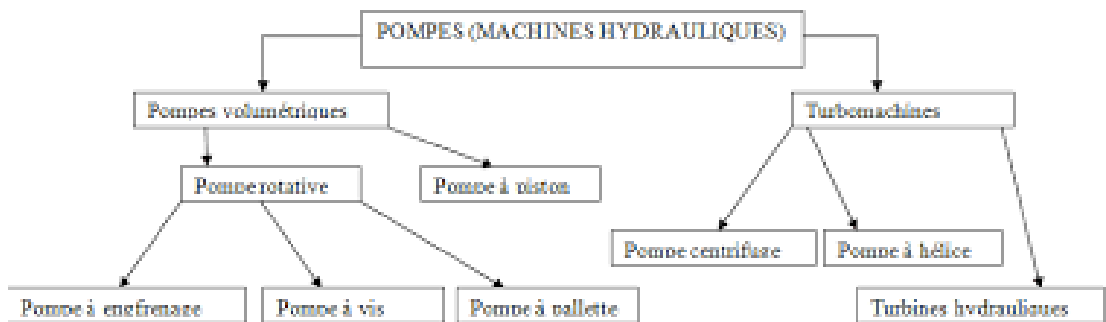


Figure6 : Organigramme Classification des pompes

I.3.1 Les types de pompe :

Les pompes volumétriques :

La pompe à volume se compose d'un corps de pompe entièrement fermé où se déplacent strictement les éléments mobiles. L'opération est basée sur les principes suivants : Exécution de mouvement périodique. Une certaine quantité de liquide avant est finalement entrée dans un compartiment où il est supprimé. Ce mouvement permet un décalage de fluide entre les ouvertures d'aspiration et de décharge du

En règle générale, vous distinguez les distinctions suivantes: • Rotation de la pompe à volume. •

Pompe de volume alternative.

Les turbopompes :

Une pompe turbo est appelée une machine équipée d'un barrage ou d'une nageoire sur une ou plusieurs roues ou impulsions pour tourner l'axe d'échange d'énergie avec un liquide. L'aube traverse les canons à débit liquide. La rotation de la roue permet à la pagaie de convertir l'énergie mécanique en énergie et pression cinétiques. Ceci est communiqué aux particules liquides et à la force centrifuge de la pompe turbo. Les pompes turbo, l'isolation ou les nageoires sont encouragées par le mouvement rotatif. Selon le type de rotor et son mode d'action, la pompe turbo a

1. Pompe centrifuge (avec rivièrè radiale)
2. Pompe d'arbre ou d'hélice (avec courant d'arbre)
3. Pompe centrale Hélico (avec courant diagonal)

Les pompes centrifuges

Une pompe centrifuge est un système ouvert qui est un trou ou un canal dans la façon dont une force centrifuge est construite. Il n'est pas basé sur le transport du liquide dans le seau ou les variations pendant le volume de détention. Le liquide n'est plus poussé par la paroi du matériau, mais est mis sur le mouvement et compensé par le champ de résistance. Il s'agit d'une idée très simple et est basée sur d'autres principes en «montrant ci-dessous». Les pompes centrifuges fonctionnent et sont utilisées conformément à d'autres lois.

1.4 Généralités sur les Compresseurs

I.4.1. Définition de compresseur

Les compresseurs sont des dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique provenant d'une machine motrice en énergie de pression, en augmentant la pression d'un fluide à l'état gazeux. Fluides compressés peuvent varier en composition, tels que des gaz purs, des mélanges gazeux, de la vapeur surchauffée ou saturé

I.4.2 Organigramme de différents types de compresseur

Le tableau ci-dessous présente un aperçu des différents compresseurs sur tous les appareils, on différencie les compresseurs fonctionnant sans huile et ceux lubrifiés par huile.

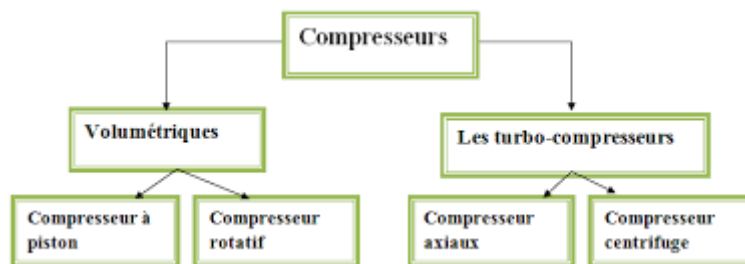


Figure 7 : Classification des compresseurs

I.4.3 Types de compresseurs

Les compresseurs ont des machines utilisées pour transporter ou comprimer des gaz à une pression quelconque. On classe en général les compresseurs en familles, on peut citer par exemple. [5]

Turbo compresseurs :

Le turbocompresseur est un type de compresseur dynamique, souvent décrit comme un mini compresseur à palettes. Dans ce type de compresseur, l'augmentation de la pression du fluide est obtenue par la conversion de l'énergie cinétique en énergie potentielle, grâce à un écoulement continu allant de l'aspiration jusqu'au refoulement. Les turbocompresseurs se classent principalement en deux catégories : à flux centrifuge et à flux axial.

les compresseurs volumétriques: Les Compresseurs volumétriques sont des machines réceptrices, ils peuvent être rotatifs (vis, palette etc.) ou bien alternatifs (à piston). La transformation du travail reçu en énergie de pression en diminuant le volume du fluide qui traverse la machine.

I.4.4. But de la compression

La compression d'un gaz peut être dictée par des exigences techniques visant à transférer une certaine quantité de fluide gazeux d'un système à une pression donnée vers un autre système à une pression supérieure. Cette opération remplit plusieurs fonctions essentielles selon les applications, parmi lesquelles :

- **Assurer la circulation d'un gaz dans un circuit fermé**, comme dans les systèmes de réfrigération ou de climatisation.
- **Créer des conditions de pression optimales pour favoriser certaines réactions chimiques**, notamment dans les procédés industriels.
- **Acheminer le gaz à travers un pipeline**, depuis la zone de production jusqu'au site de consommation ou de transformation.
- **Fournir de l'air comprimé pour la combustion**, en particulier dans les moteurs thermiques ou les chaudières.
- **Permettre la récupération et la valorisation de gaz**, comme dans les systèmes de récupération de gaz industriels ou de biogaz.
- **Favoriser le brassage dans les bassins de fermentation**, par injection d'air ou de gaz afin d'assurer un mélange homogène et une bonne oxygénation.

I.4.5 Principe de fonctionnement

Au début du cycle de fonctionnement, le déplacement du piston vers le bas (figure 8) provoque l'ouverture du clapet d'aspiration, permettant ainsi à l'air ambiant de pénétrer dans la chambre située entre la tête du cylindre et le piston. Lors de la course ascendante de ce dernier (figure 9), le clapet d'aspiration se ferme, enclenchant la phase de compression. À mesure que le volume de la chambre diminue, la pression de l'air augmente progressivement. Lorsque la pression dans l'espace au-dessus du piston dépasse celle de la conduite de refoulement, le clapet de refoulement s'ouvre, libérant l'air comprimé dans la conduite. (Les figures 8 et 9) illustrent respectivement

Chapitre I Généralités sur les turbomachines

les deux principales phases du fonctionnement d'un compresseur à piston :
l'aspiration et le refoulement.

