

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : réseaux électrique

Thème

**Etude énergitique d'une centrale thermique à
gaz**

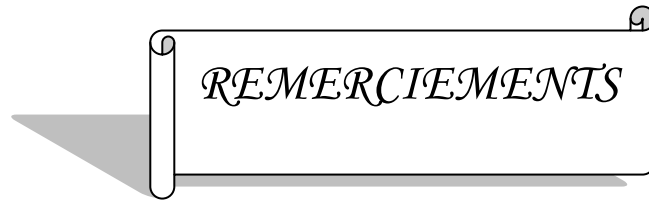
Devant le jury composé de :

..... Président
..... Examineur
..... Examineur
Dr.Benattous Djilani Encadreur

Présenté par :

- Mehachi Lazhar
- Merkhoufi Belkhir

2020-2021



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. BENATTOUS DJILANI** pour proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes parents. Aucun hommage pourrait être à

la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent

De me combler. Que dieu leur procure

bonne santé et de longue vie.

A toute ma famille

A tous mes amis.

*Merkhoufi
Belkhir*

Dédicace

La locomotive de recherche a franchi de nombreux obstacles, mais j'ai essayé de les surmonter régulièrement, grâce à Dieu et de sa part.

A ma chère mère, qui veillait les nuits, s'est sacrifiée ainsi que mes chers frères et sœurs, car ils étaient comme un soutien et un soutien pour achever la recherche.

Je ne dois pas oublier mes professeurs et collègues qui ont eu le plus grand rôle dans mon soutien

Fournit des informations précieuses...

Je vous présente mon mémoire de fin d'études.....

Prier le Tout-Puissant - le Tout-Puissant - pour prolonger votre vie et vous bénir avec des primes.

Mehachi Lazhar

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I : Généralités sur les centrales électriques

Introduction.....	05
I-Généralités sur les énergies renouvelables.....	05
I-1 Introduction.....	05
I.1.1. Définition de l'énergie renouvelable.....	05
I.1.2. Les énergies renouvelables traditionnelles et nouvelles.....	05
I.2.Types de l'énergies renouvelables.....	06
I.2.1. L'énergie hydraulique.....	06
I.2.2 .L'énergie de la biomasse.....	07
I.2.3 .L'énergie de la géothermie.....	07
I.2.4 .L'énergie solaire.....	07
I.2.5 .L'énergie éolienne.....	08
I-3 Généralité sur les centrales énergétiques.....	08
I.3.1. Les Centrale Nucléaire.....	08
I.3.1.1.Introduction.....	08
I.3.1.2.Histoire.....	08
I.3.1.3.Uranium.....	09
I.3.1.4.Le fonction d'une centrale nucléaire.....	09
A- Description.....	09
B- Fonctionnement.....	10
I.3.1.5.Inconvénients des centrales nucléaires.....	10
I.3.1.6.Avantages des centrales nucléaires.....	10

I.3.2. Les centrales hydrauliques.....	10
I.3.2.1. Définition.....	10
I.3.2.2. Le Fonctionnement D'une Centrale Hydraulique.....	11
I.3.2.3. Avantages.....	12
I.3.2.4. Inconvénients.....	12
I.3.3. Centrale éolienne.....	12
I.3.3.1. Historique.....	12
I.3.3.2. Fonctionnement.....	12
I.3.3.3. Implantation d'une éolienne nécessite.....	13
I.3.3.4. Avantages.....	13
I.3.3.6. Inconvénients.....	13
I.3.4. Les centrales solaires.....	14
I.3.4.1. Les Avantages.....	14
I.3.4.2. Les Inconvénients.....	15
I.3.5. Les Centrales Thermiques.....	15
I.3.5.1. Définition.....	15
I.3.5.2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique.....	15
I.3.5.3. Description des principes organes d'une centrale thermique.....	16
I.3.5.3.1. Turbines à vapeur.....	16
A-Définition.....	16
B-Principe d'une turbine à vapeur.....	17
I.3.5.3.2. Turbine à gaz.....	17
A-Définition.....	17
B-Historique des turbines à gaz.....	18
I.3.5.3.3. Chaudière.....	19
A-Introduction.....	19
B- Principe de fonctionnement d'une Chaudière.....	20
I.3.5.3.4. Condenseur.....	21
A-Introduction.....	21
B- Classification des condenseurs.....	21
C-Principe de fonctionnement.....	21
I.4. Consommation d'énergie primaire dans le monde.....	21
I.4.1. Les pays consommateurs d'électricité.....	23

I.5. Conclusion.....	23
----------------------	----

CHAPITRE II : Presentation et Modélisation du TAG

Introduction:.....	25
II. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	26
II.1. EXEMPLES DE TURBINES À GAZ.....	29
II.1.1.Turbines à gaz industrielles.....	29
II.1.2.Turbines à gaz dérivées de l'aviation	30
II.2.PRINCIPALES CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES	31
II.2.1.Chambre de combustion.....	31
II.3.Classification des turbines à gaz.....	32
II 3.1. Par mode de construction.....	32
II 3.1.a.La turbine à gaz mono-arbre.....	32
II 3.1.b.La turbine à gaz bi-arbres.....	33
II 3..2. Par mode de travail	33
II 3.2.a.Turbines avec étage à action et à réaction.....	33
II 4.fonctionnement Par mode de thermodynamique.....	33
II.5. Technologie des turbines à gaz.....	34
II .6.Interactions entre la TG et l'environnement.....	34
II .7.Influence de l'environnement sur l'exploitation de la TG.....	34
II .8.Effets de l'exploitation de la TG sur l'environnement.....	35
II .9.différent types de turbine à gaz.....	36
II.10. Applications de la turbine à gaz.....	37
II.10.1- Réalisation pratique	37
II.10.2. Limites techniques et avantages.....	38
II.11. Domaines d'utilisations des turbines à gaz.....	39
II.12.Avantages.....	40
II.13. Inconvénients.....	40
II.14.Modélisation la turbine à gaz.....	41
II.14.1. TURBINES À GAZ HDGT ET CYCLE BRAYTON.....	41

II.14.2. HDGT MODÈLE POUR L'ANALYSE DE STABILITÉ	44
II.14.2.A.Paramètres de la turbine.....	45
II.14.2.B. Positionneur de vanne et décalage du système de carburant.....	50
II.14.2.C.Time Delays et Discharge Lag.....	51
II.14.2.D.Mesure de la température.....	51
II.15. Conclusion.....	53

CHAPITRE III : Simulation de la turbine à gaz

Intrduction.....	55
III.Simulation.....	55
III.1.REPRESENTATION SOUS SIMULINK :.....	55
III.1.1.SIMUNLINK.....	55
III.1.2.LES BRIQUES DE BASE.....	55
III.1.3.SCHEMA BLOC SOUS SIMULINK DE LA TURBINE :.....	56
III.1.4.Paramètres de turbine.....	57
III.1.5.Paramètres de Machine Synchronous.....	58
III.1.6.Paramètres de la Charge1.....	58
III.1.7.Paramètres de la Charge2.....	58
III.2.Résultats de la simulation.....	59
III.3. Conclusion.....	64
Conclusion générale	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau I.1: Les 11 pays les plus consommateur d'électricité en 2014	23
Tableau III.1: Paramètres de turbine	57
Tableau III.2: Paramètres de Machine Synchronous	58
Tableau III.3: Paramètres de la Charge1	58
Tableau III.4: Paramètres de la Charge2	58

LISTE DE FIGURES

Figure	Page
Figure I.1: Structure de la consommation mondiale d'énergie finale en 2006	05
Figure I.2: Evolution de l'approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable	06
Figure I.3: Schéma d'une centrale nucléaire	09
Figure I.4: Schéma d'une centrale hydraulique	11
Figure I.5: Quelques organes d'une centrale hydraulique	12
Figure I.6: les différents éléments d'une éolienne	13
Figure I.7: Schéma d'une centrale thermique	16
Figure I.8: Rotor d'une turbine à vapeur	17
Figure I.9: Composants d'une turbine à gaz simple	18
Figure I.10 : Chaudière industrielle	20
Figure I.11: Consommation énergétique mondiale, en térawatts-heures (TWh), de 1965 à 2013 (Pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autre et renouvelable.)	22
Figure II.1. turbine à gaz simple	26
Figure II.2. Extrait de techniques de l'Ingénieur. Génie Energétique	29
Figure II.3. Rolls Royce SM1C. reproduit avec l'aimable autorisation de Rolls-Royce plc	30
Figure II.4. Alstom power GT24/26	31
Figure II.5. Chambre de combustion	32
Figure II.6. Schéma d'une turbine à gaz à une ligne d'arbre	37

Figure II.7.Schéma d'une turbine à gaz à deux lignes d'arbres.	37
Figure.II.8. Vue schématique d'un HDGT typique et de ses principaux composants	42
Figure II.9. Cycle de Brayton typique dans le cadre température-entropie.	43
Figure II.10. Modèle de Rown pour les HDGT pour les études dynamiques.	44
Figure II.11. Pneumatic valve positioned and valve actuator. (a) Schematic view. (b) Internal feedback mathematical model.	48
Figure II.12. Radiation shield and thermocouple. (a) Schematic of radiation shield and mounted thermocouple. (b) Simplified equivalent electric circuit for calculating the temperature at thermocouple position	51
Figure III.1.Représentation du bloc turbine à gaz sous Simulink	56
Figure III.2.Modèle de Rown pour les HDGT pour les études dynamiques.	57
Figure III.3. l'évolution de Vitesse du rotor ω_m	59
Figure III.4. l'évolution de Courant statorique	60
Figure III.5. l'évolution de Puissance active de sortie P_{eo}	60
Figure III.6. l'évolution de Puissance Réactive de sortie Q_{eo}	61
Figure III.7. l'évolution de l'Angle de charge δ (deg)	61
Figure III.8. l'évolution de la Charge	62
Figure III.9. l'évolution de Valve demand	62
Figure III.10. l'évolution de puissance mécanique	63

TABLE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

Symboles	Significations	Unites
TG	Turbine à gaz	/
η	Rendement	/
GWEC	Global Wind Energie Council	/
HDGT	Heavy Duty Gas Turbine	/
n	vitesse de rotation	tr/min
f	Fréquence	Hz
P	Puissance active	Watt
S	Apparente	VA
Q	Puissance réactive	VAR
T	Température	K
ε	Efficacité	/
I	Courant	A
V	Tension	Volt
P	Pression	bar
$\dot{m}$	Débit d'air	kg/s
H	Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg

INTRODUCTION GENETTERALE

"Rienne se perd, rien ne se crée, tous se transforme"

Partant de ce principe, l'homme n'a cessé d'exploiter la nature pour ses besoins, des fois même sans le vouloir.

La production d'électricité est un secteur industriel vital, elle se fait depuis la fin du XIX^e siècle à partir de différentes sources d'énergie potentielles. Depuis quelques années, une augmentation significative des besoins énergétiques, une raréfaction des ressources fossiles et des préoccupations environnementales de plus en plus importantes sont observées.

L'objectif mondial est de trouver les meilleures options pour avoir une production flexible par exemple les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins.

En Algérie, l'énergie électrique produite, principalement, à partir du gaz naturel. La part de la puissance installée de l'ensemble des centrales utilisant cette énergie primaire dépasse les 96 %, le reste des énergies employées se répartit entre le gasoil dans les centrales diesel et l'eau dans les centrales hydroélectriques.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie renouvelables, et présente les différentes centrales électriques les plus utilisées. Et le fonctionnement de la turbine à gaz, leur domaine d'applications et leur avantage et inconvénient.

Le deuxième chapitre Ce qui concerne les généralités et les différents organes constituant la turbine à gaz ont été présentées. Une classification selon les divers critères utilisés et une chronologie de développement des turbines à gaz, ont été détaillées. Plus l'étude énergétique, et la modélisation de modèle d'une turbine à gaz présente par Rowen.

Le troisième et le dernier chapitre concerne la simulation (Matlab-simulink), et les résultats et discussions obtenue dans le chapitre précédent.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui va englober l'ensemble des conclusions qu'on peut tirer de cette étude.

Résumé :

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. C'est pourquoi nous utilisons des unités de production, qui sont des centrales électriques, même si les sources d'énergie qu'elles exploitent varient, telles que les centrales électriques (thermiques, nucléaire, éolien, solaire, hydraulique... Etc). En Algérie, les centrales thermiques à gaz sont principalement utilisées pour produire plus de 90%.

Notre objectif dans ce présent travail se résume à la modélisation et simulation des turbines à gaz pour les centrales thermiques, en présentant leur principe de fonctionnement, l'étude énergétique en plus l'extraction de données et les résultats connexes.

Mots clés : Etude énérgitique, Energie renouvelable, Centrale thermique, Turbine à gaz, Modélisation, Simulation.

Abstract:

In our time, and without electricity, the daily life would be not easily possible. It is therefore necessary to know how to produce it efficiently and continuously. That is why we use production units, which are power plants, even if the energy sources they exploit vary, such as power plants (thermal, nuclear, wind, solar, hydraulic... etcetera). In Algeria, Gas-fired power plants are mainly used to produce more than 90%.

Our current goal is to model and simulate gas turbines for thermal power plants, presenting their operating principle, energy study in addition to data extraction and related results.

Key words : Energy study, Renewable energy, Thermal power plant, Gas turbine, Modeling, Simulation.

ملخص:

إن العيش في هذه الأيام دون كهرباء، يعتبر من الأمور التي يصعب على الإنسان أن يتخيلها. لأجل ذلك يحاول جاهدًا أن يوفرها بعدة طرق وذلك من أجل ضمان إستمراريتها وفعاليتها لهذا نستخدم وحدات الإنتاج وهي محطات توليد الكهرباء وإن اختلفت مصادر الطاقة التي تعمل بها مثل محطات الطاقة (الحرارية، النووية، الرياح، الشمسية، الهيدروليكية... إلخ). في الجزائر يتم الاعتماد بشكل أساسي على محطات الكهرباء الحرارية الغازية لإنتاج الكهرباء بنسبة تفوق 90%.

يتمثل هدفنا في هذا العمل الحالي في نمذجة ومحاكاة التوربينات الغازية الخاصة بالمحطات الكهربائية الحرارية من خلال تقديم مبدأ عملها، دراستها الطاقوية بالإضافة إلى إستخلاص البيانات و النتائج المتعلقة بها.

الكلمات المفتاحية : دراسة طاقوية، طاقة متجددة، محطة الطاقة الحرارية، توربينات غازية، نمذجة، محاكاة.

Chapitre I

*Généralités sur les
centrales électriques*

Introduction

La nécessité de la production d'énergie électrique est apparue au début de 19 siècle, jour après jour, cette nécessité est devenue plus importante avec l'évolution de la technologie et la démographie. pour produire cette énergie, l'homme a poursuit plusieurs méthodes, en partant des centrales électriques hydraulique, thermique, éoliennes, nucléaire, géothermique et solaire,

I Généralités sur les énergies renouvelables et les centrales électriques

I.1. Introduction

Toutes les énergies utilisées par l'homme proviennent de l'une des sources suivantes :

- l'énergie rayonnante émise par le Soleil (énergie-solaire), principalement sous deux formes :
 1. l'énergie solaire directe.
 2. l'énergie solaire capturée sous la forme de combustibles biomasse ou fossile.
- l'énergie géothermique de l'intérieur de la Terre.
- l'énergie des marées provenant de l'attraction de la lune.
- l'énergie nucléaire.

I.1.1. Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies sont dites "renouvelables" tant qu'elles dépendent du système écologique de la Terre, de l'insolation et de l'énergie géothermique de la Terre. En pratique, les sources énergétiques renouvelables font allusion à :

- la puissance hydraulique.
- l'énergie biomasse.
- l'énergie solaire.
- l'énergie éolienne.
- l'énergie géothermique
- l'énergie de la mer.

Grâce aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui se renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, elles seront disponibles à l'infini.

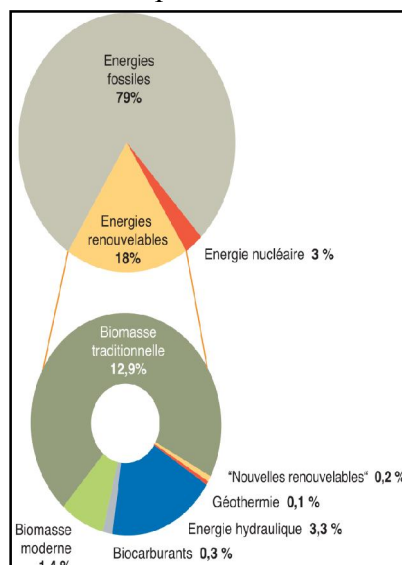


Figure I.1: Structure de la consommation mondiale d'énergie finale en 2006

I.1.2. Les énergies renouvelables traditionnelles et nouvelles

On fait parfois une distinction entre les renouvelables ‘traditionnelles’ et les ‘nouvelles’ ou ‘modernes’. Alors que le terme ‘traditionnel’ s’applique à l’utilisation de la biomasse, et ce principalement dans le cas de l’énergie domestique surtout dans les pays en développement, celui des énergies renouvelables ‘nouvelles’ regroupe les formes d’énergies renouvelables modernes et durables.

Les sources énergétiques renouvelables sont habituellement considérées comme étant un élément de réponse aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques actuels. En 2006, les énergies renouvelables représentaient environ 18 % de la consommation d’énergie primaire dans le monde : principalement de biomasse traditionnelle. Cependant les énergies “nouvelles”, c’est-à-dire le solaire, l’éolien et l’énergie marémotrice contribuaient à hauteur de seulement 0,2 % de l’utilisation énergétique primaire dans le monde (Figure I.1).