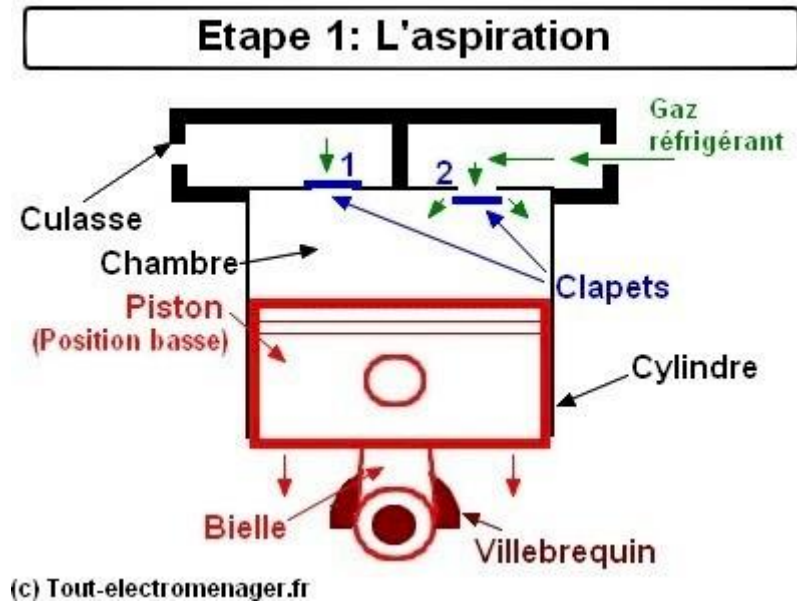


Figure 8 : Compresseur - Etape 1 : aspiration

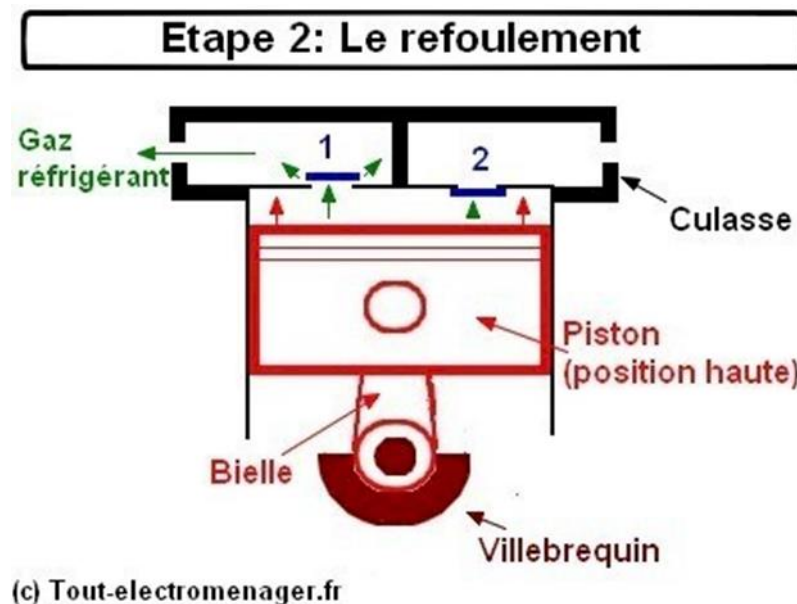


Figure 9 : Compresseur - Etape 2 : ref

Chapitre II:
Description des turbines à vapeur

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser sur la description de la turbine à vapeur, sa définition en manière générale, son principe de fonctionnement, l'utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie, les principaux composants de la turbine à vapeur.

II.1. Définition et principe de fonctionnement

Les turbines à vapeur fonctionnent selon le cycle de Rankine, un cycle thermodynamique utilisé pour convertir l'énergie thermique en énergie mécanique, puis en électricité.

Le processus se déroule en quatre étapes principales :

- Chauffage de l'eau dans une chaudière pour produire de la vapeur à haute pression.
- Détente de la vapeur dans une turbine, ce qui fait tourner un rotor et produit un travail mécanique.
- Condensation de la vapeur dans un condenseur pour la transformer en eau.
- Pompage de l'eau condensée pour la réinjecter dans la chaudière.

Ce cycle permet une production continue d'énergie, essentielle dans les centrales thermiques. Essentielles dans la production d'électricité à grande échelle. Elles sont utilisées dans :

Centrales thermiques (charbon, gaz, pétrole), Centrales nucléaires, où la chaleur de fission produit la vapeur, Centrales à biomasse, systèmes de cogénération (chaleur + électricité).

Elles permettent de transformer efficacement l'énergie contenue dans la vapeur en énergie électrique, représentant une part importante de la production mondiale d'électricité.



Figure 10 : Turbine à vapeur du groupe électrogène dans une centrale thermique industrielle

II.2 Historique des turbines à vapeur

L'histoire des turbines à vapeur débute au Ier siècle avec le concept primitif de la héra sphère inventée par Héron d'Alexandrie, un dispositif qui utilisait la vapeur pour produire un mouvement rotatif. Toutefois, il faudra attendre le XIXe siècle pour que les turbines à vapeur deviennent des machines industrielles fonctionnelles.

En 1884, l'ingénieur britannique Charles Parsons développe la première turbine à vapeur moderne, qui marque un tournant décisif. Sa turbine axiale était capable de produire de l'électricité de manière efficace, ce qui a ouvert la voie à son utilisation dans les centrales électriques. Peu après, en 1889, Gustaf de Laval conçoit une turbine à action à grande vitesse, plus adaptée aux petites puissances.

II.3 Innovations majeures et impact sur l'industrie

Les turbines à vapeur ont connu plusieurs améliorations majeures au fil des décennies :

Amélioration de la thermodynamique : Meilleur rendement grâce à l'application du cycle de Rankine.

Conception en étages : Introduction des turbines à plusieurs étages (turbines à contre-pression, à extraction), permettant une récupération d'énergie plus efficace.

Utilisation de matériaux résistants à haute température : Pour supporter les conditions extrêmes de pression et de chaleur.

Automatisation et contrôle : Intégration de systèmes de régulation numérique pour améliorer la performance et la sécurité.

L'impact sur l'industrie a été significatif. Les turbines à vapeur ont révolutionné la production d'électricité, en remplaçant les moteurs à piston dans les centrales thermiques. Elles sont également devenues essentielles dans les secteurs naval, chimique, pétrolier et nucléaire, offrant une puissance fiable et continue à grande échelle.

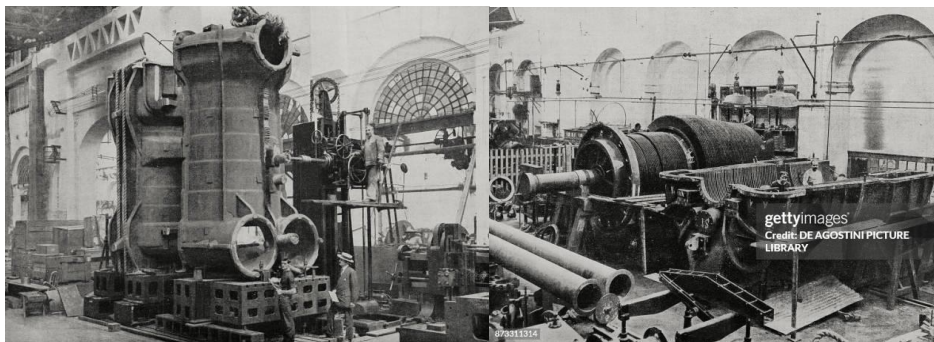


Figure11 : Turbine à vapeur

II.4. Classification des turbines à vapeur :

II.4.1 Selon le mode d'action de la vapeur :

- **Turbines à impulsion (Impulse Turbines)** : Dans ce type de turbine, la vapeur se détend complètement dans des tuyères fixes, convertissant son énergie thermique en énergie cinétique à haute vitesse. Ces jets de vapeur à grande vitesse frappent ensuite les aubes mobiles du rotor, transférant leur impulsion pour provoquer la rotation. La pression de la vapeur reste constante lorsqu'elle traverse les aubes mobiles. Un exemple simple est la turbine De Laval.
- **Turbines à réaction (Réaction Turbines)** : Ici, la détente de la vapeur se produit progressivement à la fois dans les aubes fixes (qui agissent comme des tuyères) et dans les aubes mobiles. Il y a une chute de pression continue à

travers les étages de la turbine. La force motrice résulte à la fois de l'impulsion et de la réaction due à l'accélération de la vapeur à travers les aubes mobiles profilées. La turbine Parsons est un exemple de turbine à réaction.

- **Turbines combinées (Combination Turbines)** : Certaines turbines utilisent une combinaison des principes d'impulsion et de réaction dans différentes parties de la turbine pour optimiser l'efficacité.

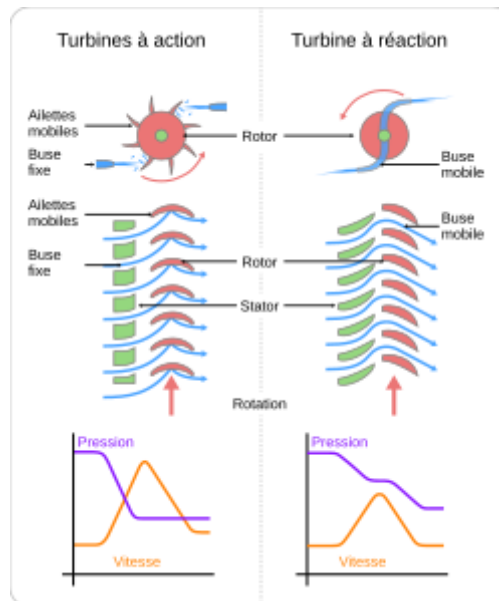


Figure 12: Schéma décrivant la différence entre une turbine à action et une turbine à réaction.

II.4.2 Selon la direction du flux de vapeur:

- **Turbines à flux axial (Axial Flow Turbines)** : La vapeur s'écoule parallèlement à l'axe de rotation du rotor. C'est la conception la plus courante, en particulier pour les grandes turbines.
- **Turbines à flux radial (Radial Flow Turbines)** : La vapeur s'écoule radialement, soit vers l'extérieur, soit vers l'intérieur, par rapport à l'axe de rotation. Ce type est moins courant pour les grandes puissances.
- **Turbines à flux mixte (Mixed Flow Turbines)** : La vapeur a une composante de flux à la fois axiale et radiale.

II.4.3 Selon les conditions d'échappement

- **Turbines à condensation** : La vapeur s'échappe de la turbine à une pression inférieure à la pression atmosphérique et est condensée dans un condenseur pour récupérer la chaleur latente et augmenter l'efficacité du cycle. C'est le type le plus courant pour les centrales électriques. Il existe des sous-types comme la turbine à condensation directe, à soutirage non contrôlé, à soutirage contrôlé, à double soutirage, à injection et à réchauffe.
- **Turbines à contre-pression ou turbines sans condensation** : La vapeur s'échappe de la turbine à une pression supérieure à la pression atmosphérique et est utilisée à des fins de chauffage industriel ou dans des cycles combinés chaleur-électricité (cogénération).

II.4.4 Selon le nombre d'étages

- **Turbines à un seul étage (Single-étage Turbines)** : Elles ont une seule rangée d'aubes mobiles. Elles sont généralement utilisées pour les petites puissances.
- **Turbines à plusieurs étages (Multi-étages Turbines)** : Elles comportent plusieurs rangées d'aubes mobiles et fixes disposées en série pour extraire l'énergie de la vapeur de manière plus efficace en la détendant par étapes. Le multi-étagement permet de réduire la vitesse du rotor et d'améliorer le rendement.

II.4.5 Selon la pression de la vapeur à l'admission

- **Turbines haute pression**
- **Turbines moyenne pression**
- **Turbines basse pression**
- **Turbines à pression supercritique** : Fonctionnent avec de la vapeur à des pressions supérieures au point critique de l'eau

II.4.6 Selon la méthode de régulation

- **Turbines à régulation par étranglement**
- **Turbines à régulation par ajutages**

- **Turbines à régulation par by-pass**

II.4.7 Selon l'utilisation industrielle

- **Turbines stationnaires à vitesse constante** : Principalement pour la production d'électricité.
- **Turbines stationnaires à vitesse variable** : Utilisées pour entraîner des pompes, des compresseurs, etc.

II.5 Différents types de turbines à vapeur

En fonction de leur utilisation, on distingue quatre grandes catégories de turbines à vapeur :

II.5.1 Turbine à condensation

• Une turbine à condensation est une turbine à vapeur dans laquelle la vapeur se détend jusqu'à une pression très basse, proche du vide, généralement entre 0,03 et 0,055 bar. Cette pression correspond à la vapeur saturée à la sortie de la turbine et dépend de la température de l'eau froide circulant dans le condenseur. La vapeur, après avoir cédé son énergie, est condensée dans un condenseur pour maximiser la chute d'enthalpie et donc le rendement énergétique de la machine. [6]

Les turbines à condensation modernes peuvent atteindre des rendements élevés, par exemple une turbine de 100 kW conçue avec une technologie avancée de condensation peut convertir jusqu'à 70 % de l'énergie de la vapeur en électricité. Ces turbines sont compactes, fiables, avec une durée de vie nominale d'environ 30 ans et nécessitent peu d'entretien.[7]

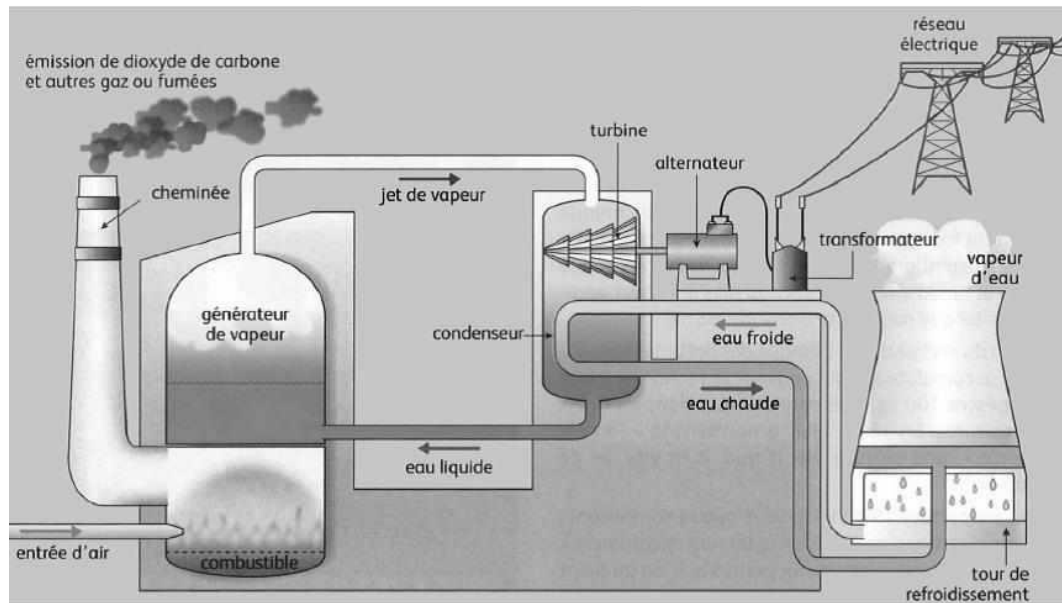


Figure 13: Turbine à condensation

II.5.2 Turbine à contre-pression

- Une turbine à contre-pression est une turbine à vapeur où la vapeur se détend de haute pression (souvent > 40 bars) à une pression de sortie bien supérieure à la pression atmosphérique, typiquement autour de 4 bars[8]. Contrairement à la turbine à condensation, la vapeur n'est pas condensée à la sortie mais est utilisée directement pour alimenter un réseau vapeur à pression intermédiaire dans des procédés industriels ou pour alimenter d'autres équipements.

- Ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations industrielles où la vapeur à la sortie sert à des usages thermiques, par exemple dans les usines chimiques, papetières ou agroalimentaires, permettant ainsi une cogénération d'électricité et de chaleur. La turbine produit de la force motrice tout en fournissant de la vapeur à une pression utile pour des procédés.

- La turbine à contre-pression est appréciée pour sa souplesse d'adaptation aux différents régimes de fonctionnement et sa stabilité d'écoulement, même à hauts rapports de pression, grâce au régime supersonique qui peut s'établir dans certaines parties de la machine⁸. Elle fonctionne souvent selon un principe combiné d'action et de réaction dans ses étages[9].

II.5.3 Turbine à soutirage :

• Une turbine à soutirage est une turbine à vapeur dans laquelle une partie de la vapeur, après avoir travaillé dans les premiers étages à haute pression, est prélevée (soutirée) à une pression intermédiaire avant d'être détendue complètement. Cette vapeur soutirée est ensuite utilisée pour des besoins industriels ou pour réchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière, ce qui améliore globalement le rendement du cycle thermodynamique.

• Le principe des soutirages permet d'exploiter la vapeur à différentes pressions, optimisant ainsi la récupération d'énergie thermique. En soutirant une partie de la vapeur, on réduit la masse de vapeur à condenser, ce qui diminue la taille et la charge thermique du condenseur. Par ailleurs, l'eau d'alimentation étant préchauffée par cette vapeur soutirée, la chaudière consomme moins d'énergie pour produire la vapeur, ce qui augmente le rendement global du cycle.