La majeure partie de ces énergies renouvelables provient de la biomasse et de l’énergie hydraulique, des grandes centrales hydrauliques essentiellement (Figure I.2). En général, les sources d’énergies renouvelables sont des sources énergétiques indigènes; ainsi ont-elles le potentiel de fournir des services énergétiques avec le risque 0 ou presque 0 polluant et gaz à effet de serre.

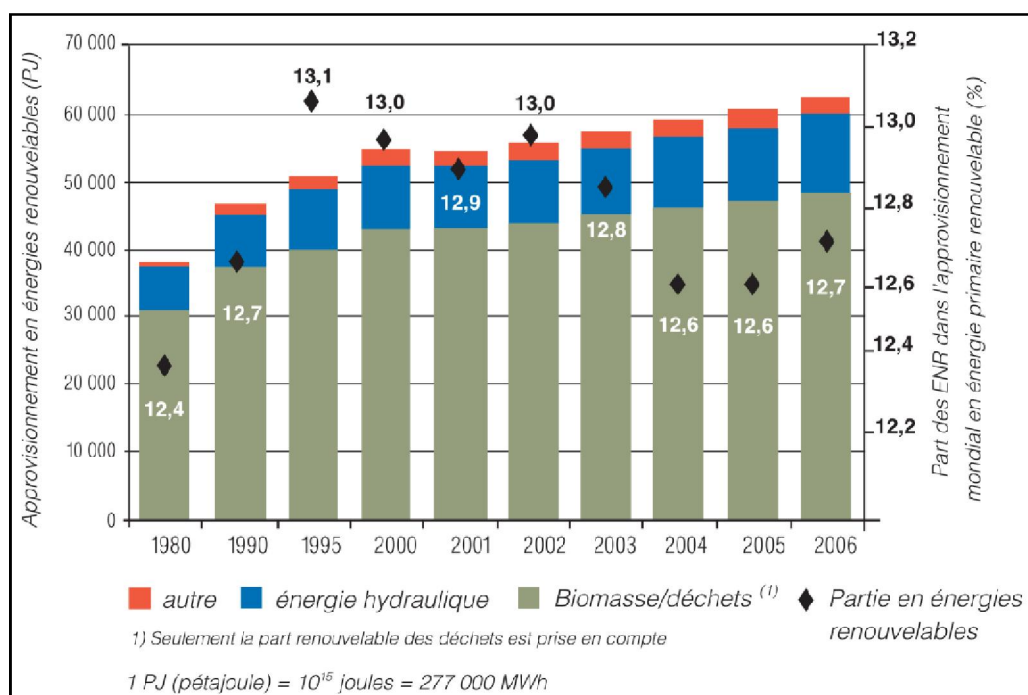


Figure I.2: Evolution de l'approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable

I.2.Types de l'énergie renouvelable:

I.2.1. L'énergie hydraulique:

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la

puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On distingue la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on va considérer essentiellement la petite hydraulique [1]. La petite hydraulique est constituée en grande majorité par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau.

I.2.2 .L'énergie de la biomasse:

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1 % de la production d'électricité mondiale [2].

I.2.3 .L'énergie de la géothermie:

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- la géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [3].
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

I.2.4 .L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [4]. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

I.2.5 .L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [5]. Selon le Global Wind Energie Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [6], soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

I-3 Généralité sur les centrales énergétiques

I.3.1. Les Centrale Nucléaire

I.3.1.1.Introduction :

La production mondiale d'électricité dans le monde par le nucléaire est de 16 %. La principale source d'énergie électrique dans le monde reste le thermique à flamme, ce qui est mauvais pour l'atmosphère (émissions de CO₂). Le 16 mai 2007, 437 réacteurs nucléaires sont en fonctionnement dans le monde. Trente centrales sont en cours de construction, soit un gain de 6 %. Le nucléaire est une énergie en développement dans le monde, tout particulièrement en Asie [7].

I.3.1.2.Histoire :

Le 27 juin 1954, la première centrale nucléaire civile fut connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique, avec une puissance de production électrique de 5 Mégawatts. En 1956, plusieurs centrales nucléaires furent aménagées en France, en Angleterre et aux États-Unis. En 1957, les travaux de construction du premier réacteur pour usage civile en France (EDF1) démarrèrent à la centrale nucléaire de Chinon.

La puissance nucléaire mondiale a augmenté rapidement au fil des années, s'élevant à plus de 1 Gigawatt (GW) en 1960, allant jusqu'à 366 GW en 2005.

Plus des deux tiers des centrales nucléaires commandées après janvier 1970 ont été annulés. Pour cause : les coûts économiques croissants, dus aux durées de construction de plus en plus longues, ont rendu le nucléaire moins compétitif dans les années 1980 et 1990. Par ailleurs, dans certains

pays les risques d'accidents nucléaires et les problèmes des déchets radioactifs, ont conduit certains pays à renoncer à l'énergie nucléaire [7].

I.3.1.3.Uranium :

A l'état pur, l'uranium solide est un métal radioactif gris et blanc (voire argenté) qui rappelle la couleur du nickel. Il est dur et très dense. De plus, l'uranium est l'atome le plus lourd (qui contient le plus de nucléons) présent naturellement sur la Terre.

Après son extraction, le minerai d'uranium est broyé, traité, affiné et dans certain cas, enrichi avant de servir à la fabrication de combustible nucléaire.

L'exploitation de l'uranium comporte certains atouts, comme les revenus de l'exportation et la création d'emplois. Cependant, les effets négatifs de l'exploitation sur l'environnement, l'économie et la santé l'emportent sur ses avantages.

L'uranium est dangereux, lorsqu'il se désintègre, il émet de l'énergie et se transforme en substances diverses qui se désintègrent à leur tour en produisant de l'énergie radioactive. Ces matières émettent des radiations de faible intensité capables de pénétrer les cellules et de modifier les molécules nécessaires à un fonctionnement normal. C'est ce qui pose le risque le plus important pour la santé [7].

I.3.1.4.Le fonction d'une centrale nucléaire :

A- Description:

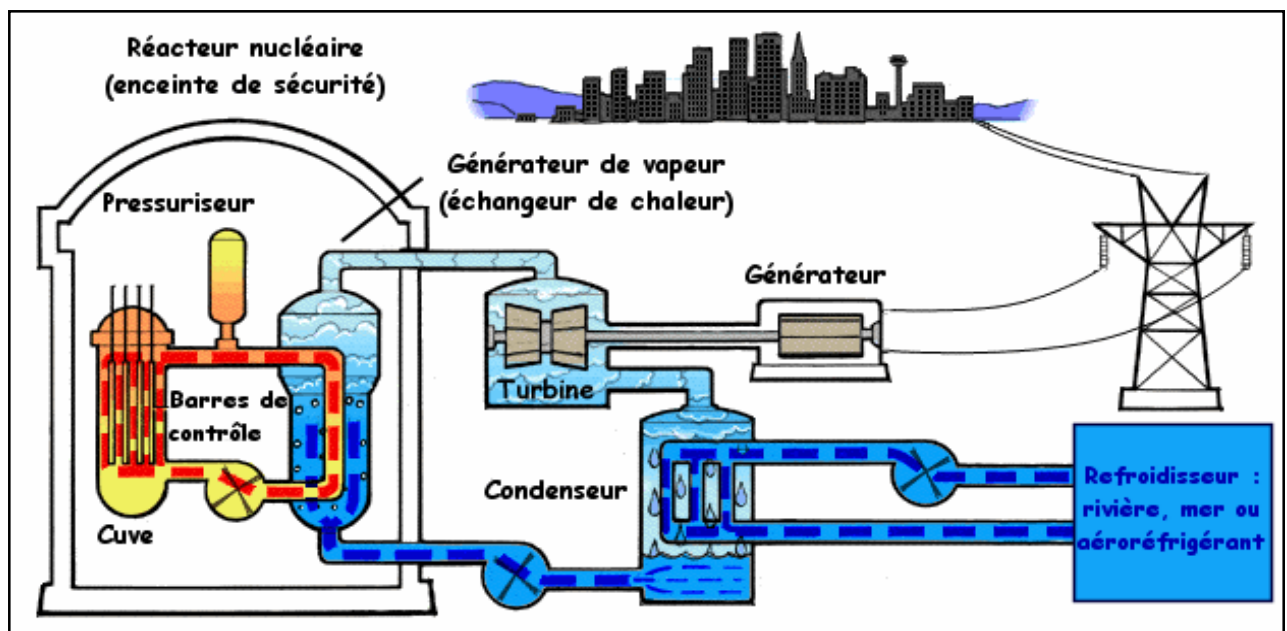


Figure I.3: Schéma d'une centrale nucléaire [7].

Une centrale nucléaire (Figure I.3) regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité. Elle comprend plusieurs tranches, chaque tranche correspondant à un groupe d'installation conçu pour fournir une puissance électrique donnée (900Mwe; 1300MWe...).

Une tranche comprend généralement :

- Le bâtiment réacteur.
- une enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire.
- les générateurs de vapeur (3 ou 4 selon la génération).
- un pressurisé.
- une partie d'un circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire [7].

B- Fonctionnement :

L'uranium est enfermé à l'intérieur de gaines métalliques étanches. C'est dans ces gaines que se produit la fission d'uranium. L'eau dans le coeur se réchauffe au contact de ces éléments combustibles. Cette eau, à la sortie de la cuve, cède sa chaleur à l'eau d'un second circuit, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Une fois refroidie, elle retourne dans le coeur à l'aide d'une pompe. Cette eau est chauffée à 320°C et est maintenue à une pression de 155 atmosphères afin de rester à l'état liquide. Dans le générateur de vapeur, l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur au contact des tubes parcourus par l'eau à 320° du circuit primaire. Cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur se transforme en eau dans le condenseur, avant d'être renvoyée au générateur de vapeur. De l'eau en provenance de l'aéroréfrigérants traverse le condenseur par des milliers de tubes. La vapeur en provenance de la turbine se condense au contact de ces tubes froids. L'eau contenue dans ces tubes va se réchauffer d'une dizaine de degrés : cette eau tiède (30-35°) est refroidie par le courant d'air dans l'aéroréfrigérants avant de repartir vers les tubes du condenseur. Un panache de vapeur d'eau générée par la différence de température entre l'air et l'eau s'échappe de la tour de refroidissement [7].

I.3.1.5.Inconvénients des centrales nucléaires :

- Exigence de la fermeture des sites dangereux ou la restauration de la résistance des installations.
- les déchets hautement radioactifs renferment des cendres et des résidus issus des combustibles irradiés en réacteurs : ces déchets concentrent 90 % de la radioactivité

I.3.1.6.Avantages des centrales nucléaires :

- Le nucléaire permet de produire de l'électricité peu coûteuse et ce, sans polluer l'atmosphère.
- La consommation électrique augmentant sans cesse depuis 30 ans, seul le nucléaire peut pour l'instant subvenir à nos besoins.
- Grâce à une nouvelle génération de centrales nucléaires, la sûreté sera améliorée et la production des déchets radioactifs à vie longue sera réduite [7].

I.3.2. Les centrales hydrauliques :

I.3.2.1. Définition :

Le déplacement de l'eau constitue une énergie qu'on peut exploiter. Ainsi, les centrales hydrauliques produisent de l'électricité à partir de cette énergie. L'eau est canalisée jusqu'à une turbine. Sous la pression de l'eau sur les ailettes, la turbine se met à tourner et entraîne un générateur qui produit de l'électricité [8]. Plus les générateurs tournent vite, plus ils fournissent d'électricité. La vitesse de la turbine, et par conséquent la quantité d'électricité produite par le générateur qu'elle actionne, dépendent de la pression de l'eau. Plus cette pression n'est grande et plus la turbine tourne vite.

Une centrale hydraulique est alimentée par une retenue d'eau. Un barrage est établi à travers une vallée pour accumuler un grand volume d'eau [8].

I.3.2.2. Le Fonctionnement D'une Centrale Hydraulique :

Le barrage (Figure I.4 et I.5) retient l'eau, créant ainsi une retenue. Ensuite, on canalise l'eau qui va s'écouler vers un mécanisme de production d'énergie. Le débit est contrôlé par des vannes. A la sortie de la conduite, l'eau est projetée sur une turbine. Cette turbine est couplée à un alternateur, qui va alors transformer l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique.

Puis, un transformateur élève la tension produite par l'alternateur afin qu'elle puisse être facilement transportée dans les lignes à haute et très haute tension du réseau de distribution électrique.

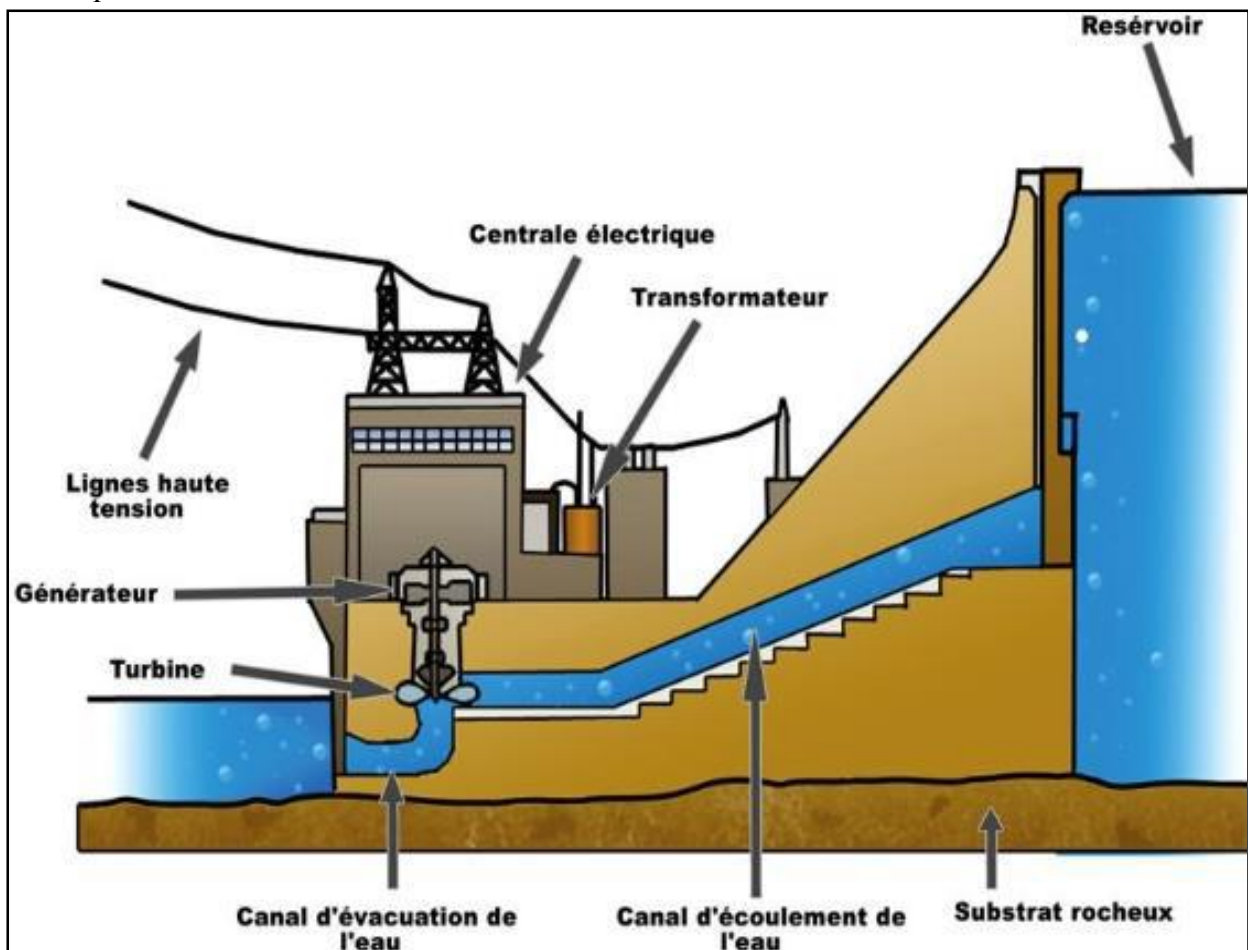


Figure I.4: Schéma d'une centrale hydraulique [8].

A la sortie de la turbine, l'eau est rejetée dans la rivière. La puissance de l'eau qui fait tourner la turbine, dépend donc du débit et de la hauteur de la chute [8].



Figure 1.5: Quelques organes d'une centrale hydraulique [8].

Les centrales hydroélectriques produisent de l'électricité de manière très efficace. En fait, elles convertissent environ 90 % de l'énergie de l'eau en électricité.

Le rendement des centrales hydroélectriques est plus important que tout autre type de production d'énergie électrique. A titre d'exemple, le rendement d'une centrale nucléaire est inférieur à 40%. Les centrales hydroélectriques produisent 20% de l'électricité mondiale et plus de 40% dans les pays les plus développés [8].

I.3.2.3. Avantages:

- "facile" à construire et à utiliser
- utilise une énergie renouvelable

I.3.2.4. Inconvénients:

- un peu dépendant des conditions météorologiques (problème lors des sécheresses).
- nécessite l'inondation de vallée (villages évacués) en amont.
- en cas de défaillance du barrage, les conséquences peuvent être graves en aval [8].

I.3.3. Centrale éolienne :

I.3.3.1. Historique :

Pendant l'antiquité les moulins à vent transformaient l'énergie éolienne en énergie mécanique. Mais aussi les moulins à eau se chargeaient de cette tâche. La première éolienne dit « industrielle » (qui pouvait produire de l'électricité) fut créée en 1890 par Charles BUSH. Cette technologie ne rencontra pas un grand succès, sûrement à cause du choc pétrolier des années 1970 [9].

I.3.3.2. Fonctionnement :

Une éolienne est constituée des éléments suivants (Figure I.6) :

- ✓ **Un mât**, d'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.

- ✓ **Une nacelle**, montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.
- ✓ **Un rotor**, guidant une hélice à 3 pales en matériaux composites d'une longueur de 30 à 45 mètres [3].

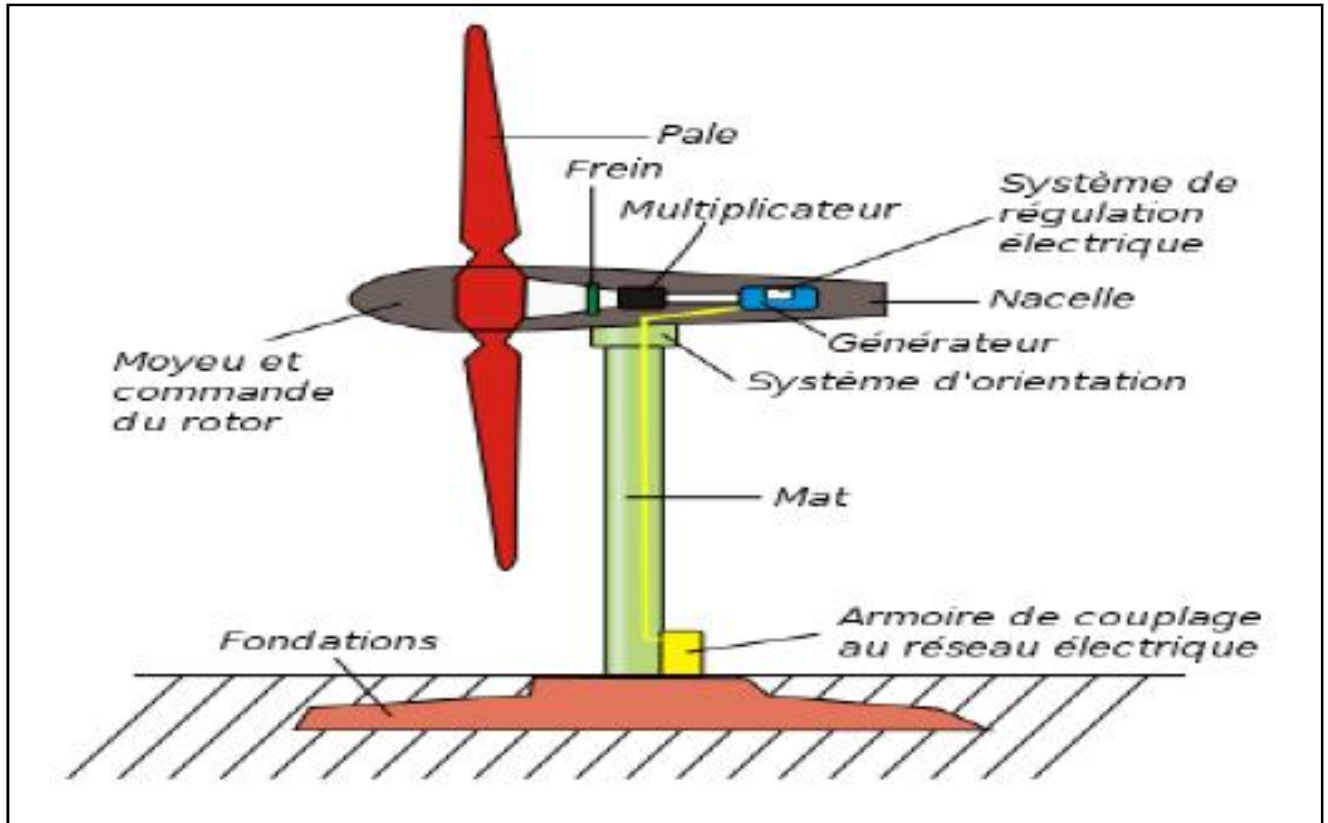


Figure I.6: les différents éléments d'une éolienne [9] .

I.3.3.3.Implantation d'une éolienne nécessite:

- Une étude d'implantation est nécessaire afin de localiser les zones suffisamment venteuses pour obtenir un rendement maximum.
- Le sol doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne.
- Dans une installation éolienne, il est préférable de placer la génératrice sur un mât à une hauteur de plus de 10 m jusqu'à environ 100 m, de façon à capter des vents plus forts. Dans les zones où le relief est très complexe, il est possible de doubler la quantité d'énergie produite en déplaçant l'installation de seulement quelques dizaines de mètres [9].

I.3.3.4.Avantages:

- Énergie Propre, pas de gaz à effet de serre.
- C'est l'énergie la moins chère de toutes les énergies renouvelables.
- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés [9].

I.3.3.6. Inconvénient:

- Elles tournent uniquement s'il y a du vent, donc elles sont dépendantes de la météo et aussi de la nature du sol.
- Impact sur le paysage.
- Elles produisent beaucoup de bruit (55 Décibels).
- Dangereux pour les oiseaux, la vitesse des pales peuvent les surprendre [9].

I.3.4. Les centrales solaires :

Rappelons que la plupart des grandes centrales électriques (nucléaire, à charbon etc.) fonctionne selon le même principe : l'énergie thermique produite par une combustion (pétrole, charbon...) ou par fission nucléaire permet de transformer l'eau en vapeur ou de faire monter des gaz à très haute température et donc, selon la loi des gaz parfaits, à très haute pression. La différence de pression permet alors d'actionner des turbines ou des pistons, ceux-là font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant. Le rendement final est d'autant plus élevé que la chaleur fournie au départ est à haute température. Un projet ambitieux qu'ont eu les européens est de créer une usine sur ce principe sans utiliser de carburant. Après tout, c'est grâce au soleil qu'il fait une température vivable sur terre. Alors pourquoi ne pas se servir directement de cette chaleur pour faire évaporer de l'eau et actionner des turbines, au lieu de brûler du fioul cher et de plus en plus rare ? Il a fallu attendre les années 70 et 80 avant la création des premières centrales solaires électriques expérimentales. Le principe est de concentrer les rayons solaires vers un unique point afin de créer de hautes températures et ainsi produire de l'électricité grâce à un système tel que décrit ci-dessus. Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

- Les collecteurs cylindro-paraboliques, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.
- Les centrales à tour, sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installée une chaudière.
- Les collecteurs paraboliques qui ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

Il existe également plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité [10].

I.3.4.1. Les Avantages :

Se résume, en ce qui suit :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.

- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication [10].

I.3.4.2. Les Inconvénients :

On peut citer :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation solaire n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.
- Les rendements des panneaux solaires sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs) [10].

I.3.5. Les Centrales Thermiques :

I.3.5.1. Définition :

La centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur (charbon, gaz, fioul, biomasse ou déchets municipaux). La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique contenue dans la vapeur en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de courant [11].

I.3.5.2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique :

Une centrale thermique (Figure I.7) fonctionne grâce à la combustion du gaz naturel, du charbon pulvérisé ou du fuel dans une chaudière à vapeur. La chaleur des gaz de fumées et des flammes sert à chauffer la tuyauterie de la chaudière et transforme progressivement l'eau qui y circule en vapeur.

Les gaz de fumées s'échappent par la cheminée. Dans les centrales à charbon, un électro filtre en retient d'abord les particules de poussière.

La vapeur fait tourner la turbine à vapeur, qui à son tour entraîne l'alternateur pour produire l'électricité. Le transformateur élève la tension du courant produit, avant qu'il ne soit injecté dans le réseau de transport.

Après son passage dans la turbine où elle libère son énergie, la vapeur se condense et retourne sous forme d'eau vers la chaudière. Dans le condenseur, la vapeur glisse sur des milliers de tubulures remplies d'eau froide pompée des eaux de surface (eau de refroidissement) et lui cède sa chaleur.

La plupart des centrales refroidissent cette eau devenue relativement chaude, dans une tour de refroidissement, pour ensuite la réutiliser. Dans ces immenses tours de refroidissement, en forme d'hyperbole, l'eau entre en contact avec un courant d'air ascendant créé par le tirage naturel (effet de cheminée de la tour de refroidissement). Lorsque des ventilateurs créent ce flux d'air, la tour de refroidissement est plus petite, l'eau se refroidit être tombe sous forme de gouttelettes dans la tour de refroidissement ; L'air réchauffé saturé de vapeur d'eau, s'échappe de la tour de refroidissement en un nuage de vapeur blanc. Une grande partie de l'eau de refroidissement refroidie est pompée vers le condenseur et réutilisée et seul (1-1,5) % s'évapore. Une centrale thermique transforme 35 à 40 % de l'énergie du combustible en électricité. Elle fournit parfois aussi de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau [11].

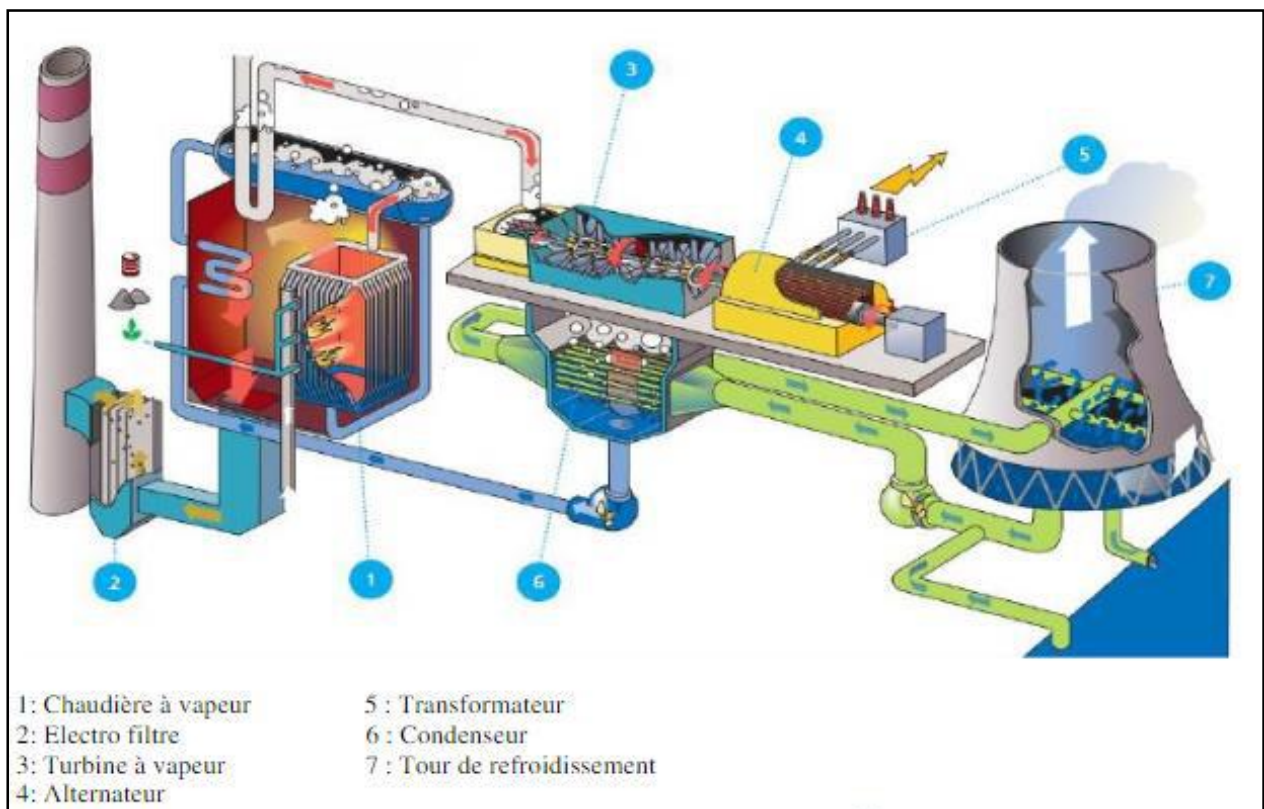


Figure I.7: Schéma d'une centrale thermique[11].

I.3.5.3. Description des principes organes d'une centrale thermique

I.3.5.3.1. Turbines à vapeur

A-Définition :

La turbine à vapeur est une combustion motrice thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de solide Clausius Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de l'eau. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant.

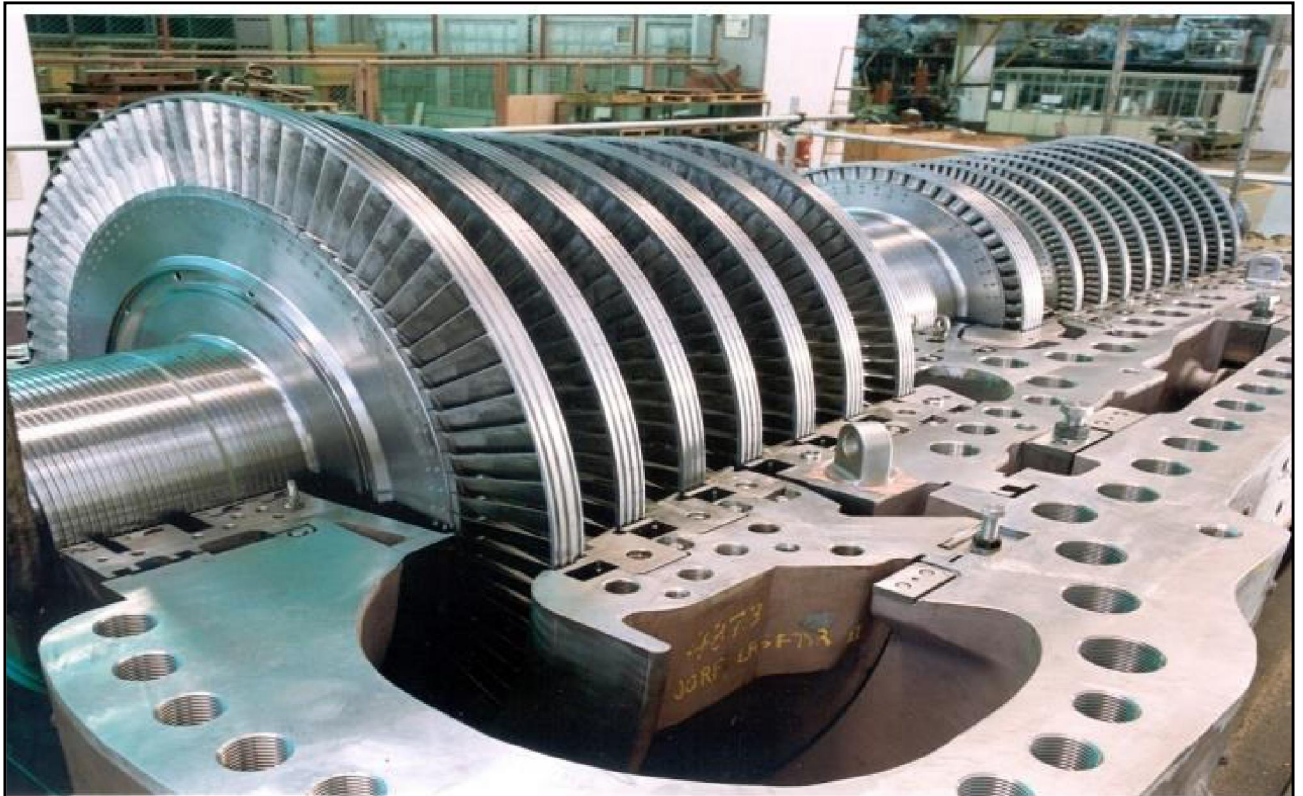


Figure I.8: Rotor d'une turbine à vapeur [12].

B-Principe d'une turbine à vapeur :

Le cycle thermodynamique de la turbine à vapeur comprend au moins les étapes suivantes :

- ✓ L'eau liquide est comprimée par une entraine pompe et envoyée vers la une chaudière.
- ✓ L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée qui dans la chaudière.
- ✓ La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique.
- ✓ La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide de partiel.
- ✓ L'eau utilisée nécessite un traitement pour éviter toute conséquence qui pourrait engendrée sa perturbation au niveau de la turbine tel que la corrosion et le bouchage des chaudières.

I.3.5.3.2.Turbine à gaz

A-Définition:

La turbine à gaz est une machine motrice à mouvement rotatif et à combustion interne elle puise et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertie cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

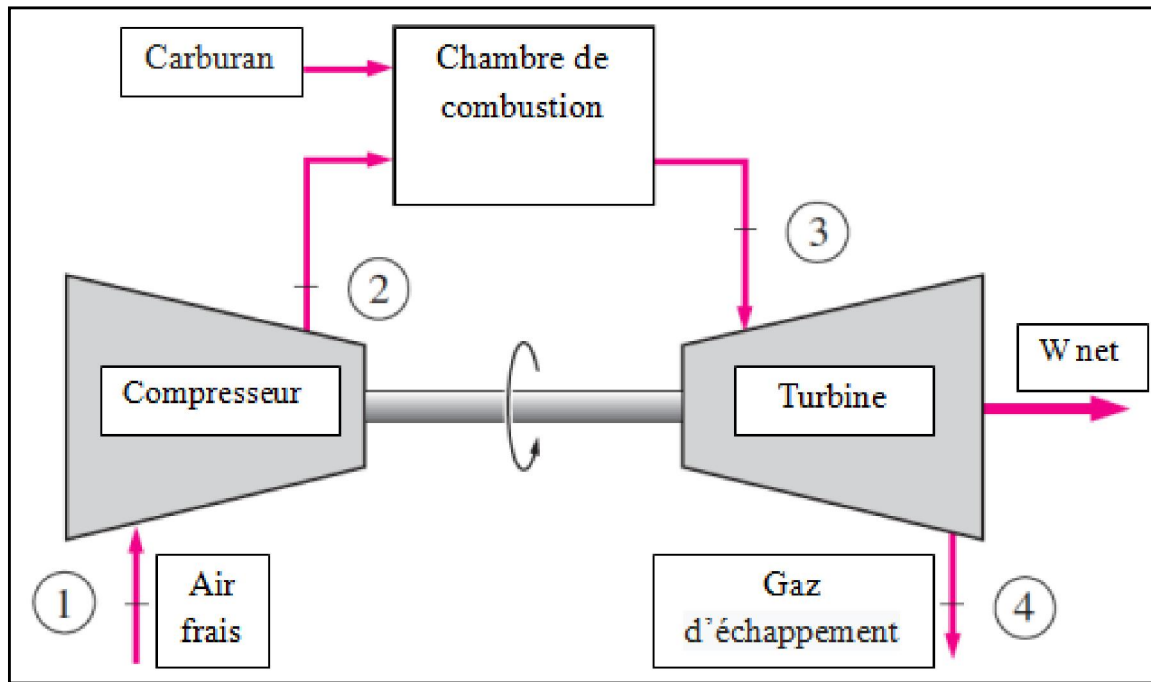


Figure 1.9: Composants d'une turbine à gaz simple.