• Ce type de turbine est particulièrement utilisé dans les centrales de cogénération où la demande en chaleur peut varier, car il permet de fournir simultanément de l'électricité et de la vapeur à différentes pressions pour des usages industriels.

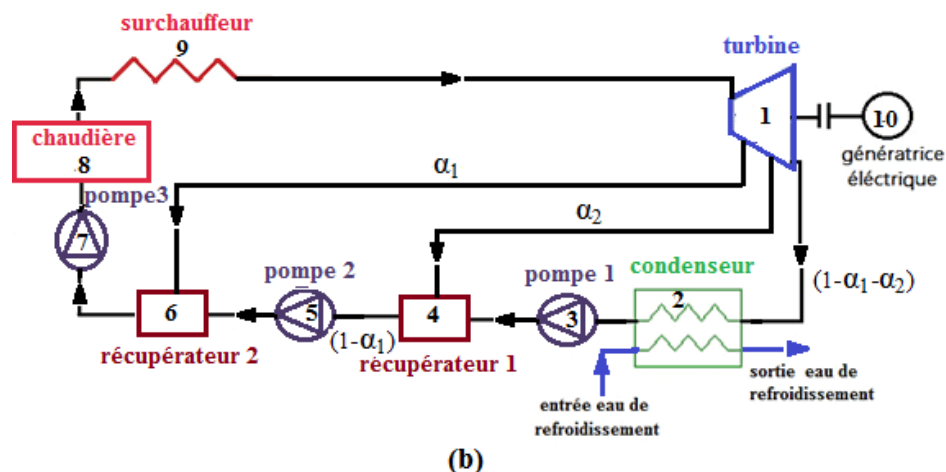


Figure14 : Turbine à soutirage

- ✓ **Les turbines à soutirage et condensation**, dans lesquelles la vapeur subit une détente partielle jusqu'à une moyenne pression (environ 20 bars) dans un corps

haute pression. Une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation, tandis que le reste de la vapeur est détendu dans un corps basse pression, comme dans une turbine à condensation. Ce type de turbine trouve un champ d'application important dans les usines de cogénération dont les demandes de chaleur sont susceptibles de varier fortement au cours du temps ;

- ✓ **Les turbines à soutirage et contre-pression**, dont la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée.

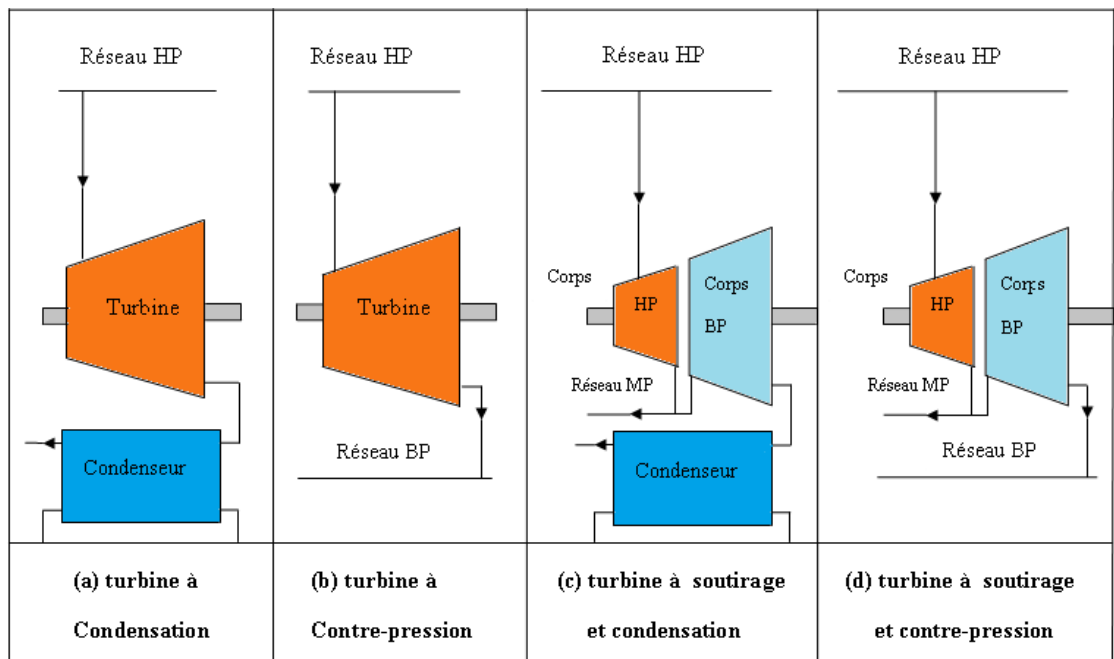


Figure15 :Différents types de turbines à vapeur

Les turbines à vapeur existent en plusieurs types adaptés à des usages variés : condensation, contre-pression, soutirage, et selon la dynamique de la vapeur (axiale, radiale, action, réaction), ainsi que la pression d'entrée. Le choix du type dépend de l'application industrielle, du rendement recherché et des besoins énergétiques spécifiques.

Comparaison des performances des turbines

La performance des turbines peut être comparée selon différents types et applications. Voici quelques exemples :

- **Turbines bidirectionnelles** La performance des turbines bidirectionnelles dans des conditions de vagues irrégulières peut être comparée pour la conversion de l'énergie des vagues.
- **Turbines à vapeur** Les performances des turbines à vapeur peuvent être comparées en utilisant des cycles thermodynamiques différents tels que les cycles de Rankine et de Hirn. Une turbine à vapeur à cycle de Hirn avec surchauffe pour $P_3=15$ [MPa] est plus performante que les autres turbines, tandis qu'une turbine à vapeur à cycle de Rankine pour $P_3=5$ [MPa] est la moins performante.
- **Turbines Kaplan et groupes bulbes** Une turbine Kaplan tourne moins vite et est plus encombrante qu'un groupe bulbe, et sa colline de rendement est inférieure à celle du groupe bulbe dans tout le domaine commun de fonctionnement.
- **Turbines à gaz** Les performances des turbines à gaz peuvent être améliorées par l'injection de vapeur d'eau, ce qui augmente la puissance et le rendement. La température ambiante est un paramètre clé dans le calcul des performances d'une turbine à gaz[10].

II.5.4 Rendement énergétique

Les rendements énergétiques des turbines varient selon le type de turbine et le cycle thermodynamique utilisé. Voici une synthèse comparative basée sur des études récentes :

Turbines à vapeur

- **Cycle de Rankine** : C'est le cycle de base pour les turbines à vapeur. Son rendement est généralement plus faible comparé à d'autres cycles améliorés. Par exemple, une turbine à vapeur fonctionnant selon le cycle de Rankine à une pression de vapeur de 5 MPa présente un rendement inférieur aux autres cycles étudiés.
- **Cycle de Hirn** : Ce cycle est une amélioration du cycle de Rankine, intégrant une meilleure gestion de la vapeur. Le rendement est supérieur à celui du cycle de Rankine classique.

- **Cycle de Hirn avec surchauffe** : Ce cycle ajoute une surchauffe de la vapeur, ce qui augmente significativement le rendement. Une turbine à vapeur à cycle de Hirn avec surchauffe à une pression de 15 MPa affiche le meilleur rendement parmi les cycles comparés, offrant une production mécanique plus élevée.

Turbines à gaz

- Le rendement thermique maximal d'une turbine à gaz étudiée est d'environ 33,3 % en conditions optimales (hiver), avec une baisse notable en été due à l'augmentation de la température ambiante, pouvant réduire la puissance électrique produite de 36 MW pour une variation de température entre -2 °C et 38,5 °C.
- Le rendement thermique réel peut être d'environ 30 % en été, tandis que le rendement maximal prévu atteint près de 33,7 % en hiver, ce qui montre une sensibilité importante aux conditions environnementales.
- L'amélioration des rendements des turbines à gaz passe par l'optimisation des compresseurs et turbines, ainsi que par l'utilisation de cycles régénératifs. Par exemple, un cycle régénératif peut augmenter le rendement thermique d'environ 30 % (cas réel) à près de 59,5 % (avec régénération).