Comparée aux autres moteurs thermiques, la turbine à gaz présente une double particularité, de même que la turbine à vapeur, la turbine à gaz est une machine à écoulement continu, donc ne comporte pas de variation périodique de l'état de fluide. La turbine à gaz (au sens large du terme), est le siège de l'ensemble de transformation constituant le cycle thermodynamique réalisé par le fluide.

B-Historique des turbines à gaz:

Parmi les précurseurs de la turbine à gaz moderne, on doit mentionner les inventeurs des moteurs thermiques fonctionnant avec un gaz permanent (plus précisément avec l'air chaud), bien que ces moteurs aient été conçus d'après le principe des machines à vapeur à piston. Ces inventions ont, en effet, permis de déterminer les différentes transformations qui doivent être subies par un gaz permanent servant de fluide moteur, à l'instar du cycle thermodynamique de la turbine à gaz dont certains cycles porte encore les noms de leurs inventeurs à savoir cycle de Joule, cycle d'Ericsson.

Les progrès réalisés sur le plan métallurgique, en plus des résultats favorables des recherches approfondies sur la combustion, ont permis des améliorations rapides des performances de ces machines, en terme de puissance, de rendement et de longévité.

On peut distinguer trois générations, basées sur les intervalles de la température maximale En (°C) des gaz à l'entrée de la première roue de turbine :

- 1^{ère} génération : $760 < T_{max} < 950$
- 2^{ème} génération : $955 < T_{max} < 1124$
- 3^{ème} génération : $1149 < T_{max} < 1288$

La température entrée turbine est un paramètre déterminant dans l'amélioration des performances d'une turbine à gaz. L'augmentation des limites de ce paramètre a eu comme effet une augmentation du rendement thermodynamique, qui est passé des valeurs inférieures à 20 % dans les premières machines, à des valeurs courantes supérieures à 40 % (turbine LM6000). [13]

I.3.5.3.3.Chaudière:

A-Introduction:

La chaudière (Figure I.10) est un générateur de chaleur produisant généralement de l'eau chaude pour le chauffage. Ce n'est pas la seule utilisation d'une chaudière qui peut produire de la vapeur, le plus souvent pour des applications industrielles. Une chaudière comporte un corps de chauffe avec un circuit d'eau intégré qui récupère la chaleur produite par un brûleur utilisant un combustible gaz, fioul, bois ... Elle présente de par son combustible, un rendement de combustion. Selon son dimensionnement et les différents appels de puissance, elle génèrera un rendement de production.

Dire d'une chaudière qu'elle est une chaudière à gaz, ou une chaudière au fioul ou une chaudière à bois pourra présenter différents rendements selon les applications qu'elle sert. D'où la notion d'économies d'énergie et d'efficacité énergétique de la dite chaudière.

L'efficacité des chaudières est désormais réelle. Nous trouvons les meilleurs rendements avec les chaudières à condensation. La chaleur latente des fumées est ainsi récupérée sur le retour d'eau chaude de chauffage. Les fumées sortent plus froides et la chaleur est transférée au circuit de chauffage [14].



Figure 1.10 : Chaudière industrielle [14].

B- Principe de fonctionnement d'une chaudière:

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la chaleur.
- Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y a pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".
- Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur, qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.

Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne [14].

I.3.5.3.4. Condenseur :

A-Introduction :

Il est de coutume de désigner par condenseur un appareil dont la fonction est de condenser de la vapeur, le réchauffage obligatoire du fluide froid auxiliaire n'étant qu'une conséquence (parfois nuisible). Par opposition aux échangeurs de chaleur (réchauffeurs) où la condensation de vapeur n'est qu'un moyen d'obtenir le but désiré : le réchauffage d'un certain fluide [15].

B- Classification des condenseurs :

Nous pouvons classer les condenseurs en deux grandes familles :

- Les condenseurs par surface, sans contact entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant, une surface d'échange s'interposant entre eux.
- Le condenseur par mélange avec, comme leur nom l'indique, mélange totale entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant.

Ces derniers restent très peu utilisés du fait de l'impossibilité de mélange entre la vapeur et l'eau de refroidissement, en générale de l'eau brute [15].

C-Principe de fonctionnement :

Les condenseurs sont souvent des échangeurs de chaleur à calandre et faisceau tubulaire. La condensation se fait presque systématiquement dans la calandre. On utilise généralement des tubes d'un centimètre de diamètre et de longueur comprise entre 2 et 6 mètres, avec un pas triangulaire ou un pas carré. Un des critères pour ces choix est souvent la perte de charge, surtout pour des appareils travaillant à pression réduite.

Dans le cas d'une pompe à chaleur, le fluide frigorigène, après avoir emmagasiné de la chaleur et s'être évaporé dans l'évaporateur, circule dans un circuit fermé. Ensuite, il passe à proximité d'une source plus fraîche (air, sol ou eau) et ainsi se condense pour refaire un cycle.

Cet échangeur de chaleur permet la condensation du fluide frigorigène. Ce phénomène exothermique permet de restituer de la chaleur au médium (eau, air...), donc de le réchauffer. C'est par exemple le cas dans une chaudière à condensation [16].

I.4. Consommation d'énergie primaire dans le monde

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a plus que doublé en quarante ans (de 1973 à 2013). En 2009, à la suite de la crise de 2008, elle n'avait augmenté que de 1 %. La consommation énergétique mondiale (énergie primaire) était en 2012, selon l'Agence internationale de l'énergie de 13,37 milliards de tep (6,1 en 1973), pour une production énergétique mondiale de 13,5 milliards de tep (6,2 en 1973). 81,7 % de cette production provenait de la combustion d'énergies fossiles. Le reste de la production d'énergie provenait du nucléaire (4,8 %) et des énergies renouvelables (13,5 %) : bois énergie, énergie hydraulique, éolien, solaire, agro-carburants, Cette statistique (Figure I.11) sous-évalue la part des énergies renouvelables électriques (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque). [17]

Remarque : On utilise le Joule ou la tonne d'équivalent pétrole (tep) pour comparer des formes d'énergie différentes.

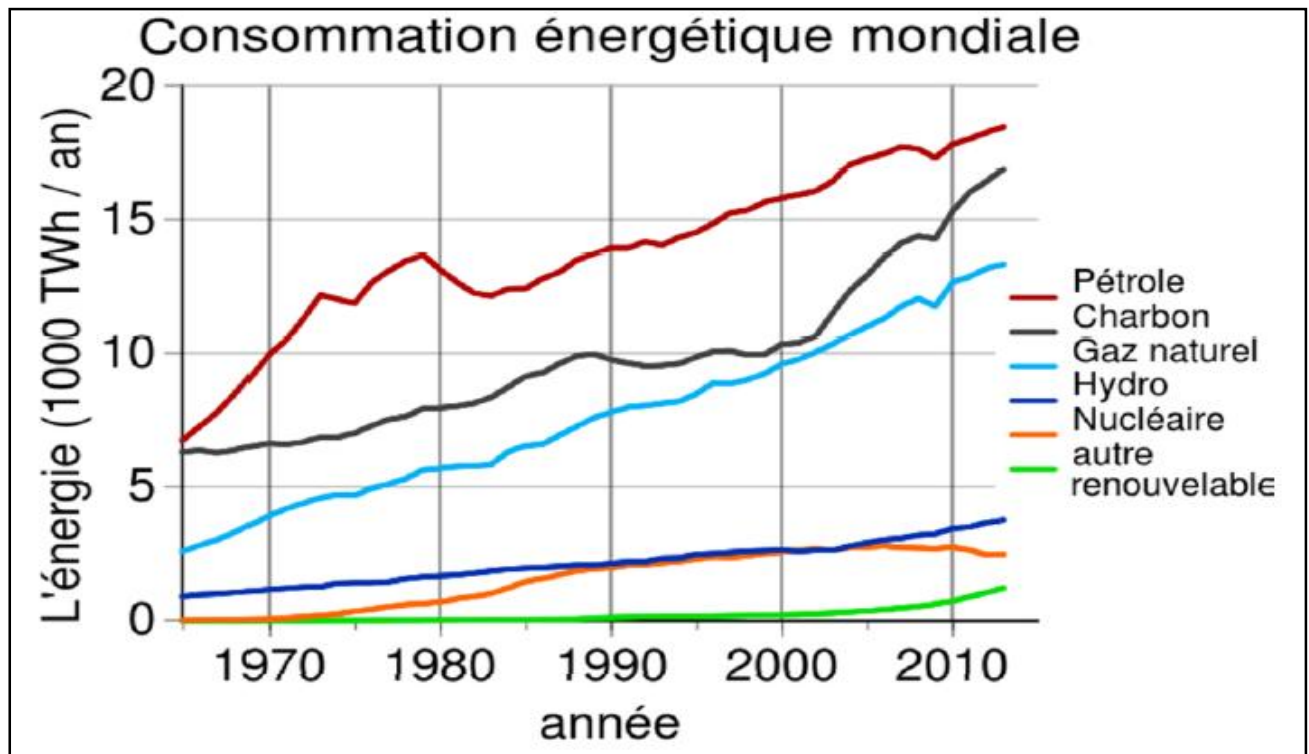


Figure I.11: Consommation énergétique mondiale, en térawatts-heures (TWh), de 1965 à 2013 (Pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autre et renouvelable.)[17]

Remarque : Pour produire 100KWh, il faut :

- 350 Kg de charbons
- 250 L de fuel
- 300 m³ de gaz
- 4 g d'uranium enrichi

Chaque type d'énergie possède son unité privilégiée, et c'est pour les agréger ou les comparer que l'on utilise les **unités de base** que sont le Joule et le Mtep ou parfois le kWh, toute énergie primaire étant assez souvent convertie en électricité.

- Pétrole : tonne d'équivalent pétrole (tep)
- Gaz naturel : mètre cube, pied cube ou British thermal unit (btu)
- Charbon : tonne équivalent charbon (tec)

I.4.1. Les pays consommateurs d'électricité

Nom de pays	Electricité - Consommation (milliards kWh)	Année
Chine	5,322	2014
États-Unis	3,886	2014
Russie	1,038	2014
Japon	860	2014
Inde	699	2014
Allemagne	583	2014
Canada	500	2014
France	463	2014
Brésil	456	2014
Corée du Sud	450	2014
Royaume-Uni	323	2014

Tableau I.1: Les 11 pays les plus consommateur d'électricité en 2014 [18].

La chine est le principale pays consommateur d'énergie électrique dans le monde 5.322 milliards KWh (chiffre de CIA World Factbook,2014), elle a été multipliée par 3,3 entre 2001et 2014, cela revient sans doute a sa croissance en flèche dans l'industrie, défiante tout géants de l'industries qui détient le marché mondial comme les USA et l'union européen (Tableau I.1).[18]

Remarque : L'Algérie est classée 58ème consommateur mondial avec 34 milliards KWh devant le Danemark, Irlande, le Maroc et le Qatar avec 21milliards KWh

I.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné une aperçue sur les différents modèles de production de l'énergie. Il s'avère qu'aujourd'hui et pour les cinquante années à venir, la gamme des sources d'énergie que nous pourrons utiliser restera conventionnelle. Actuellement, la consommation mondiale d'énergie requiert les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) à hauteur de 81.7%, l'énergie hydraulique 2.3%, le nucléaire pour 5.3% et enfin les énergies renouvelable pour 10.9%.

La production d'électricité s'appuie actuellement sur l'énergie thermique, cela revient à la maîtrise de cette technologie par rapport aux autres types de centrale de production comme le nucléaire ou les énergies renouvelables.

Chapitre II
Présentation et Modélisation
du TAG

Introduction:

Dans ce chapitre, nous avons discuté de deux cas:

Dans la première partie, nous avons abordé le principe de fonctionnement des turbines à gaz et ses types les plus importants, en plus des différentes classifications et de l'impact de l'environnement sur l'exploitation de la TG et la connaissance de ses domaines d'exploitation.

Dans la deuxième partie: Les turbines à GAZ sont l'une des principales sources de production d'électricité dans les pays dotés de ressources en gaz naturel et sont installés dans de nombreux endroits dans le monde en raison de leur caractéristique. Les besoins d'un analyste de réseau électrique pour une représentation mathématique des turbines à gaz dans les études dynamiques ont donné lieu à plusieurs publications dans ce domaine [23]–[25]. Un des plus modèles simplifiés couramment utilisés a été présenté par Rowen [23] en tenant compte de la fréquence de charge et de la température contrôle ainsi que les réponses thermodynamiques de la turbine en tant que fonction linéaire et effets d'aube de guidage d'entrée dans un travail séparé [24]. Plusieurs modèles avec différents degrés de simplification pour la représentation des turbines à gaz dans les études dynamiques ont été introduit, parmi lesquels le modèle IEEE pour cycle combiné les centrales électriques avaient une vision plus approfondie des processus internes [25]. Une bonne revue de ces modèles est donnée dans [26]. D'un point de vue pédagogique, il existe d'excellents livres sur les études dynamiques et les performances des turbines à gaz, mais peu des travaux ont été effectués sur le modèle et son extraction de paramètres à des fins éducatives [27] – [29]. Sur la base de l'expérience des auteurs, alors que de nombreux étudiants en génie électrique sont désireux d'effectuer des études dynamiques, ils sont confus lorsqu'ils sont confrontés à un unité de puissance réelle sans modèle préparé. L'œuvre originale de Rowen [23] n'inclut pas l'estimation des paramètres et les détails de le comportement physique de chaque bloc. Par conséquent, semblable à un précédent travail [30].

Comme un cas d'étude, les paramètres du modèle de Rowen sont approximés pour une unité de puissance à cycle simple et à arbre unique de 100 MW en utilisant données de fonctionnement de la turbine à gaz. Généralement, la turbine à gaz modèle est plus compliqué que le modèle de turbine à vapeur et a donc besoin de plus de fonctionnalités à étudier. Cela se fait dans quatre différentes catégories : la turbine à gaz elle-même, valves (les vannes) et fuel system (le système de carburant), la dynamique et les retards des turbines et les mesures de température. L'article est organisé de la manière suivante. Après cette introduction, dans Section II principaux composants d'une turbine à gaz à usage intensif et son cycle thermodynamique sont brièvement décrits. La section III résume le modèle de la turbine à gaz pour les études dynamiques et la procédure pour dériver les paramètres à partir des données disponibles.

II. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT:

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz (aussi appelée turbine à combustion) est composée de trois éléments:

- **un compresseur**, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ.
- **une chambre de combustion**, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement.
- **une turbine**, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

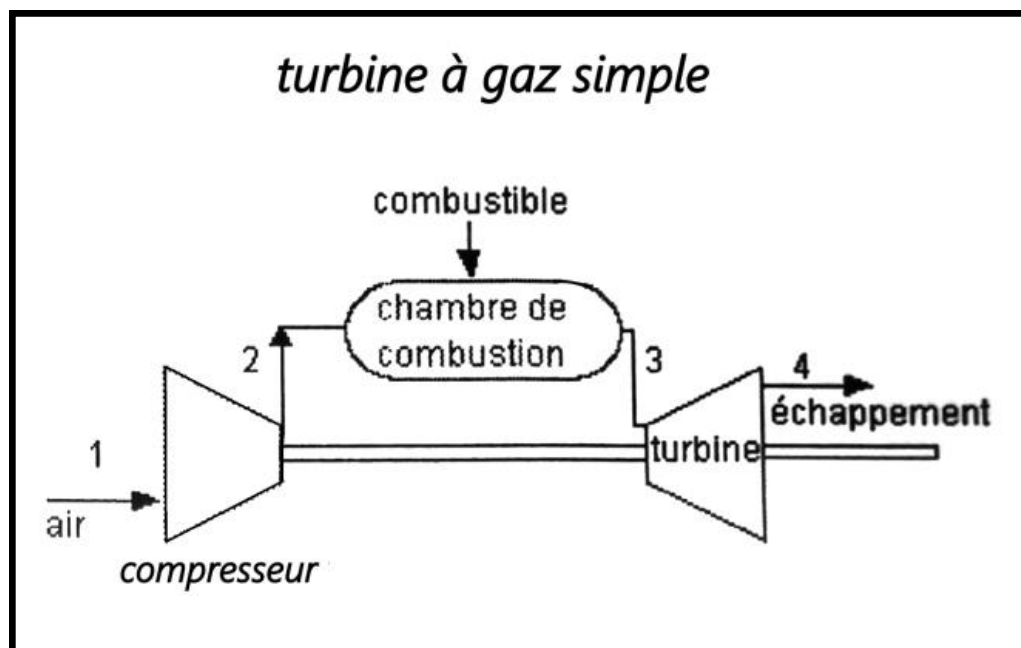


Figure II.1.turbine à gaz simple

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers comme le fioul domestique). Il existe aussi des turbines à gaz à cycle fermé, utilisées pour des applications particulières. Bien évidemment, il s'agit alors de moteurs à combustion externe. [19]

Pour atteindre des taux de compression r de 20 ou 30, **le compresseur** est multi étagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé. Les rotors axiaux sont constitués d'un empilage de disques, soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie. Les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour

les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C. [19]

La chambre de combustion est normalement construite en alliage réfractaire. Divers types seront présentés plus loin.

Dans les turbines à gaz à cycle ouvert, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de **la turbine da détente**, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température.

Les pièces les plus exposées sont en particulier les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir et, de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe d'one d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages. [19]

Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et on envisage de recourir à des céramiques dans l'avenir.

Comme le rendement du cycle est lui-même une fonction croissante de la température, d'importants développements technologiques ont été consacrés à la mise au point, d'une part de systèmes de refroidissement efficaces des aubages, et d'autre part de matériaux résistant aux températures élevées. Depuis un demi-siècle, on a ainsi pu relever progressivement (d'environ 20 °C par an) le niveau de température d'entrée dans la turbine, pour atteindre aujourd'hui 1300 à 1500 °C. [19]

Deux grandes catégories de turbines à gaz sont généralement distinguées les turbines à gaz industrielles :

Lourdes et robustes, mais de performances moyennes (rendement η entre 28 et 38 %), et les turbines à gaz "dérivées de l'aviation" ou "aérodérivées", beaucoup plus légères et performantes (η entre 35 et 42 %), mais aussi plus chères. Les puissances des premières vont de quel qu'es dizaines de kW (micro-turbines) à quelques centaines de MW, alors que celles des machines aérodérivées sont généralement comprises entre quelques centaines de kW et quelques dizaines de MW, correspondant à celles des moteurs aéronautiques. Le marché de l'aviation a ainsi permis de financer d'importants programmes de développement technologique sur ces moteurs, qui ont abouti à la mise au point de turbines à gaz extrêmement performantes, susceptibles de supplanter les turbines à gaz industrielles, ou de permettre la conception de turbines composées, de rendements améliorés et à faible coût, comprenant des composants de turboréacteurs existants pour les sections haute pression du compresseur et de la turbine, et des pièces industrielles pour les sections basse pression. [19]

Les premières turbines à gaz ont été fabriquées au début du XX^e siècle, en France par la Société Anonyme des Turbomoteurs à Paris, et en Suisse par la Société Brown Boveri à Neuchâtel. Le travail net produit par ces machines est égal à la différence entre le travail utile fourni par la turbine et le travail nécessaire pour comprimer l'air.

Dans les premières réalisations, il était très faible, et ce n'est qu'à partir des années 30 que les applications industrielles ont vraiment commencé à se développer, grâce à l'amélioration des performances des compresseurs et des turbines, essentiellement due aux progrès réalisés dans la compréhension des écoulements gazeux, qui se poursuivent encore aujourd'hui grâce à la modélisation 3D. [19]

Depuis une quinzaine d'années, les turbines à gaz connaissent un très fort développement dans de nombreuses applications : transport aérien, production d'électricité, cogénération, entraînement de machines (compresseurs et pompes), propulsion maritime, où elles font une percée croissante. Comme arguments en leur faveur, mentionnons leur faible encombrement, leur excellent rapport puissance / poids, leur bon rendement, et leurs faibles émissions de polluants. [19]

Parmi les autres avantages que présentent les turbines à gaz, il faut citer:

- leur mise en route est très rapide : alors qu'il faut jusqu'à 24 h pour démarrer certaines centrales à vapeur, une turbine à gaz atteint son régime nominal en 15 à 20 mn, et la puissance peut être modulée très rapidement entre la pleine charge et 20 à 30 % de cette valeur. [19]
- les équipements auxiliaires sont petits et bon marché, et il n'y a pas besoin d'eau pour refroidir le cycle, puisque les gaz d'échappement sont rejetés dans l'atmosphère, De plus, les délais de construction sur site sont réduits, du fait que la machine est assemblée en usine. [19]

Les coûts d'investissement s'échelonnent de 350 Euros/kW pour des machines de 1 à 10 MW à environ 180 Euros/kW pour des unités de taille supérieure à 50 MW. Le prix du kW installé est cependant supérieur compte tenu des équipements annexes et de l'infrastructure. Pour la production d'électricité, il varie entre 300 et 450 Euros/kW. [19]

Leur inconvénient principal est d'utiliser des combustibles propres d'one généralement coûteux. Il faut aussi noter que leurs performances dépendent sensiblement des conditions du site, et se dégradent lorsque la température extérieure augmente ou lorsque la pression baisse. [19]

II .1.EXEMPLES DE TURBINES À GAZ

II.1.1.Turbines à gaz industrielles

La turbine à gaz Siemens de la figure II.2 se caractérise par des chambres de combustion type silo (multi-combustible, contrôle des émissions, protection radiative des aubages de turbine). [19]

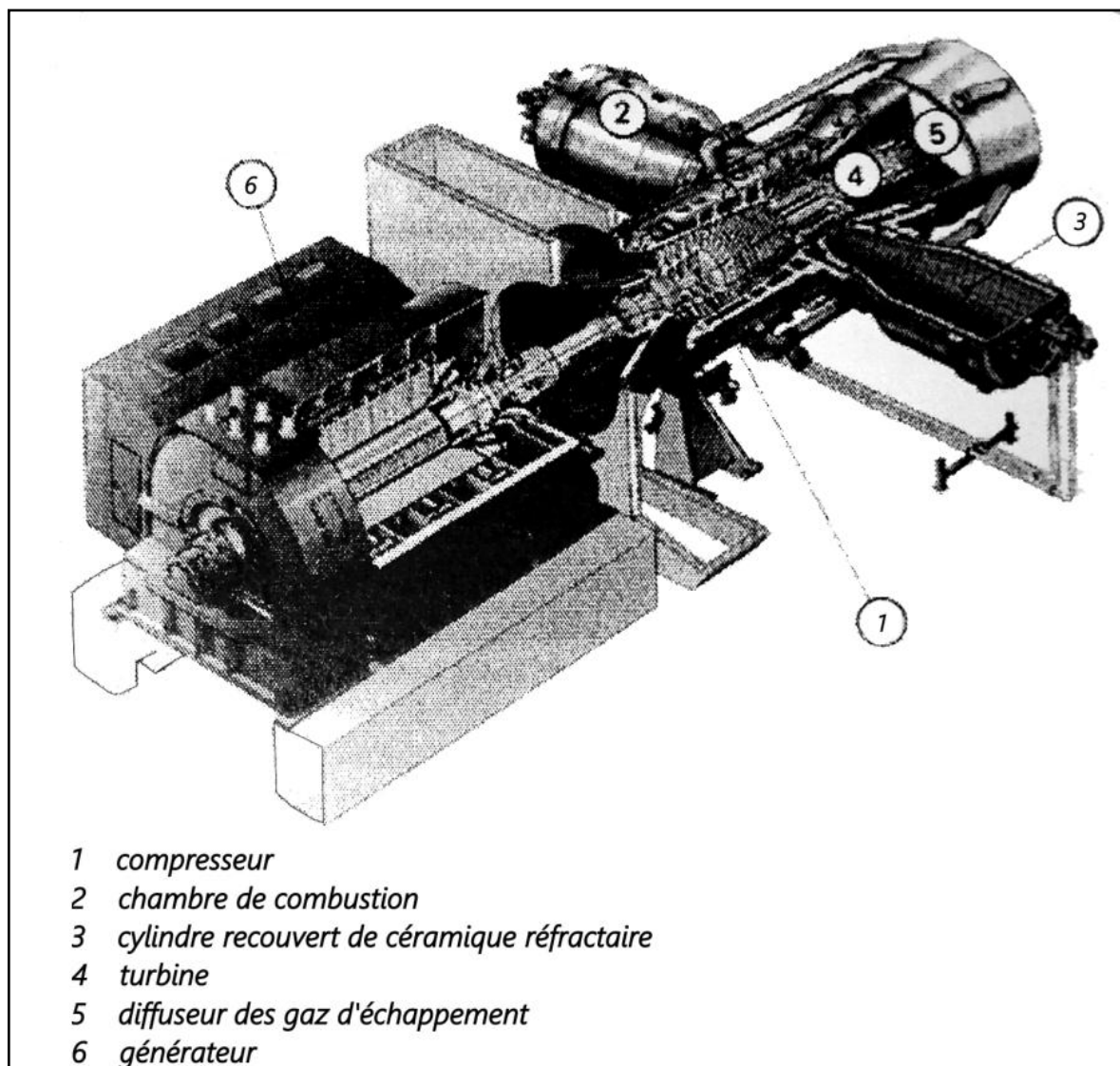


Figure II.2 Extrait de techniques de l'Ingénieur. Génie Energétique

II.1.2. Turbines à gaz dérivées de l'aviation

La turbine Rolls Royce SMIC (figure II.3) à deux arbres (propulsion maritime) a une puissance de 20 MW, un rapport de compression $r = 22$ (5 + 11 étages de compression, 2 + 2 de détente). Sa température d'entrée turbine est 740 °C. [19]

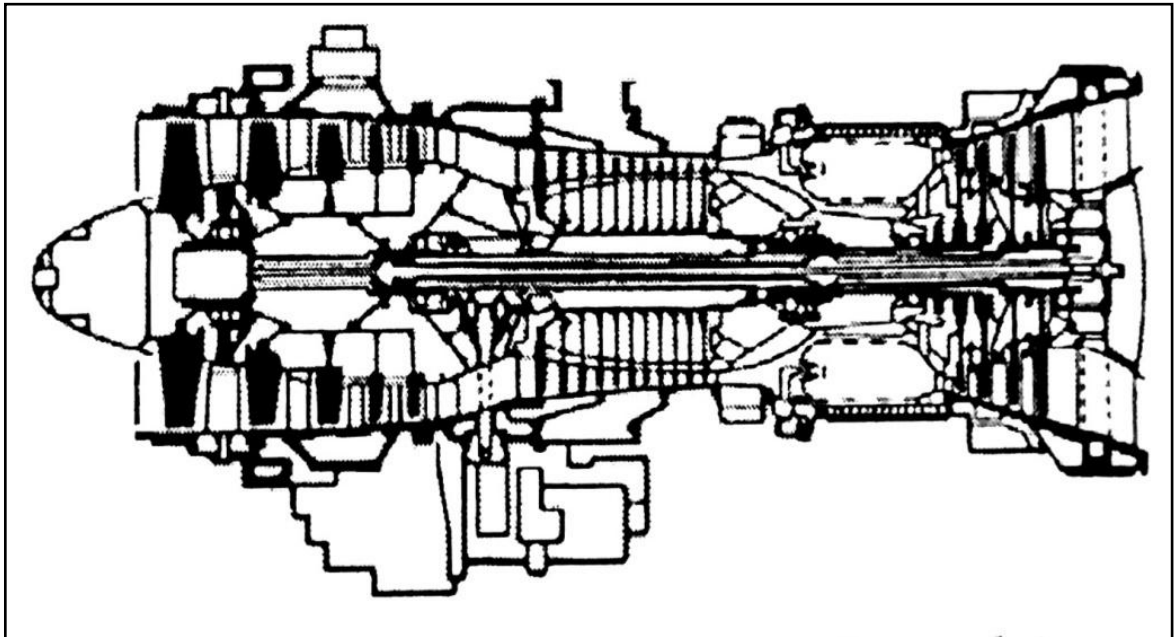


Figure II.3 Rolls Royce SM1C. reproduit avec l'aimable autorisation de Rolls-Royce plc

La turbine à gaz Alstom Power GT24/26 de la figure II.4 correspond à une nouvelle génération de turbine aérodérivée, en ce sens que, bien que développée selon des techniques aéronautiques, il n'y a pas de turboréacteur équivalent, compte-tenu de sa puissance élevée (180/260 MW) et de son mode de combustion (séquentielle). Ses caractéristiques sont les suivantes: $r = 30$ (22 étages de compression, 1+4 de détente), température d'entrée 1255 °C figure II.4: Alstom Power GT24/26 turbine ; $\eta = 37,5 \%$ [19]. La GT 24 a une vitesse de rotation de 3600 tr/mn pour fournir du courant électrique à 60 Hz, tandis que la GT 26 tourne à 3000 tr/mn (50 Hz). Conçues à contrainte mécanique équivalente dans les aubages, leurs puissances sont respectivement de 180 et 260 MW, et leurs masses (avec leurs bases) de 225 et 370 t environ. [19]

Les figures II.4 et II.5 présentées dans le chapitre introductif permettent de se faire une idée des dimensions approximatives d'une centrale électrique basée sur cette turbine : une embase de 50 m sur 70 m et une hauteur de 25m. [19]

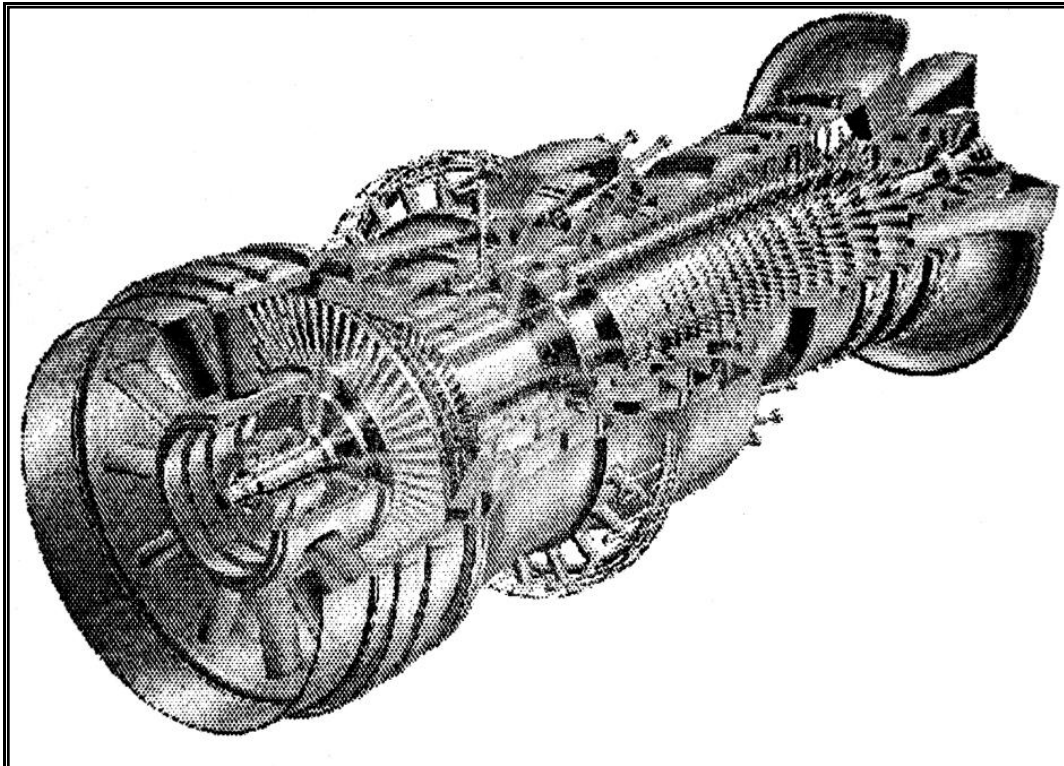


Figure II.4 Alstom power GT24/26

II.2. PRINCIPALES CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES

II.2.1 Chambre de combustion

La chambre de combustion d'une turbine à gaz, notamment dérivée de l'aviation, doit satisfaire des contraintes sévères :

- assurer une combustion complète du combustible.
- réduire les émissions de polluants.
- minimiser la perte de charge (qui représente un surcroît de compression).
- assurer une bonne stabilité de la température d'entrée turbine.
- occuper un volume aussi réduit que possible tout en permettant un bon refroidissement des parois.

Le schéma de la figure II.5 représente la coupe d'une chambre de combustion du type tube de flamme, très communément rencontrée en pratique [19].

Dans la partie gauche, arrive l'air comprimé qui sort du compresseur. Il se scinde en deux courants, l'un qui assure le refroidissement des parois, l'autre qui pénètre directement dans la chambre de combustion, où il sert de comburant au combustible injecté en partie centrale. Compte tenu du faible excès d'air local, la flamme atteint une haute température (jusqu'à 2500 K) dans la zone primaire. Par des trous disposés à la périphérie des tubes de flamme, l'air extérieur revient se

mélanger aux gaz brûlés dans la zone transitoire, où la température redescend autour de 2000 K, puis dans la zone de dilution, où l'on cherche à réaliser un flux de gaz de température aussi stable que possible pour éviter les risques de surchauffe locale ou momentanée. [19]

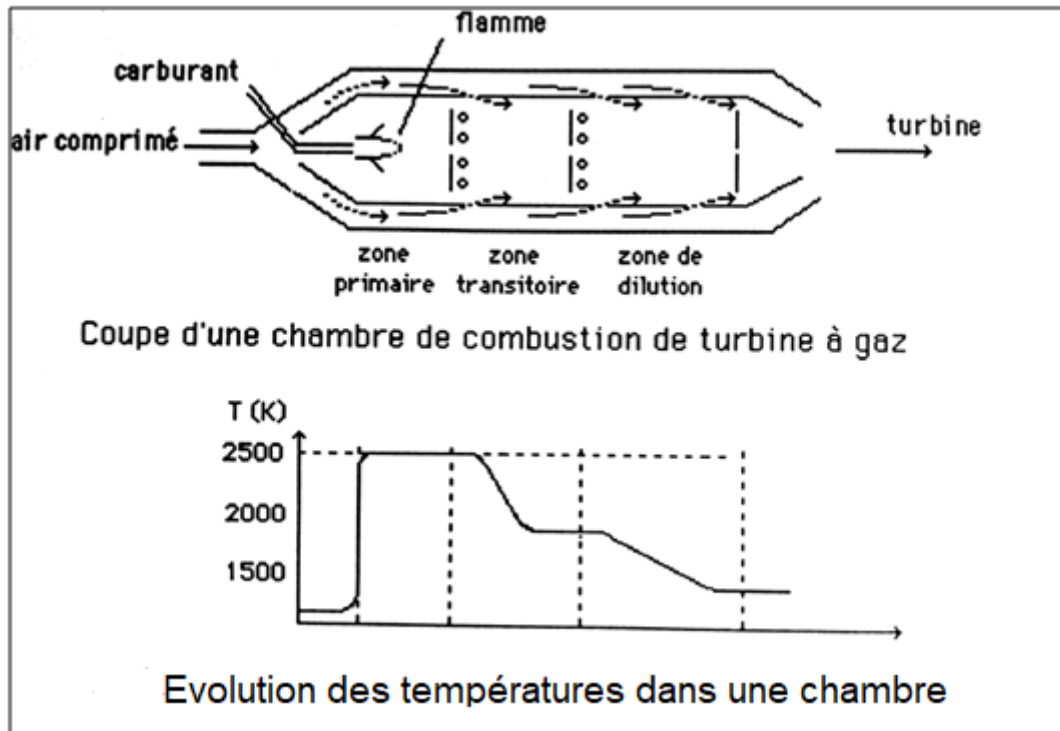


Figure II.5. Chambre de combustion

II.3. Classification des turbines à gaz

Il existe plusieurs façons de classer les turbines à gaz ;

II.3.1 Par mode de construction

II.3.1.a. La turbine à gaz mono-arbre

Le domaine d'utilisation d'une turbine à gaz est un moyen de choisir le type de machines adéquates. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono arbre; elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité).