Comparaison générale :

Voici une comparaison générale des rendements énergétiques des turbines à vapeur et des turbines à gaz, basée sur les données issues des recherches :

Type de turbine	Cycle / Configuration	Rendement énergétique typique	Particularités et limites principales
Turbine à vapeur	Cycle de Rankine (P=5 MPa	Rendement le plus faible parmi les cycles étudiés	Rendement limité par la pression et absence de surchauffe
	Cycle de Hirn	Rendement	Meilleure gestion

		supérieur au cycle de Rankine	de la vapeur
	Cycle de Hirn avec surchauffe (P=15 MPa)	Rendement le plus élevé (meilleure performance)	Pression élevée et surchauffe augmentent significativement le rendement
	Général	Jusqu'à environ 50 % d'efficacité thermique pour grandes turbines (ex. 1200 MW)	Pertes par friction et irréversibilités limitent le rendement pratique
Turbine à gaz	Simple cycle	Rendement thermique entre 16 % et 30 %	Sensible à la température ambiante (perte ~1 % par °C), limitations matérielles
	Cycle combiné (avec turbine vapeur)	Rendement global jusqu'à 55-60 %	Récupération de la chaleur des gaz d'échappement améliore le rendement
	Cycle régénératif	Rendement thermique pouvant atteindre environ 59,5 %	Récupération et réchauffage des gaz de combustion
	Général	Limité par la tenue des matériaux à haute température (1200 °C+) et par la compression	Puissance diminue avec la température ambiante, coût élevé des composants

- Les turbines à vapeur atteignent leurs meilleurs rendements avec des cycles complexes incluant surchauffe et haute pression, pouvant approcher 50 % d'efficacité thermique dans de grandes installations.
- Les turbines à gaz ont des rendements plus faibles en simple cycle (16-30 %), mais peuvent dépasser 55 % en cycle combiné grâce à la récupération de chaleur par une turbine à vapeur associée.
- Les turbines à gaz sont sensibles aux conditions environnementales (température ambiante) et aux limites matérielles liées aux hautes températures de combustion.
- Les cycles régénératifs et combinés sont les plus efficaces pour les turbines à gaz, tandis que la surchauffe et la haute pression améliorent significativement les turbines à vapeur.

Cette comparaison montre que le choix entre turbine à vapeur et turbine à gaz dépend du contexte d'utilisation, des contraintes techniques et des objectifs de rendement énergétique.

II.5.5 Impact environnemental

Les émissions de polluants atmosphériques, principalement d'origine anthropique (industries, transports, agriculture), ont des impacts majeurs sur l'environnement et la santé. Ces polluants, comme les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), les particules fines (PM_{2,5}), et les métaux lourds, contribuent à l'acidification des sols et des eaux, la dégradation des végétaux, la diminution de la biodiversité, ainsi qu'à la pollution des sols et des cours d'eau [11].

Sur le climat, les émissions de CO₂, notamment issues du secteur des transports, sont un facteur clé du réchauffement global, contribuant au changement climatique et à ses effets sur les écosystèmes.

L'efficacité énergétique joue un rôle crucial pour réduire ces impacts environnementaux. En améliorant l'efficacité des systèmes énergétiques (bâtiments, transports, industrie), on diminue la consommation d'énergie fossile et donc les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. Cela permet de

limiter la pollution de l'air, de protéger la santé humaine (réduction des maladies respiratoires, cardiovasculaires, cancers) et de préserver les écosystèmes[12].

En résumé, réduire les émissions par une meilleure efficacité énergétique est essentiel pour atténuer la pollution atmosphérique, ses effets sanitaires et environnementaux, et lutter contre le changement climatique.

Innovation et tendance actuelle

II.5.6 Nouvelle technologie dans les turbines à vapeur

Actuellement, les turbines à vapeur font l'objet de nombreuses innovations et tendances significatives, centrées sur l'optimisation de leur efficacité énergétique, leur durabilité écologique et leur intégration dans des systèmes énergétiques contemporains.

➤ Optimisation des cycles et récupération de chaleur

- Les cycles à vapeur actuels incorporent des dispositifs de récupération de chaleur résiduelle qui autorisent la réutilisation d'une portion de l'énergie thermique libérée par la vapeur. Cela améliore considérablement l'efficacité globale des installations.
- L'optimisation du cycle de Rankine, en particulier par l'accroissement des pressions et températures opérationnelles, permet d'optimiser l'efficacité énergétique des turbines.

➤ Nouvelles technologies de condensation et refroidissement

- La technologie HCT (High-efficiency Condensation Technology) remplace les condensateurs traditionnels par des systèmes de séchage et de refroidissement en utilisant des solutions d'absorption d'humidité et des avions. Cette innovation permet l'élimination complète de l'utilisation de l'eau de refroidissement, l'augmentation du rendement en électricité (jusqu'à + 2,5%),

la réduction de l'auto-utilisation et assure une production stable même à des températures élevées.

- Ces systèmes conviennent particulièrement aux régions où l'eau est rare et améliore simultanément la compétitivité énergétique.

➤ **Matériaux avancés et conception aérodynamique**

Les turbines de nouvelle génération utilisent des matériaux composites et des températures élevées pour aider à atteindre des niveaux de revenus et de durabilité sans précédent.

La structure aérodynamique ultra-optimisée des aubages minimise les pertes d'énergie et maximise la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique.

➤ **Systemes de contrôle intelligents et maintenance prédictive**

Les turbines à vapeur modernes comprennent des systèmes de contrôle intelligents très développés qui permettent une gestion optimisée de l'entreprise, une surveillance en temps réel et des prévisions efficaces.

1. Contrôle automatique et régulation étendue

- Les capteurs du système de contrôle sont utilisés pour mesurer en continu des paramètres importants tels que la pression, la température, l'écoulement et la vitesse des turbines.[13]
- Ces données sont analysées par un algorithme complexe qui définit automatiquement les conditions de fonctionnement (pression de vapeur, courant, température) pour maintenir des performances optimales et éviter les surcharges ou les conditions dangereuses.[13]
- Les réglementations adaptatives permettent aux paramètres de s'adapter en temps réel en fonction de la variation de la charge et des conditions environnementales, assurant ainsi une meilleure stabilité et efficacité énergétique.[13]

2. Surveillance et protection intégrées

- Les systèmes modernes comprennent des capacités de surveillance prédictives qui vous permettent d'enregistrer de nouvelles anomalies avant de provoquer des informations critiques, de réduire les pannes imprévues et les coûts de maintenance [14]
- Cette surveillance comprend le contrôle des limites mécaniques du rotor, la protection contre les vibrations excessives et la gestion de l'initiation et de la turbine automatique. Des solutions telles que le système
- Emerson Ovation TM offrent une intégration complète de contrôle, de surveillance et de protection dans une architecture ouverte qui permet les mises à jour et la maintenance.[14]

3. La prédiction et optimisation du cycle de la vie

- L'utilisation de données en temps réel liées à l'analyse prédictive permet d'anticiper les processus de maintenance, d'éviter les interventions inutiles et de prolonger la durée de vie des composants.
- Les plates-formes d'optimisation telles que le système ICON TM et ECOMMAX[®] fournissent des outils pour la gestion du cycle de vie, le dépannage et l'amélioration continue des performances de la turbine.
- Cette approche réduit le risque de pannes inattendues, optimise la disponibilité de l'installation et réduit les coûts opérationnels.

4. Intégration numérique et interface de machine humaine (HIM)

- Les derniers systèmes de contrôle ont une interface de visualisation (HIM) située sur une interface de visualisation avancée (HIM), permettant aux opérateurs de surveiller facilement les performances et d'intervenir rapidement en cas d'alerte.

- La numérisation favorise également la surveillance à distance et l'intervention rapide, améliorant la réponse aux incidents.

5. Diversification des sources d'énergie et modularité

- Des innovations telles que les turbines mongoliques nous permettent de produire de l'électricité à partir des déchets plastiques et de convertir les polluants en énergies renouvelables utiles.
- La turbine à vapeur est également intégrée dans le cycle combiné Gaz-Dam, qui récupère la chaleur résiduelle de la turbine à gaz et augmente la puissance.

6. Développement de cycles vapeur alternatifs

Des recherches sont en cours sur l'utilisation de fluides caloporteurs alternatifs (sels fondus, fluides organiques) pour optimiser les performances des turbines dans des applications spécifiques, notamment dans les centrales solaires thermodynamiques ou géothermiques[15]

- ✓ Les évolutions récentes des turbines à vapeur se caractérisent par une quête d'optimisation de l'efficacité, la diminution de l'impact écologique, l'adoption de technologies avancées et la variété des sources d'énergie. Ces avancées placent la vapeur comme une technologie essentielle pour le changement vers une énergie durable et la génération d'électricité à grande échelle.

II.5.7 Intégration avec les énergies renouvelables

Les turbines à vapeur occupent une place essentielle dans les infrastructures hybrides associant des énergies renouvelables, en particulier dans les installations à cycle combiné solaire et gaz. Ces configurations hybrides unissent différentes formes d'énergie afin d'optimiser l'efficacité globale et la fiabilité de la génération d'électricité.



Figure 16: L'hybridation : une stratégie disruptive pour l'énergie

II.6 Rôle des turbines à vapeur dans les systèmes hybrides

- Dans les centrales à cycle combiné, une turbine à gaz produit de l'électricité en brûlant du gaz naturel, générant des gaz chauds à haute température. Ces gaz d'échappement sont ensuite utilisés pour produire de la vapeur dans une chaudière à récupération de chaleur, qui alimente la turbine à vapeur. Cette configuration augmente significativement le rendement global de la centrale [16].
- L'intégration d'un champ solaire thermique dans ce cycle combiné permet de produire de la vapeur supplémentaire grâce à l'énergie solaire, ce qui alimente la turbine à vapeur et augmente encore le rendement global de la centrale hybride. Par exemple, la centrale hybride solaire-gaz de Hassi R'mel en Algérie utilise cette technologie, où le rendement thermique total atteint 63 %, supérieur de 2 % à celui du cycle combiné sans apport solaire [16].
- Ainsi, la turbine à vapeur dans un système hybride sert à valoriser la chaleur résiduelle des turbines à gaz et à intégrer l'énergie thermique solaire, ce qui permet une production électrique plus propre, plus efficace et plus durable.

II.6.1 Intégration dans les systèmes hybrides renouvelables

- Les systèmes d'énergie renouvelable hybrides intègrent généralement plusieurs sources, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'éolien, et parfois des générateurs à combustion (diesel ou gaz) pour garantir une production d'énergie stable. La turbine à vapeur joue un rôle essentiel dans les systèmes

thermiques hybrides qui combinent énergie solaire thermique et gaz, en améliorant l'efficacité et en diminuant les émissions de polluants.

- L'emploi de turbines à vapeur dans ces configurations hybrides permet une meilleure utilisation de la chaleur disponible, en particulier celle provenant des ressources thermiques renouvelables, et renforce la flexibilité ainsi que la constance de la production d'électricité dans les réseaux hybrides.
- En somme, dans les systèmes hybrides qui intègrent des énergies renouvelables, les turbines à vapeur sont essentielles dans les centrales à cycle combiné solaire et gaz. Elles favorisent une augmentation du rendement global en valorisant la chaleur générée par la turbine à gaz et en intégrant la vapeur produite grâce à l'énergie solaire thermique, contribuant ainsi à une production d'électricité plus efficace et plus écologique.

II.7 Conclusion

Les turbines à vapeur jouent un rôle central dans la production mondiale de production d'énergie, en particulier à environ 80 de l'électricité produite dans les centrales thermiques avec des fossiles et des fougères nucléaires. Il est également utilisé dans les usines de cuisinière, permettant la production totale d'électricité et de chaleur qui optimise l'efficacité énergétique globale.

La technologie des turbines à vapeur est importante pour intégrer une variété de sources d'énergie, notamment la biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie solaire concentrée, qui contribue à diversifier le mélange d'énergie et à évoluer vers une énergie plus durable.

En résumé, grâce à sa polyvalence et à son efficacité, les turbines à vapeur restent le pilier fondamental des systèmes énergétiques mondiaux qui permettent une génération à grande échelle et favorisent simultanément des solutions pour une utilisation optimale de la vapeur dans différents secteurs industriels.

Chapitre III :

Bilan énergétique d'une centrale thermique

Introduction

Ce chapitre porte essentiellement sur l'étude énergétique d'une centrale thermique industrielle à vapeur. Ici, on donne un bilan énergétique avec le calcul des différents rendements énergétiques sont également représentés.

III.1. Bilan énergétique du central thermique:

III.1.1 Détermination du rendement de la turbine:

La turbine est une machine à une ligne d'arbre composée de corps **H** (Haute Pression), **MP** (moyenne Pression), et **BP** (Basse Pression) qui servent à convertir un courant de vapeur (énergie thermique) provenant du générateur de vapeur en énergie mécanique qui sert à tourner l'arbre et à entraîner l'alternateur. Ces corps sont By-passés et permettent un conditionnement de la vapeur.

- **Diagramme entropique de la vapeur d'eau**

Notre installation fonctionne suivant un cycle à resurchauffe qui est représenté sur le diagramme de Mollier

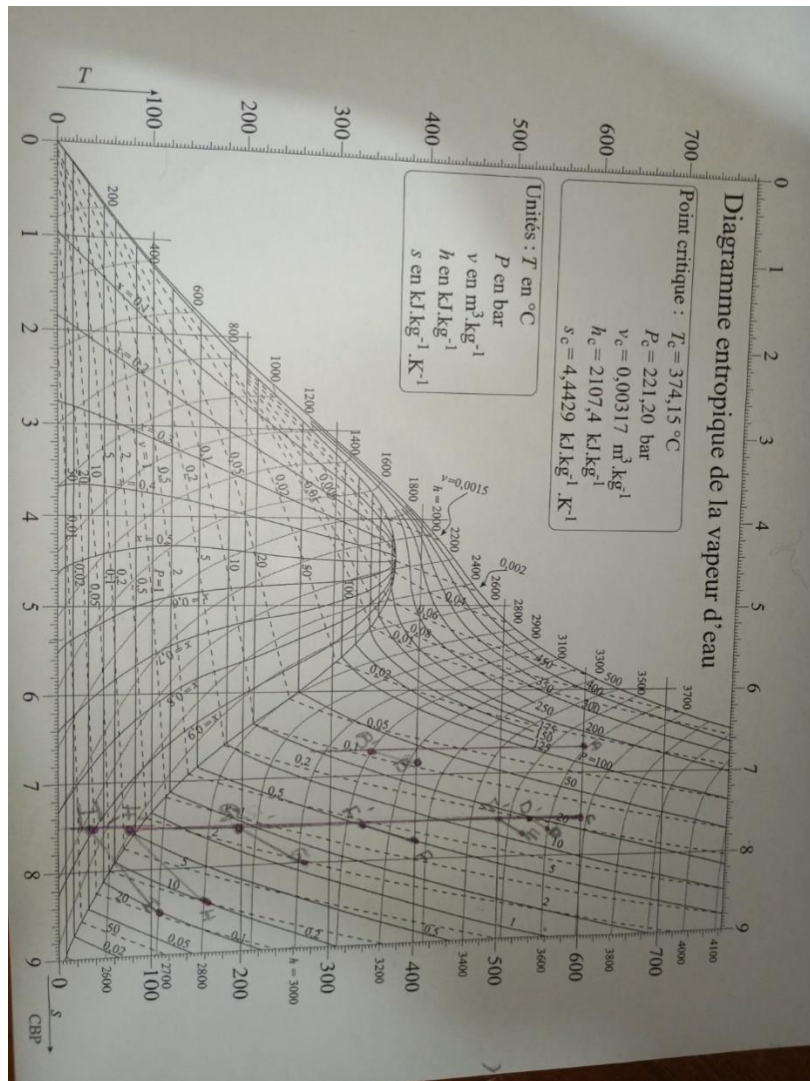


Figure 17 : Diagramme De Molier

• Tableau Des Paramètre :

Point	Pression	Température	Débit	Enthalpie Réelle	Enthalpie Isentropique
H. P1	150	600	730	3600	3600
Soutirage 7	36	400	43	3250	3100