Dans ce type, le compresseur et la turbine sont liés par simple rotor, ou l'énergie absorbée par la compression est détendue dans la section turbine pour la production de l'énergie utile.

Le système compresseur, turbine et charge forme un seul élément. Une application opérationnelle typique des turbines à un seul arbre concerne l'entraînement d'alternateur. Etant donné que dans cette application il est nécessaire de régler la puissance à une vitesse constante (fréquence réseau). Ici une turbine à gaz à un seul arbre répond exactement à cet objectif par ce sa vitesse et donc au point de rendement maximum.[20]

II.3.1.b. La turbine à gaz bi-arbres

Dans le cas des turbines à deux arbres, seulement une partie de la section de la turbine appelée « turbine haute pression » est raccordée mécaniquement au compresseur pour former le « générateur de gaz », alors que l'énergie résultant de la combustion est aussi traitée par une 2ème section de la turbine appelée « turbine à basse pression » séparée mécaniquement de la première, qui est raccordée à la charge par un accouplement.

II.3.2. Par mode de travail

II.3.2.a. Turbines avec étage à action et à réaction

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

- ✓ **Etage à action** : la chute totale de pression se produit dans les aubes immobiles, la pression du fluide demeure constante lorsqu'il circule dans le canal inter aube, et l'enthalpie augmente grâce à l'irréversibilité de l'écoulement. Donc toute l'énergie potentielle disponible est transformée en énergie cinétique avant la roue.
- ✓ **Etage à réaction** : une partie seulement de la détente s'effectue dans les aubes fixes avant d'entrer au canal inter aube.

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

II.4.fonctionnement Par mode de thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamique :

- a. Turbine à gaz à cycle fermé** : dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.
- b. Turbine à gaz à cycle ouvert** : C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes ; simple et régénéré.

- ❖ **Turbine à cycle simple** : C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique qui est perdu dans l'atmosphère à travers l'échappement.
- ❖ **Turbine à cycle régénéré** : C'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.[20]

II.5. Technologie des turbines à gaz:

Les particularités technologiques de la turbine à gaz sont essentiellement liées aux très hautes températures atteintes au niveau des turbines de détente (de 800 à plus de 1300°C selon les types). Cela pose des problèmes de tenue au fluage, à la fatigue, à la corrosion des aubages en particulier. Un éventuel filtrage insuffisant de l'air aspiré par le compresseur ajouterait de l'érosion comme contrainte supplémentaire.

Les turbines à gaz sont caractérisées par la haute qualité des matériaux utilisés, ils présentent l'avantage d'être des matériaux réfractaires à base de nickel ou cobalt additionné de chrome. Les ailettes obtenues par coulage à solidification orientée ou à coulage monocristal. Cela constitue une partie des solutions apportées pour y remédier aux éventuelles anomalies qui peuvent être générées par la contrainte thermique due à la température élevée des gaz à l'entrée turbine. Une autre solution consiste à faire dévier une partie du débit d'air (10 à 15%) sortant du compresseur (qui est à température largement inférieure à celle entrée turbine) pour refroidir les ailettes par l'intérieur et pour obtenir un mince film d'air « frais » entre l'ailettes et les gaz chauds de façon à limiter autour de 800°C la température des gaz atteignant la turbine haute pression.

II.6. Interactions entre la TG et l'environnement:

L'exploitation d'une turbine à gaz est sensiblement influencée par les conditions régnant dans l'environnement du lieu d'implantation. Inversement, la turbine à gaz peut influencer sensiblement l'état de l'environnement. Ces réalités conduisent à considérer deux problèmes bien distincts.

II.7. Influence de l'environnement sur l'exploitation de la TG:

Le milieu de travail de la TG est constitué de l'air ambiant.
L'exploitation de la TG est considérablement influencée par la pression et la température ainsi que par la teneur en impuretés de l'air ambiant.

❖ Pour un état de température ambiante donnée, la puissance utile de la TG est proportionnelle à la pression de l'air ambiant. Pour cet état de température est déterminé par la température de l'air d'aspiration, la température de à l'entrée de la turbine à gaz et la température des gaz à l'échappement de la turbine pour un nombre de tours donné de la TG. La consommation spécifique

de chaleur est indépendante de la pression de l'air ambiant.

❖ Pour des valeurs constantes de la pression de l'air ambiant et du nombre de tours de la TG, la puissance utile dépend de la température de l'air ambiant. La puissance utile diminue avec l'augmentation de la température de l'air ambiant et inversement. Comme ordre de grandeur on peut dire que 1,5°C d'augmentation de température entraîne une diminution de la puissance de 1% et inversement. Pour pallier à ces inconvénients, un système de régulation de la turbine à gaz assure que la température à l'entrée de la turbine soit pratiquement constante, indépendamment des modifications de la température de l'air ambiant.

❖ La consommation spécifique de chaleur dépend également de la température de l'air ambiant pour un nombre de tours constant de la turbine. La consommation spécifique de chaleur augmente avec l'accroissement de la température de l'air ambiant et inversement. Comme ordre de grandeur, on peut admettre que 4°C d'augmentation de température de l'air ambiant provoquent une augmentation de 1% de la consommation spécifique de chaleur et inversement. Ici également c'est le système de régulation de la turbine à gaz qui assure une valeur constante de la température à l'entrée de la turbine.

❖ L'air aspiré peut contenir des corps étrangers.

- La poussière :

La poussière peut former des dépôts et conduire à des phénomènes de corrosions après transformation dans les chambres de combustion. De plus, elle peut produire de l'érosion sur les aubes du compresseur et de la turbine.

- Les brouillards salins :

Les brouillards salins peuvent causer une corrosion des aubes du compresseur. Dans les chambres de combustion, ces vapeurs se combinent à du soufre pour donner du sulfate de sodium Na_2SO_4 , substance très corrosive qui se dépose sous forme liquide sur les surfaces de la turbine léchées par les gaz chauds.

❖ Les gaz nuisibles

Les gaz nuisibles les plus fréquents soit le dioxyde de soufre SO_2 ainsi que l'acide sulfurique H_2S . Même en utilisant des combustibles pratiquement exempts de soufre, les deux provoquent la formation de Na_2SO_4 , dans la mesure où le sodium est disponible. Suite aux remarques citées précédemment, on en déduit qu'une filtration efficace de l'air de travail aspiré est très importante et que l'installation de filtration doit être soigneusement adaptée aux conditions locales du lieu d'implantation de la turbine à gaz. Malgré des systèmes de filtration adaptés il faut procéder à un nettoyage du compresseur de temps à autre.

II.8.Effets de l'exploitation de la TG sur l'environnement

L'exploitation de la turbine à gaz nécessite toujours la prise de certaines dispositions afin de réduire des effets négatifs sur l'environnement provoqués par l'émission de la chaleur, par des substances nuisibles résultant de la combustion et par le bruit, ceci naturellement dans la mesure du possible.

❖ Les émissions de chaleur

Les émissions de chaleur de la turbine à gaz correspondent, dans le cas le plus défavorable, à un flux calorifique de gaz d'échappement qui fait sortir de la cheminée d'échappement environ 70 % de la chaleur disponible sous forme chimique dans le carburant. 2 % supplémentaires sont transmis à l'air ambiant sous forme de pertes calorifiques générales. Par la récupération de la chaleur du gaz d'échappement, il est possible de réduire ces émissions de chaleur de manière à libérer moins de chaleur dans l'environnement en utilisant moins de carburant tout en maintenant la puissance utile constante, ou alors en atteignant une puissance utile plus élevée tout en maintenant tout en maintenant la quantité de carburant utilisée.

❖ Substances nocives résultant de la combustion

Il s'agit du dioxyde de soufre SO_2 , d'oxydes nitriques NO_x et pour les combustibles liquides, d'hydrocarbures imbrûlés fétides. Dans des conditions de combustion optimales dans les chambres de combustion de la turbine à gaz, la quantité des substances nuisibles rapportée au débit massique des gaz d'échappement est si faible qu'une cheminée d'une hauteur suffisante permet une répartition parfaitement admissible de ces substances dans l'atmosphère ambiante.

❖ Emission de bruit

En tant que machine tournante à haute densité de puissance, la turbine à gaz émet du bruit dans un large spectre de fréquence. Il s'agit donc de faire un grand effort sur le plan de l'isolation phonique, en particulier lorsque la turbine à gaz se trouve à proximité ou même à l'intérieur de zones habitées, dans le but de produire de la puissance utile et simultanément un flux calorifique. L'expérience a montré que l'isolation phonique nécessaire est possible dans tous les cas sur le plan technique.

II.9. différent types de turbine à gaz

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

- Une ligne d'arbre (Figure II.6) 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.
- Deux lignes d'arbre (Figure II.7) Comme pour une ligne d'arbre, il est rajouté une turbine BP en bout d'arbre séparé mécaniquement. La conception à deux lignes d'arbres représente le maximum de souplesse et, est retenue pour les applications de grandes puissances.

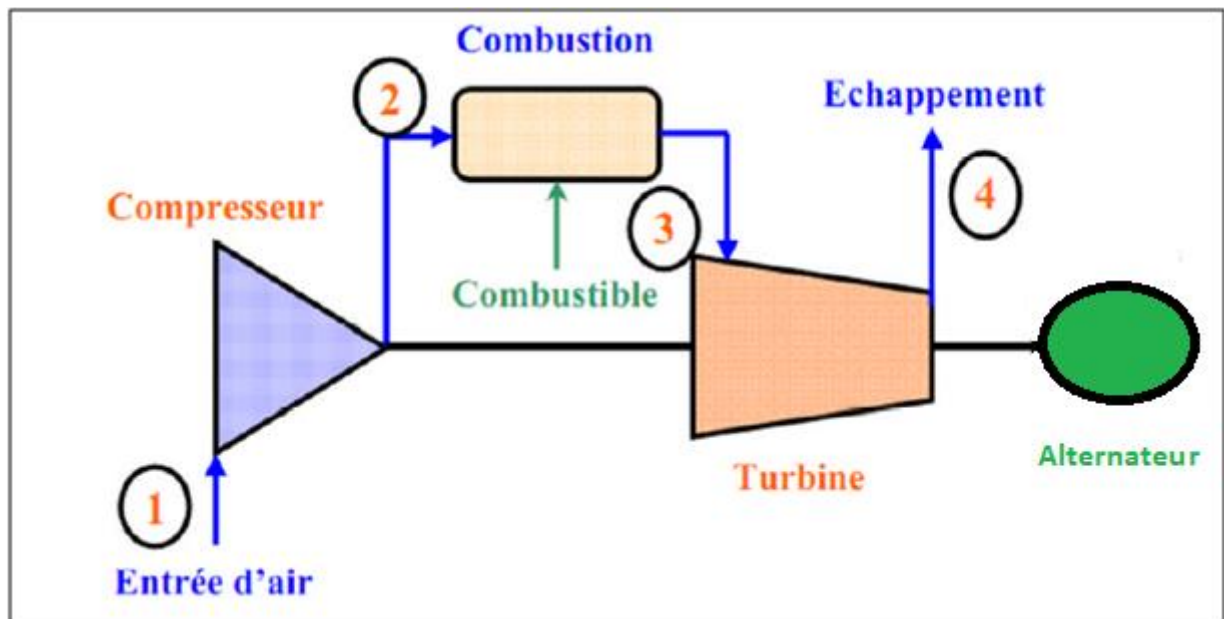


Figure II.6 Schéma d'une turbine à gaz à une ligne d'arbre.

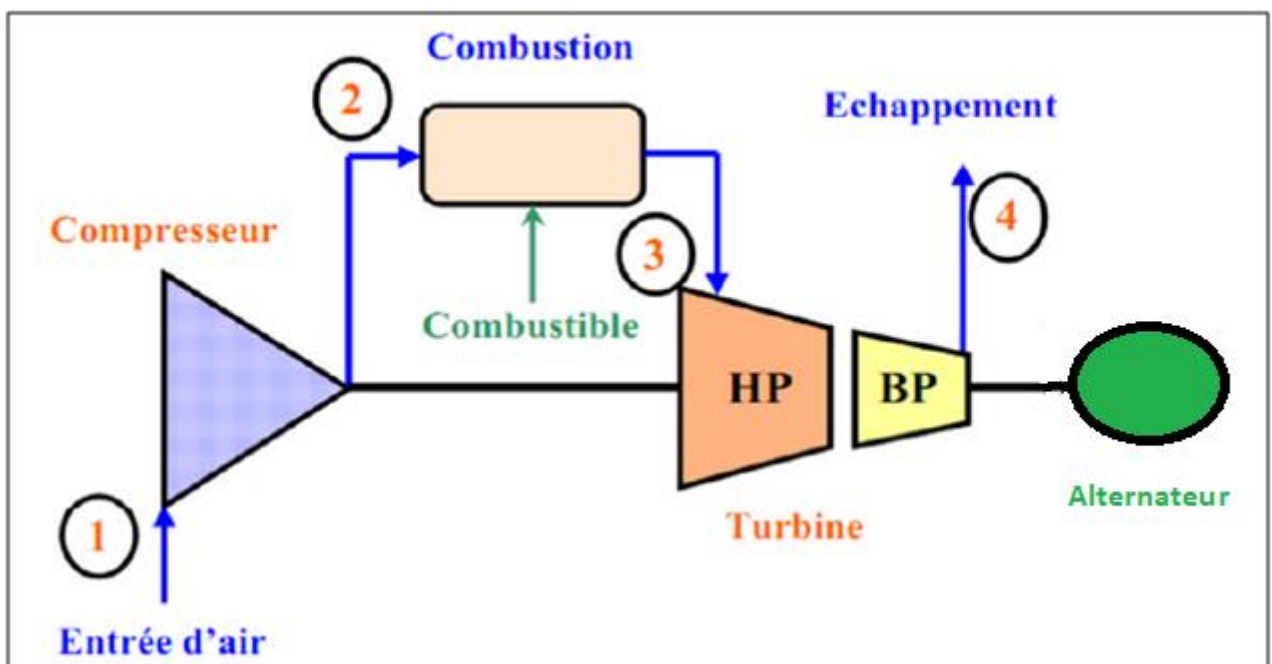


Figure II.7 : Schéma d'une turbine à gaz à deux lignes d'arbres.

II.10. Applications de la turbine à gaz

II.10.1- Réalisation pratique

La phase de compression est réalisée par un compresseur d'air axial ou centrifuge. Le travail de compression peut être réduit par pulvérisation d'eau à l'admission. L'air comprimé est réparti en trois flux:

- une alimentation stœchiométrique vers le brûleur alimenté en carburant, un flux refroidissant la paroi de la chambre de combustion est mélangé aux produits de combustion.
- un flux destiné au refroidissement de la turbine.

Il existe des machines utilisant une injection de vapeur dans les produits de combustion à l'entrée de turbine pour augmenter le débit et donc la puissance de celle-ci. La vapeur est produite par une chaudière de récupération chauffée par l'échappement. Il s'agit en fait d'un cycle combiné simplifié.

Deux grands types de turbines à gaz sont à distinguer:

- simple arbre : le compresseur et l'ensemble des étages de détente sont regroupés sur le même arbre entraînant également l'organe récepteur.
- double arbre : le compresseur est sur le même arbre que les étages de turbine strictement nécessaires à son entraînement, les autres étages de turbine étant groupés sur un second arbre solidaire de la machine entraînée. La seconde disposition plus complexe permet un meilleur fonctionnement à charge partielle et variable ce qui est le cas des moteurs destinés à la propulsion. Les turbines à simple arbre sont adaptées à la production électrique qui se fait à régime constant et charge plus élevée.

La réalisation de la turbine et notamment de son premier étage (turbine de feu) pose des problèmes métallurgiques liés à la température élevée et à la force centrifuge s'exerçant sur les aubages mobiles. Elle nécessite l'emploi d'aciers fortement alliés (Cr-Ni-Va) et un refroidissement énergétique par l'air de charge prélevé sur le compresseur. L'utilisation de matériaux céramiques est à l'étude pour augmenter la température [21,22].

II.10.2- Limites techniques et avantages

La turbine à gaz présente de sévères limitations dues aux contraintes techniques de sa réalisation. Ces principales limites sont les suivantes :

- taux de compression (et donc rendement) limité par le nombre d'étage de compression nécessaires,
- baisse importante de rendement des compresseurs centrifuges à un régime plus faible que le régime nominal,
- température de combustion (et donc rendement) limitée par la résistance mécanique de la turbine.