M.P	30	600	679	3700	3700
Soutirage 6	18	560	29	3590	3500
5	14	530	36.5	3520	3485
4	5	400	39.5	3290	3100
3	1.2	265	33	3000	2900
2	0.2	160	31.4	2800	2690
1	0.1	110	28.5	2690	2600
B. P	0.032	25	470	2345	2300
Sortie	0.032	25	563	104.7	104.7

III.1.2 Détermination du rendement isentropique de la turbine HP:

Les rendements se calculent comme suit:

$$P1 = 150 \text{ bar}$$

$$P2 = 36 \text{ bar}$$

$$T1 = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T2 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H1 = 3600 \text{ kJ/kg}$$

$$H2 = 3250 \text{ KJ /K}$$

$$\eta_{is} = \frac{H1-H2}{H1-H2'} = \frac{3600-3250}{3600-3100} = 0.7$$

$$\eta_{is} = 70 \%$$

III.1.4 Détermination du rendement isentropique de la turbine MP:

Il est donné par:

$$P_{MP} = 30 \text{ bar}$$

$$P3 = 1.2 \text{ bar}$$

$$T_{MP} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T3 = 265 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H_{MP} = 3700 \text{ KJ / Kg}$$

$$H3 = 3000 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{MP} = \frac{H_{mp}-H3}{H_{mp}-H3'} = \frac{3700-3000}{3700-2900} = 0.875$$

$$\eta_{mp} = 87.5\%$$

III.1.5 Détermination du rendement isentropique de la turbine BP:

Le rendement isentropique du corps BP est donné par:

$$P_3 = 1.2 \text{ bar}$$

$$P_{B.P} = 0.032 \text{ bar}$$

$$T_3 = 265 \text{ °C}$$

$$T_{B.P} = 25 \text{ °C}$$

$$H_3 = 3000 \text{ KJ/Kg}$$

$$H_{B.P} = 2345 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{BP} = \frac{H_3 - H_{BP}}{H_3 - H_{BP}'} = \frac{3000 - 2345}{3000 - 2300} = 0.935$$

$$\eta_{BP} = 93.5\%$$

III.1.6. Détermination du rendement isentropique des Groupes D'Etage entre Deux Soutirage:**➤ Corps (M.P):**

Entre admission (c.M.P) et le soutirage S6, 3 étages de détentes les paramètres (p.T.H) sont :

$$P_{MP} = 30 \text{ bar}$$

$$T_{MP} = 600 \text{ °C}$$

$$H_{MP} = 3700 \text{ kJ/kg}$$

Le point fin de détente réelle :

$$P_6 = 18 \text{ bar}$$

$$H_6 = 3500 \text{ kJ/kg}$$

la transformation réelle donnerait le point S6

$$P_6 = 18 \text{ bar}$$

$$T_6 = 560 \text{ °C}$$

$$H_6 = 3590 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{is}(1 \text{ a } 3 \text{ M.P}) = \frac{H_{mp} - H_6}{H_{mp} - H_6'} = \frac{3700 - 3590}{3700 - 3500} = 0.55$$

$$\eta_{is} = 55\%$$

➤ **Entre S6 Et S5 :**

Calcul du rendement isentropique entre la 3 -ème roue (M.P) et la 7 -ème roue (M.P)

Le point S6 : $p_6 = 18 \text{ bar}$

$T_6 = 560 \text{ °C}$

$H_6 = 3590 \text{ KJ/Kg}$

Le point fin de détente isentropique S5`

$P_5 = 14 \text{ bar}$

$H_5' = 3485 \text{ KJ/Kg}$

Le point fin de détente réelles

$P_5 = 14 \text{ bar}$

$T_5 = 530 \text{ °C}$

$H_5 = 3520 \text{ KJ/Kg}$

$$\eta_{is}(4 \text{ a } 7 \text{ M..P}) = \frac{H_6 - H_5}{H_6 - H_5'} = \frac{3590 - 3520}{3590 - 3485} = 0.666$$

$$\eta_{is} = 66\%$$

➤ **Entre S5 Et S4 :**

Calcul du rendement isentropique entre la 8 -ème roue et la 11eme roues (M.P)

Le point S5 : $P_5 = 14 \text{ bar}$

$T_5 = 400 \text{ °C}$

$H_5 = 3520 \text{ KJ/Kg}$

Le point fin de détente isentropique s4`

$$P4 = 5 \text{ bar}$$

$$H4' = 3100 \text{ kJ/kg}$$

Le point fin de détente réelle

$$P4 = 5 \text{ bar}$$

$$T4 = 400 \text{ °C}$$

$$H4 = 3290 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{js} = \frac{H5 - H4}{H5 - H4'} = \frac{3520 - 3290}{3520 - 3100} = 0.547$$

$$\eta_{js} = 54.7\%$$

➤ **Entre S4 et S3 :**

Le point S4: P4 = 5bar

$$T4 = 400 \text{ °C}$$

$$H = 3290 \text{ kJ/kg}$$

Le point fin de détente isentropique sur le diagramme

$$P3 = 1.2 \text{ bar}$$

$$H3' = 2900 \text{ KJ/kg}$$

Le point fin de détente réelles sur le diagramme

$$P3 = 1.2 \text{ bar}$$

$$T3 = 265 \text{ °C}$$

$$H3 = 3000 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{js} = \frac{H4 - H3}{H4 - H3'} = \frac{3290 - 3000}{3290 - 2900} = 0.743$$

$$\eta_{js} = 74.3\%$$

➤ **Entre S3 et S2 : corps (B.P)**

Paramètre d'admission corps basse pression nous donne le point S3 :

$$P3=1.2 \text{ bar}$$

$$T3=265^\circ\text{C}$$

$$H3=3000 \text{ KJ/Kg}$$

La transformation isentropique et son intersection avec l'isobare 0.2 bars donnerait le point S2`

$$P2= 0.2 \text{ bar}$$

$$H2`=2690 \text{ kJ/kg}$$

La transformation réelle nous donnerait le point S2 :

$$P2 =0.2 \text{ bar}$$

$$T2=160 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H2=2800\text{KJ/kg}$$

$$\eta_{is} = \frac{H3-H2}{H3-H2'} = \frac{3000-2800}{3000-2690} = 0.645$$

$$\eta_{is}=\mathbf{64.5\%}$$

➤ **Entre S2 et S1 : corps B.P**

Le point S2

$$P2 = 0.2$$

$$T2 = 160^\circ\text{C}$$

$$H2 = 2800 \text{ KJ/Kg}$$

L'intersection isobare 0.1 bars nous donnerait la transformation isentropique S1

$$P1 = 0.1 \text{ bars}$$

$$H1`= 2600 \text{ kJ/kg}$$

La transformation réelle nous donnerait le point s1

$$P1 = 0.1 \text{ bars}$$

$$T1 = 110^\circ\text{C}$$

$$H1 = 2690 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{is} = \frac{H2-H1}{H2-H1'} = \frac{2800-2690}{2800-2600} = 0.55$$

$$\eta_{is} = \mathbf{55\%}$$

➤ **Entre S1 Et l'Echappement B.P**

$$\text{Le point S1 : } p1 = 0.1 \text{ bars}$$

$$T1 = 110^\circ\text{C}$$

$$H1 = 2690 \text{ KJ/Kg}$$

La transformation isentropique on donnerait le point B.P

$$P \text{ B.P} = 0.032 \text{ bars}$$

$$T \text{ B.P} = 25^\circ\text{C}$$

$$H \text{ B.P} = 2345 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{is} = \frac{H1-HB.P}{H1-HB.P'} = \frac{2690-2345}{2690-2300} = 0.88$$

$$\eta_{is} = \mathbf{88\%}$$

III.2. Récapitulatif Des Rendements De Chaque Corps :

- Rendement corps H.P = 0.7
- Rendement corps M.P = 0.875
- Rendement corps B.P = 0.935

III.2.1 Calcul des débits des soutirages:

L'installation thermique est un cycle à resurchauffe. On constate bien que les soutirages sont effectués au niveau des corps de la turbine. Donc, il faut identifier au début les débits d'admission au niveau de chaque corps.

On a:

- Corps HP: $\dot{m}_{HP} = 202.78 \text{ Kg/s}$
- Corps MP: $\dot{m}_{MP} = 188.61 \text{ Kg/S}$
- Corps BP: $\dot{m}_{BP} = 130.55 \text{ Kg/s}$

Les débits des soutirages au niveau des lieux de soutirages sont calculés comme suit:

Corps HP:

$$X7 = \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_{HP}}$$

$$\text{A.N : } X7 = \frac{11.94}{202.78} = 0.058$$

Corps M.P :

$$X6 = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_{M.P}}$$

$$\text{A.N : } X6 = \frac{8.05}{188.61} = 0.042$$

$$X5 = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_{M.P}}$$

$$\text{A.N : } X5 = \frac{10.13}{188.61} = 0.053$$

$$X4 = \frac{\dot{m}4}{\dot{m} \text{ M.P}}$$

$$\text{A.N : } X4 = \frac{10.97}{188.61} = 0.058$$

$$X3 = \frac{\dot{m}3}{\dot{m} \text{ M.P}}$$

$$\text{A.N : } X3 = \frac{9.16}{188.61} = 0.048$$

$$X2 = \frac{\dot{m}2}{\dot{m} \text{ M.P}}$$

$$\text{A.N : } X2 = \frac{8.72}{188.61} = 0.046$$

$$X1 = \frac{\dot{m}1}{\dot{m} \text{ M.P}}$$

$$\text{A.N : } X1 = \frac{7.91}{188.61} = 0.041$$

CORPS B.P :

$$XE = \frac{\dot{m}E}{\dot{m} \text{ B.P}}$$

$$\text{A.N : } XE = \frac{156.38}{130.55} = 1.19$$

III.3. Calcul des différents rendements**III.3.1 Rendement du condenseur:**

Par manque de données, on va considérer que le rendement du condenseur (de condensation) est de 100%.

$$\eta_c = 1$$

III.3.2. Calcul du rendement du cycle réel:

Le rendement du cycle réel n'est que le rapport du travail réel de la turbine $W_{réel}$ et de la quantité de chaleur fournie par la chaudière à la vapeur. Il se calcule comme suit :

$$\eta_{réel} = \frac{W_{réel}}{Q}$$

$$W_{réel} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

$$Q = (h_1 - h_s) + (h_3 - h_2)$$

$$\eta_{réel} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_s) + (h_3 - h_2)} = \frac{(3600 - 3250) + (3700 - 2345)}{(3600 - 104.7) + (3700 - 3250)} = 0.43$$

$$\eta_{réel} = 0.43$$

III.3.3. Calcul du rendement mécanique:

Le rendement mécanique n'est que le rapport du travail de la turbine (récupéré au niveau de l'arbre) au travail thermodynamique de la vapeur fournie aux aubages (travail nécessaire pour faire tourner la turbine). Il se calcule de la manière suivante :

$$\eta_{méc} = \frac{W_s}{w_{vap}}$$

$$\eta_{mécanique} = \frac{W_s}{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}$$

➤ Calcul de W_s :

Pour notre installation on a:

$$P_s = 252$$

$P_s = 252.52 \text{ MW}$ pour un débit de l'ordre de 188.61 Kg/s

P_s est la puissance des sorties
recueillies sur l'arbre de la turbine. Il vient :

$$\text{D'où : } W_s = \frac{P_s}{M} = \frac{252.52 \cdot 1000}{188.61} = 1338.84 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_t = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

$$W_t = (3600 - 3250) + (3700 - 2345)$$

$$W_t = 1705 \text{ KJ/kg}$$

$$\eta_{\text{mécanique}} = \frac{1338.84}{1705} = 0.78$$

$$\eta_{\text{mécanique}} = 78\%$$

➤ *Calcul du rendement des auxiliaires :*

Dans une centrale industrielle, il est bien établi qu'une portion du travail recueillies sur l'arbre de la turbine est utilisée pour faire fonctionner les autres organes de l'installation tels

que : les différentes pompes, les éléments de la chaudière (ventilateur, broyeurs, etc.), batterie alimentaire etc.

La portion du travail est donnée comme suite :

$$W'_s = 6\% \text{ de } W_s$$

$$W'_s = 0,06 \times W_s$$

$$A.N : \quad W'_s = 0,06 \times 1338,84$$

$$W'_s = 80,33 \text{ KJ/Kg}$$

Le rendement des auxiliaires sera alors :

$$\eta_{aux} = \frac{W_s - W'_s}{W_s}$$

$$\eta_{aux} = \frac{1338,84 - 80,33}{1338,84} = 0,94$$

$$\eta_{aux} = 94$$

Rendement de la chaudière:

Par manque de données nécessaires pour le calcul du rendement de la chaudière, on va considérer (selon la littérature) que le rendement de la chaudière (rapporté au pouvoir calorifique inférieur = P.C.I) est de l'ordre de 92% [17].

$$\eta_{ch} = 92\%$$

III.4. Rendement global:

Le rendement global est le produit des différents rendements qui ont été calculés. Il est donné par la formule suivante :

$$\eta_G = \eta_C \times \eta_{aux} \times \eta_{ch} \times \eta_{m\acute{e}canique} \times \eta_{r\acute{e}el}$$

A.N :

$$\eta_G = 1 \times 0.92 \times 0.94 \times 0.43 \times 0.78$$

$$\eta_G = 0.2900$$

$$\eta_G = 29\%$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette tâche modeste concerne l'étude de la performance énergétique des installations industrielles de chauffage à vapeur. Diverses études menées au cours de cet article nous permettent de comprendre le phénomène d'adaptation de la fonction d'une centrale thermoélectrique.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats trouvés :

- Le rendement global de la centrale a été évalué avec la prise en compte des valeurs de cinq revenus possibles qui peuvent être calculés.
- D'après les résultats obtenus, on constate que le rendement global de la centrale thermique vaut 29%. Cette valeur est très satisfaisante. Elle vous parlera de l'état de santé des tests installés.

En fin de compte, cette étude nous a permis de comprendre le phénomène qui régule la fonction d'une centrale thermoélectrique et modifie ses performances.

Bibliographie

- [1] Encyclopédie MSN. Encarta, 2007, Machine à vapeur, <http://fr.encarta.com>
- [2] Mémoire de licence, « étude et analyse de la turbine à vapeur », présenter par : A, MECHFRI et M, CH, MEHIRI, Université Kasli MERBAH Ouargla ; 2016-2017.
- [3] Mémoire de MASTER, « Analyse thermodynamique des performances d'une installation de turbine à vapeur à l'aide du logiciel EES », présenté par : F, MEGHZILI et F, FERGANI
- [4] Mémoire Etat des lieux de la station de pompage pour alimentation des pipe-lines région HAUD BERKAOUI (HASSI MESSAOU)
- [5] ULRICH BIERBAUM et GUNTHER FREITAG document BOGE KOMPRESSOREN : le meilleur de l'air comprimé ISBN original : 3-896446-016-1
- [6] <https://elearning.centre-univ-mila.dz/a2025/mod/resource/view.php?id=38624>
- [7] <https://fr.yanturbo.com/gas-turbine-power-plant/gas-turbine-power-plant-equipment/condensing-gas-steam-turbine.html>
- [8] <https://direns.minesparis.psl.eu/Sites/Thopt/fr/co/turbines.html>
- [9] <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/02/SAMI-BOUTERRA.pdf>
- [10] <https://onm-blog.meteo.dz/wp-content/uploads/2021/07/Prevision-des-performances-d-une-turbine-a-gaz-en.pdf>
- [11] <https://youmatter.world/fr/definition/pollution-definition-sources-consequences-sante-environnement-mesures/>
- [12] <https://ekwateur.fr/blog/enjeux-environnementaux/impact-des-transport-environnement/>
- [13] <https://fr.scribd.com/document/789821971/Document-1>
- [14] <https://www.emerson.com/fr-fr/automation/control-and-safety-systems/distributed-control-systems-dcs/ovation-distributed-control-system/steam-turbine-controls>
- [15] <https://www.vapeurmax.com/technologie-de-la-vapeur-au-coeur-des-innovations-futures/>
- [16] <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/06/fredj-amar.pdf>
- [17] Fouad BOUZAR et Mohamed ATTIG. Etude énergétique d'une centrale thermique à turbine à vapeur. *mémoire de fin d'études, Univ. M'hamed, Boumerdes, 2009*