- chute importante du rendement à charge partielle en particulier pour les machines à simple arbre.
- coût d'usinage des aubages notamment de la turbine.
- Inaptitude aux arrêts et démarrages fréquents et peu progressifs.

Les avantages inhérents à ce type de machine sont les suivants:

- puissance massique et volumique très élevée du fait du fonctionnement continu.
- simplicité apparente de construction (un rotor dans un carter et un brûleur) et équilibrage (peu de vibrations).
- pollution limitée en HC et NOx du fait de l'excès d'air et de la température limitée.
- aptitude à la récupération de chaleur (cogénération).
- longévité en marche stationnaire.
- aptitude potentielle à utiliser des combustibles variés et de moindre qualité (gaz pauvre, fuel lourd).

Les applications des turbines à gaz découlent directement de leurs avantages spécifiques. Ainsi, la puissance massique élevée se prête bien à la propulsion aéronautique en particulier sur les hélicoptères. La propulsion navale fait également de plus en plus appel aux turbines à gaz notamment pour les navires à grande vitesse. Il existe enfin des exemples d'application à la propulsion ferroviaire et à des véhicules militaires comme des chars d'assaut (XM-1 Abrams ou Leclerc).

Par contre, la turbine à gaz est mal adaptée aux véhicules routiers. En effet, les variations de charge et de régime sont trop importantes et trop rapides pour être réalisables avec un { 20 } Chapitre - II
Revue bibliographique sur les TAG et leurs applications rendement correct. De plus, le rendement atteint difficilement 30% pour des moteurs compacts et de faible puissance.

L'autre grand domaine d'emploi des turbines à gaz est la production d'électricité. En effet, il s'agit d'applications à régime constant et à charge relativement constante pour lesquelles le rendement de ces machines est le meilleur. La puissance varie de quelques centaines de kW à près de 300 MW. Les machines les plus puissantes sont en général associées à des turbines à vapeur dans des cycles combinés dont le rendement global tend actuellement vers 60%. En cycle simple, le rendement est de l'ordre de 30 à 35%. Dans les faibles puissances, le rendement est même inférieur à 30% mais on met alors à profit l'aptitude des turbines à combustion pour la récupération de chaleur dans des applications de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur).

II.11. Domaines d'utilisations des turbines à gaz

Les turbines à gaz ont une très grande utilité dans l'industrie, Elle peuvent être utilisées pour l'entraînement des:

- Générateur d'électricité.
- Compresseurs.
- Pompes.
- Mais aussi comme système générateur de poussée notamment dans :
 - Chemins de fer.
 - Propulsion maritime.
 - Aviation.
 - Traction routière

II.12. Avantages

- Il nécessite moins d'espace pour l'installation.
- L'installation et le coût de fonctionnement des turbines à gaz sont moins comparables aux autres.
- Il a un rapport puissance-poids très élevé.
- Il génère moins de vibrations que le moteur alternatif.
- Il démarre facilement et rapidement.
- Il peut fonctionner dans des conditions de charge changeantes facilement.
- Son efficacité est supérieure à celle des moteurs IC.
- Il peut développer un couple uniforme, ce qui n'est pas possible dans les moteurs IC.

II.13. Inconvénients:

- Problème de démarrage. Il ne peut pas démarrer facilement parce que le compresseur est entraîné par le virage lui-même. Une unité externe est donc nécessaire pour faire tourner le compresseur afin de démarrer la turbine
- La majeure partie de la puissance est utilisée pour entraîner le compresseur de sorte qu'il donne moins de sortie.
- Le rendement global de la turbine est faible parce que les gaz d'échappement contiennent la majeure partie de la chaleur.

II.14.Modélisation de la turbine à gaz

II.14.1. TURBINES À GAZ HDGT ET CYCLE BRAYTON

Les turbines à gaz industrielles à usage intensif <<Heavy-Duty>> ou (HDGT) sont spécialement conçues turbines à gaz pour la production d'électricité qui sont spécifiées par leur longue durée de vie et leur disponibilité supérieure par rapport à d'autres types de turbines à gaz. Les HDGT sont composées de trois composants principaux : compresseurs axiaux multi-étages, chambres de combustion can-annulaires et turbines à flux axial. La figure II.8 montre un HDGT typique avec ses composants. L'air aux conditions atmosphériques est aspiré vers le compresseur après avoir passé les filtres à air à l'entrée. La multi-étape le compresseur augmente la vitesse, la pression et la température de l'air avant qu'il n'atteigne la chambre de combustion et l'admission à la haute pression pièces de turbine.

Chaque étage de compresseur comprend une rangée d'aubes de rotor et aubes de stator. Une rangée d'aubes de stator à l'entrée (aubes directrices d'entrée variable, VIGV) dont l'angle peut être modifié par le système de commande pendant le fonctionnement. Comme illustré à la Figure II.8, l'air comprimé à haute pression et la température suivra son chemin vers la chambre de combustion. Le La chambre de combustion est essentiellement un appareil de chauffage dans lequel le carburant est brûlé pour augmenter la température à une pression plus ou moins constante. Environ un tiers de l'air de refoulement du compresseur est mélangé avec le combustible à brûler, tandis que l'air restant est mélangé avec produits de combustion pour devenir le flux d'entrée de la turbine qui est maintenant à la température d'entrée de la turbine (TIT) [29]. Le flux est alors étendu en 2 à 4 étages de turbine qui entraînent le compresseur et

Générateur. Enfin, le flux est guidé à travers le conduit d'échappement à un deuxième environnement qui peut être l'environnement ambiant conditions ou un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) dans les centrales à cycle combiné (CCP). En plus de la dynamique air/gaz traversant les principaux composants de la turbine à gaz, il y a d'autres équipements qui présentent un intérêt dans le modèle de turbine à gaz comme le thermocouple de gaz d'échappement et son écran anti-rayonnement et le système de vanne de carburant et positionneur de vanne. Une estimation de ces les paramètres de l'équipement sont également effectués. Les turbines à gaz fonctionnent selon le cycle de Brayton.

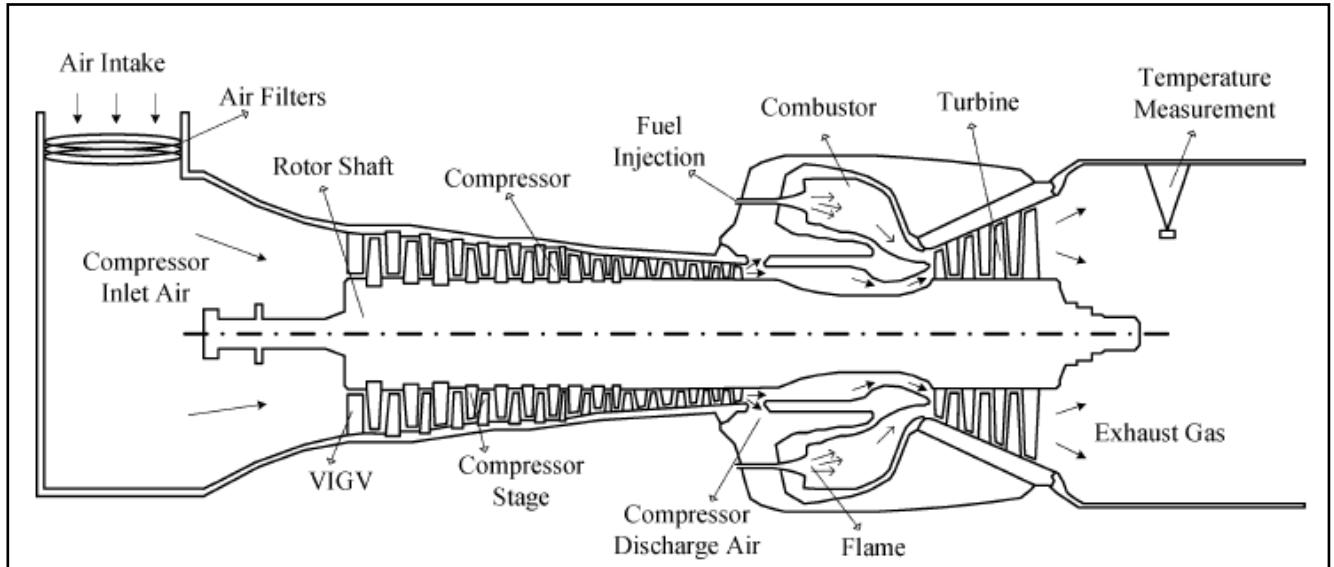


Figure II.8. Vue schématique d'un HDGT typique et de ses principaux composants.

La figure II.9 montre un cycle de Brayton standard typique dans le cadre température-entropie. L'air est aspiré du point 1 dans des conditions ambiantes et est comprimé par le compresseur dans un processus irréversible jusqu'au point 2. La chaleur d'entrée dans la chambre de combustion augmentera la température à point 3 où le produit de combustion et le refoulement du compresseur l'air entrera dans la turbine et se dilatera jusqu'au point 4. Sur cette figure, la perte de charge dans les filtres à air et la chambre de combustion est négligée, c'est-à-dire que les processus 2-3 et 4-1 sont supposés être isobares. Les processus dans les compresseurs et les turbines sont irréversibles et non isentropique; cependant, sur la figure II.9, l'hypothèse isentropique les processus sont également affichés. Ces processus idéaux seraient utilisés pour définir le compresseur et la turbine adiabatique irréversible efficacité comme suit :

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \approx \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \approx \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \quad (2)$$

Avec h représente l'enthalpie du mélange fluide (kJ/kg) et (T) est la température absolue en K. L'indice indique la température isentropique traitée. En fonctionnement, le rendement de la turbine (η_c) est plus affecté par les changements de charge et de vitesse que l'efficacité du compresseur (η_t) est [29]. Ceci est principalement dû au fait que le compresseur fonctionne dans des conditions thermodynamiques relativement constantes mais la turbine l'état varie grandement. En dérivant le modèle de turbine à gaz.

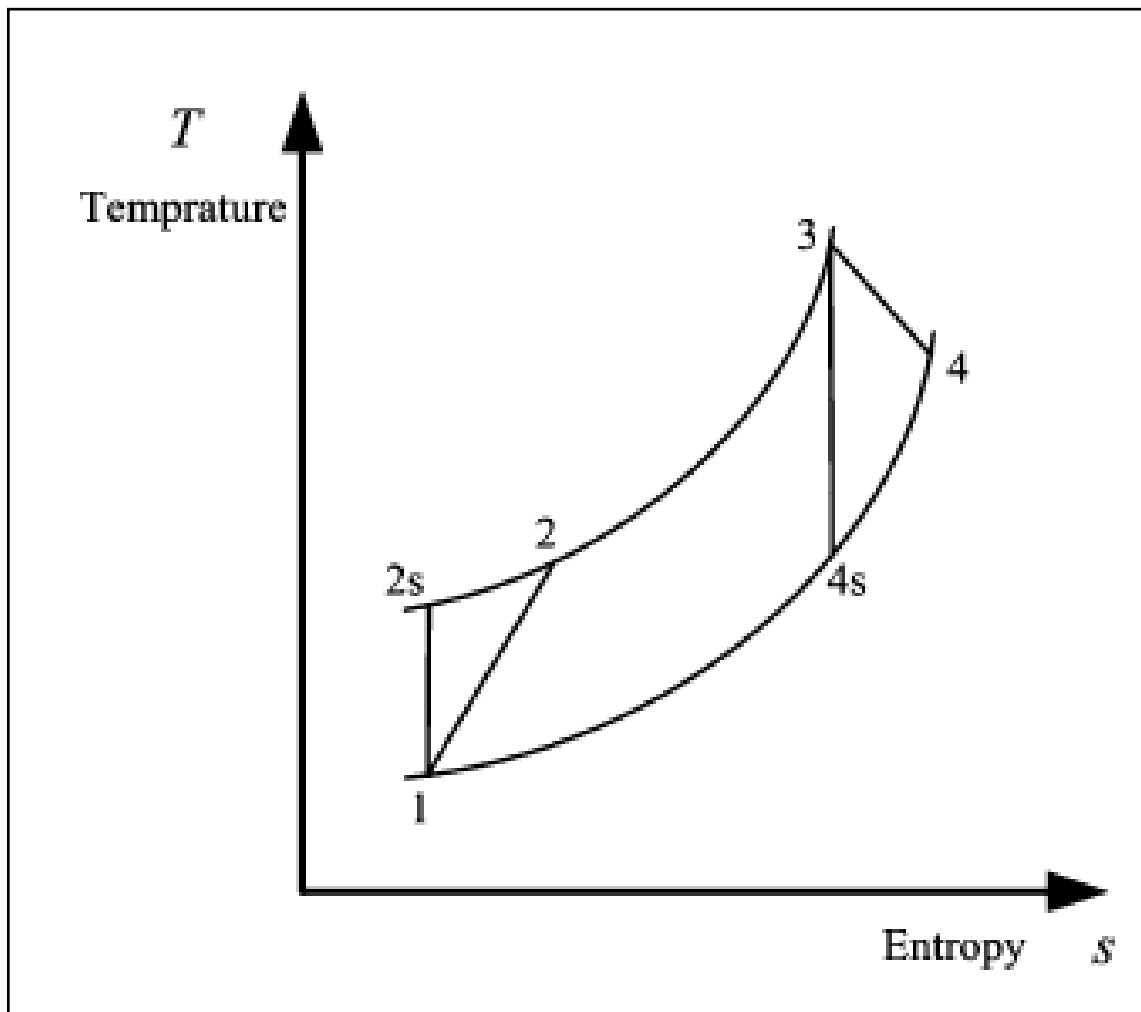


Figure II.9. Cycle de Brayton typique dans le cadre température-entropie.

II.14.2 HDGT MODÈLE POUR L'ANALYSE DE STABILITÉ

La représentation mathématique d'un HDGT dans les études dynamiques par le modèle de Rowen est illustrée à la figure II.10. Deux contrôles principaux sont illustrés sur cette figure. Ce sont des fréquences de charge et le contrôle de la température (à l'origine, dans [23] le contrôle de l'accélération a été montré et dans [24] les aubes directrices d'entrée (IGV) ont été modélisées qui ne sont pas incluses ici).

Les IGV variables (VIGV) servent à réguler le débit massique d'air aspiré dans le compresseur. En fait, les VIGV fonctionnent dans les applications CCP où ils régulent le débit d'air pour maintenir l'efficacité de la turbine à gaz pendant le fonctionnement à charge partielle. La régulation VIGV est principalement affectée par la température des gaz d'échappement. Si cette température est inférieure à la référence (proche de la température nominale) alors VIGV s'ouvrira et, en fait, il s'ouvrira complètement en fonctionnement normal aux alentours de la puissance nominale. Néanmoins, en charge partielle et au démarrage, la température d'échappement n'est pas si élevée et les VIGV sont en partie fermées. En fonctionnement cycle simple, la commande VIGV n'est active qu'au démarrage. Dans cet article, nous ne considérons pas le VIGV et le contrôle d'accélération car le modèle doit être réglé autour du fonctionnement nominal et le VIGV est considéré comme complètement ouvert.

Le signal de demande de carburant est la valeur minimale du contrôle de la température et de la fréquence de charge. La séquence des blocs modèles est la suivante : limitation de la demande de carburant, consommation à vide, positionneur de vanne et dynamique du système de carburant, délais de décharge de volume, modèle de turbine (pour le couple de sortie et la température), système de mesure de la température [23]. Outre les consignes de contrôle, d'autres les paramètres des modèles sont basés sur le comportement physique des composants du HDGT.

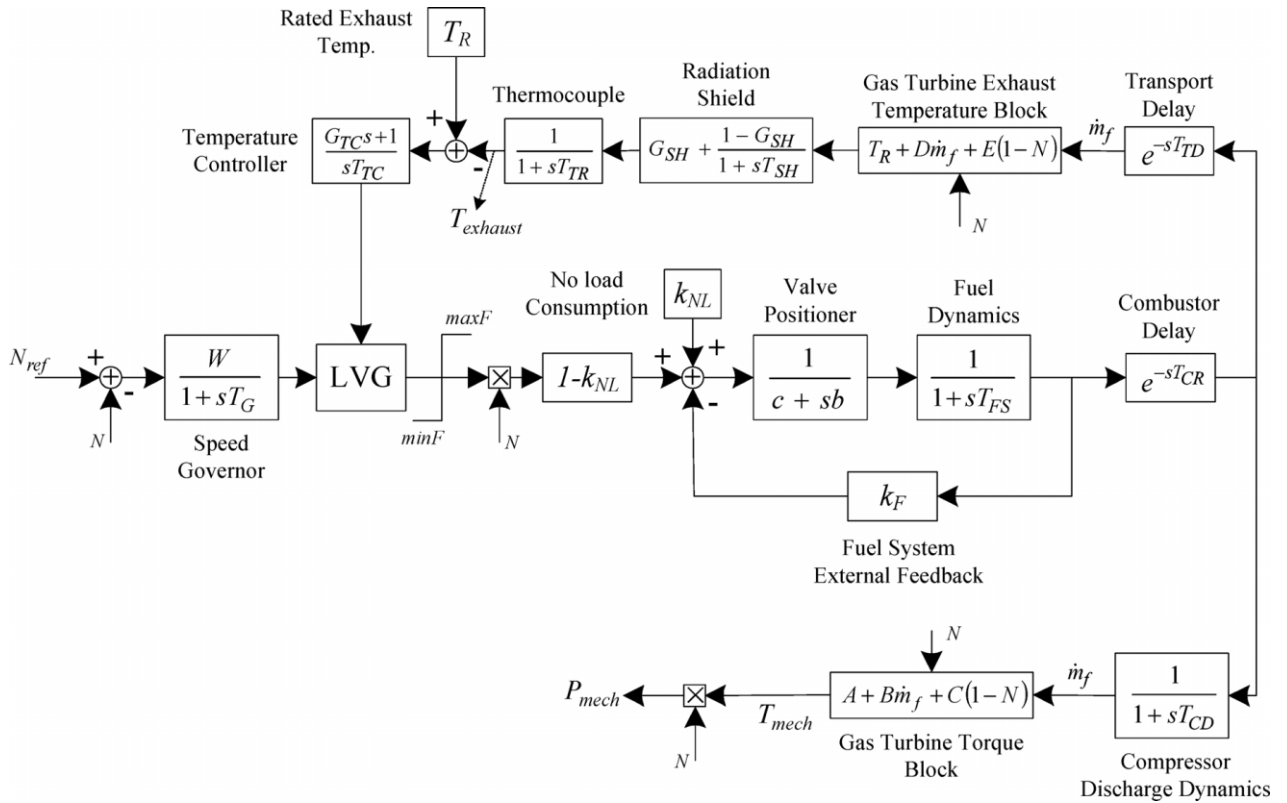


Figure II.10. Modèle de Rowen pour les HDGT pour les études dynamiques [23].

II.14.2.A. Paramètres de la turbine

Dans le modèle HDGT de la Figure II.10, le comportement de la turbine est reflété par deux quantités. Premièrement, le couple de sortie et deuxièmement l'échappement température du gaz. Pour voir les paramètres de la turbine plus en détail, Commençons par la figure II.9 et les rendements du compresseur et de la turbine. Dans le processus isentropique de 1–2s, nous avons [31].

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} = PR^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} = x_c \quad (3)$$

$$\frac{T_3}{T_{4s}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma_h - 1}{\gamma_h}} = PR^{\frac{\gamma_h - 1}{\gamma_h}} = x_h \quad (4)$$

où $P_2 / P_1 = P_3 / P_4 = PR$ (la perte de charge dans la chambre de combustion est négligé) est le rapport de pression de cycle.

γ_c et γ_h sont la partie froide (compresseur) et la partie chaude (combusteur, turbine) rapport des chaleurs spécifiques, respectivement. La variable x est définie pour simplifier le référencement dans les équations suivantes. Généralement, $\gamma = C_p / C_v$ où C_p est la chaleur spécifique de l'air à pression constante et C_v est la chaleur spécifique à volume constant.

Il est important de savoir que les chaleurs spécifiques et le rapport varient avec la température. Une approche courante consiste à utiliser l'extrémité chaude et propriétés de l'air froid comme suit [32] :

$$C_{ph} = 1.1569 \text{ kJ/kgK} \quad \text{et} \quad \gamma_h = 1.33 \quad (5)$$

$$C_{pc} = 1.0047 \text{ kJ/kgK} \quad \text{et} \quad \gamma_c = 1.4 \quad (6)$$

En utilisant (1) et (3), la température après le compresseur est calculée comme suit:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{\gamma_c - 1}{\eta_c} + 1 \right) \quad (7)$$

et avec (2) et (4), on obtient:

$$T_4 = T_3 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\gamma_h} \right) \eta_t \right] \quad (8)$$

Un autre processus qui affecte le comportement du HDGT est le processus qui a lieu dans la chambre de combustion, c'est-à-dire 2 à 3 sur la figure II.9.

Un processus de pression constante dans la chambre de combustion conduira à la expressions suivantes :

$$\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot C_{ph} \cdot (T_3 - T_2) \quad (9)$$

Avec $\dot{m}$ (kg/s) est le débit d'air. La chaleur est produite par extraire l'énergie du combustible comme suit :

$$\dot{Q}_H = \eta_{comb} \cdot \dot{m}_f \cdot H \quad (10)$$

Avec $\dot{q}H$ (kJ/s) est le taux d'absorption de chaleur dans la chambre de combustion, η_{comb} est le rendement de la chambre de combustion, $\dot{m}_f$ (kg/s) est le débit de carburant et H (kJ/kg) est le pouvoir calorifique inférieur ou le pouvoir calorifique inférieur du combustible utilisé. L'efficacité de la chambre de combustion représente la part de carburant qui est injecté dans la chambre de combustion mais qui n'est pas brûlé. Pour l'état des conceptions de l'art, l'efficacité de la chambre de combustion est très élevée et proche de unité. En utilisant (9) et (10) la montée en température dans la chambre de combustion peut être calculé comme suit :

$$T_3 = T_2 + \eta_{\text{comb}} \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} \frac{H}{C_{ph}} = T_2 + \Delta T_0 \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} \quad (11)$$

Avec ΔT_0 est un symbole simplificateur d'un coefficient d'échauffement. En fait, les températures internes et le rapport de pression et la réponse globale de HDGT varient avec la vitesse. Ces réponses sont non linéaires et compliquent encore les modèles. Cependant, dans Le modèle de Rowen, un modèle linéaire est supposé par rapport à la vitesse en appliquant la contrainte de vitesse de 95% à 107% du nominal la vitesse; voir figure II.10. Nous supposerons également une réponse linéaire avec par rapport aux écarts de vitesse, mais supposons d'abord que notre HDGT à vitesse nominale. À ce stade, le couple de sortie unitaire et la puissance mécanique serait la même. Puis:

$$P_G = \dot{m} \cdot [C_{ph} \cdot (T_3 - T_4) - C_{pc} (T_2 - T_1)] \quad (12)$$

Par des mathématiques simples, l'équation ci-dessus est écrite dans le forme du bloc d'alimentation de la figure II.10 en utilisant (7), (8) et (11), c'est-à-dire.

$$P_{Gpu} = A + B \cdot \dot{m}_{fpu} \quad \text{à vitesse nominale} \quad (13)$$

$$A = \frac{\dot{m}_n \cdot T_1}{P_{Gn}} \left\{ C_{ph} \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \frac{1}{x_h}\right) - \frac{x_c - 1}{\eta_c} \times [C_{pc} - C_{ph} \cdot \eta_t \cdot \left(1 - \frac{1}{x_h}\right)] \right\} \quad (14)$$

$$B = \frac{\eta_{\text{comb}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot \dot{m}_{fn}}{P_{Gn}} \left(1 - \frac{1}{x_h}\right) \quad (15)$$

Où A et B sont les coefficients du couple de sortie sur la figure II.10 ; $\dot{m}_n$ et $\dot{m}_{fn}$ sont les débits nominaux d'air et de carburant; et P_{Gpu} est la per unit de la puissance de sortie qui est égale à la p.u. Couple. Il faut préciser ici que la puissance nominale de la turbine est P_{Gn} la base de p.u. pour (13)–(15).

Au régime nominal, la température d'échappement peut être calculée en remplaçant (11) et (7) dans (8). Par conséquent;

$$T_4 = T_R - D \cdot (1 - \dot{m}_{fpu}) \quad \text{à vitesse nominale} \quad (16)$$

$$D = \eta_{\text{comb}} \frac{H}{c_p h} \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_n} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{x_h} \right) \eta_t \right] \quad (17)$$

Où D est le coefficient du bloc de température d'échappement sur la figure II.10 et T_R est la température d'échappement nominale du HDGT.

Pour extraire les paramètres, une condition de fonctionnement typique est sélectionnée pour dériver les efficacités de la turbine et du compresseur, puis tous les paramètres ci-dessus sont calculés avec les données disponibles hors du fonctionnement de l'unité.

Considérons maintenant la HDGT en débit nominal de carburant qui correspond à 1 p.u. Couple de sortie. Ensuite, la réponse en boucle ouverte de la turbine par rapport à la vitesse est:

$$T_{Gpu} = \frac{k+1}{k} - \frac{1}{k} N_{pu} \quad (18)$$

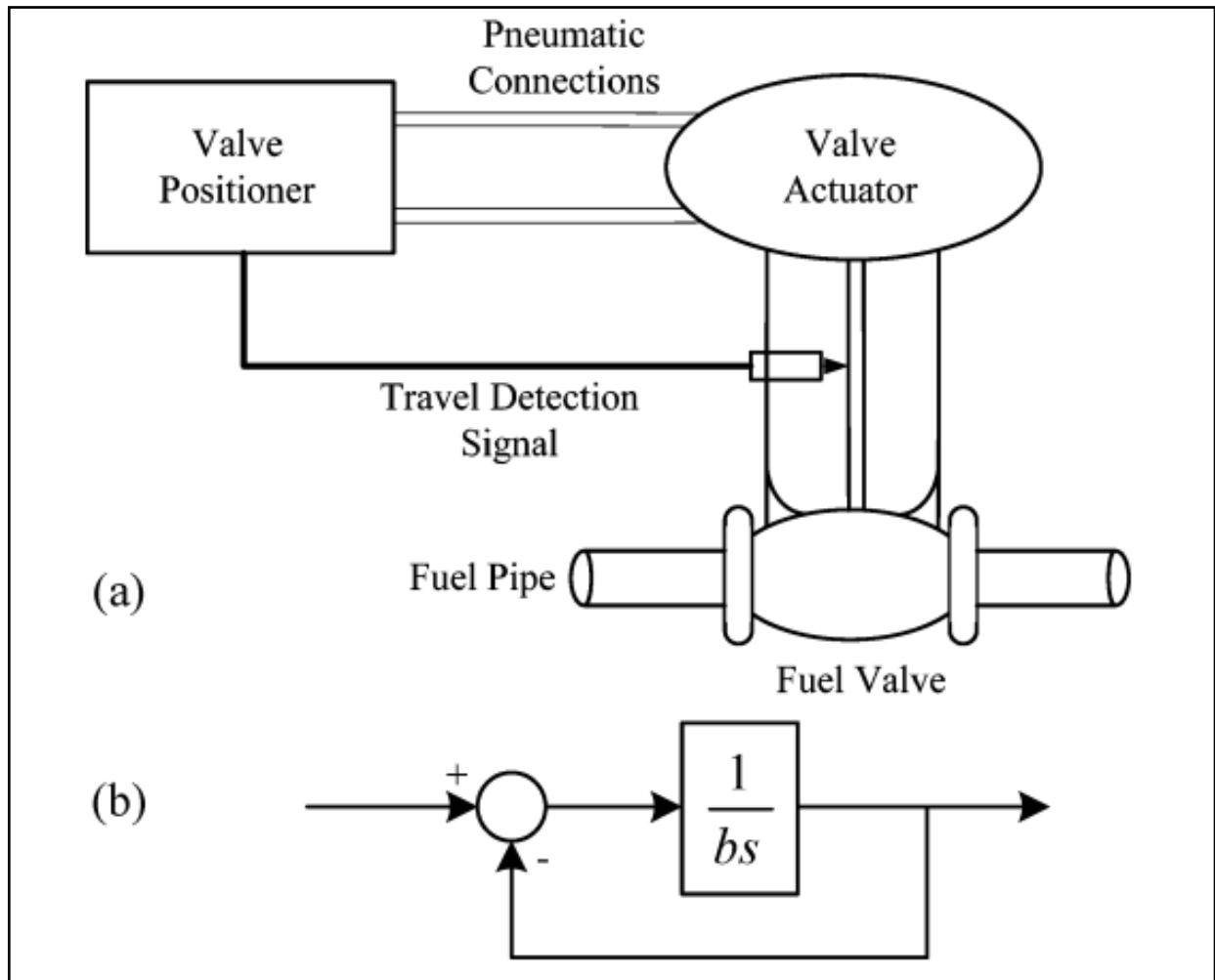


Figure II.11. Pneumatic valve positioned and valve actuator. (a) Schematic view. (b) Internal feedback mathematical model.

Où k est une constante et dépend principalement de la conception du cycle thermodynamique et des frottements. C'est un travail fastidieux de passer en revue les détails de ce paramètre [31].

Heureusement, les contraintes de conception des HDGT ne permettent pas de fortes variations de k et des valeurs de 1,5 à 2 sont courantes. Par conséquent, $C=1/k$ dans le bloc de puissance de la figure II.10 varie entre 0,5 et 0,67. Notez que tous les concepts ci-dessus ne sont valables que lorsque nous sommes dans la zone linéaire de la réponse de la turbine par rapport aux écarts de vitesse. La même approche concernant les changements de température en fonction de la vitesse fera varier le coefficient E dans le bloc de température d'échappement de la figure II.10 dans la plage de 0,55 à 0,65 de la température d'échappement nominale. Le fait que les HDGT nécessitent une consommation de carburant relativement élevée pour fonctionner même dans des conditions à vide se reflète dans le modèle de Rowen en divisant le signal de demande de carburant vers le système de positionnement en une partie k_{NL} constante (constante sur la figure II.10) et le gain de réduction multiplié par la demande. Signal (bloc 1- k_{NL} sur la Figure II.10). k_{NL} peut être extrait des données opérationnelles disponibles.

Il existe également un limiteur de signal de demande de carburant dans le modèle HDGT de la Figure II.10. L'étendue maximale du limiteur n'est pas atteinte en fonctionnement normal et peut servir de sauvegarde au contrôle de la température où toute augmentation de la température d'échappement de la turbine entraînera l'activation de contrôle de la température et diminution du débit de carburant [23].

Quoi qu'il en soit, l'étendue minimale est une valeur négative qui montre la capacité de la turbine à gaz d'absorption de puissance transitoire. Sa valeur dépend du débit de combustible minimum requis pour maintenir la flamme dans la chambre de combustion. Une valeur de 1,5 p.u. est couramment utilisé pour l'étendue maximale tandis que la valeur minimale peut être déterminée par les données disponibles du système de carburant.

II.14.2.B. Positionneur de vanne et décalage du système de carburant

Le positionneur de vanne déplace l'actionneur vers une position de vanne correspondant au point de consigne. Sur la figure II.11, le positionneur de vanne et sa connexion à l'actionneur de vanne et au système de vanne sont présentés. En raison du fait que les HDGT peuvent fonctionner avec du carburant liquide et gazeux, les modèles de système de carburant sont essentiellement deux systèmes différents avec des blocs similaires. Dans les HDGT plus grandes, les deux systèmes de carburant sont fournis avec une boucle de retour interne qui détecte la position actuelle de la vanne et élimine l'erreur entre le point de consigne et le signal de position, voir Figure II.11. Par conséquent, une seule constante de temps apparaîtra, qui est b dans le bloc positionneur de vanne de la Figure II.10.

La constante de temps du positionneur peut être trouvée dans les données du fabricant ou des données similaires disponibles pour les unités plus anciennes.

De plus, dans les systèmes à carburant liquide, il existe une voie de dérivation entre la sortie de la pompe à carburant et la section de la pompe. Le chemin de contournement est présenté dans le modèle de Rowen par le gain de boucle de rétroaction k_F . La valeur k_F d'est explicitement calculée pour forcer le gain global de boucle du positionneur de vanne-système de carburant à l'unité [23].

En conséquence, le produit de k_F et c (bloc de positionneur de vanne sur la figure II.10) devrait devenir zéro, c'est-à-dire que la valeur k_F est zéro pour nos grands HDGT si c ne l'est pas. Notez que ce n'est pas toujours le cas, en particulier lorsque le retour de boucle interne n'existe pas, voir [23] pour plus de détails. En supposant des actionneurs et des vannes à réponse linéaire, le débit de carburant changera directement avec le signal de sortie du positionneur de vanne. Cependant, il y a un décalage associé au débit de gaz/huile dans les tuyaux et le collecteur du système de carburant. Ce décalage peut être approximé par l'expression suivante [30]:

$$T_V = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{1}{v} \right) \Big|_{T_0} \quad (19)$$

Où T_V en s est la constante de temps du décalage associé au conteneur de volume V en m^3 , P_0 est la pression moyenne en Pa ($kg/m.sec^2$), Q_0 est le débit massique en régime permanent hors du conteneur en kg/sec et $\partial(1/v)/\partial P$ (sec^2/m^2) est le changement de densité dû aux changements de pression à température constante où $v(m^3/kg)$ est le volume spécifique. Pour les combustibles gazeux, la constante de décalage est considérablement plus élevée en raison des changements plus importants du volume spécifique. Connaître les estimations grossières des paramètres en (19) permet d'obtenir des valeurs grossières pour la constante de temps de latence.

II.14.2.C. Time Delays et Discharge Lag (délai et retard de décharge):

Le comportement de la turbine à gaz oblige son modèle dynamique à avoir de petits retards (time delay) et des constantes de temps de latence (lag time). En fait, il y a un petit délai entre l'injection de carburant et le dégagement de chaleur dans la chambre de combustion qui est appelé délai de réaction de combustion. Dans les systèmes modernes, elle est de l'ordre de quelques ms [32]. Ce délai est implémenté dans le modèle de Rowen comme un délai après les systèmes de vannes. Il existe également un délai entre la combustion du carburant et le système de mesure de la température des gaz d'échappement. Ce retard est causé par le système d'échappement et la turbine pour transporter le fluide jusqu'au point de mesure; voir Figure II.8, et est de l'ordre d'environ 10 ms en fonction principalement de la taille du HDGT et de la vitesse moyenne du fluide. Un décalage temporel relativement plus important existe dans le trajet de refoulement du compresseur jusqu'à l'entrée de la turbine. Il peut également être approximé par (19).

II.14.2.D. Mesure de la température

Le contrôle de la température dans les HDGT nécessite la mesure des températures d'échappement qui peuvent être composées d'un thermocouple et d'un écran anti-rayonnement (RADIATION SHIELD) [23]. Généralement, il existe trois modes de transfert de chaleur entre les matériaux : la conduction, la convection et le rayonnement. Ici, on ne s'intéresse qu'à la température des gaz d'échappement hors de la turbine (une source convective) pour contrôler la température et éviter un échauffement excessif. Néanmoins, la source de rayonnement, c'est-à-dire la turbine elle-même, provoquera des erreurs dans la mesure de la température. L'écran anti-rayonnement (RADIATION SHIELD) est donc utilisé pour surmonter le problème. L'écran anti-rayonnement est un écran métallique poli et hautement réfléchissant qui est placé autour du thermocouple et réfléchit la majeure partie du rayonnement loin du thermocouple et de lui-même voir Figure. II.12.

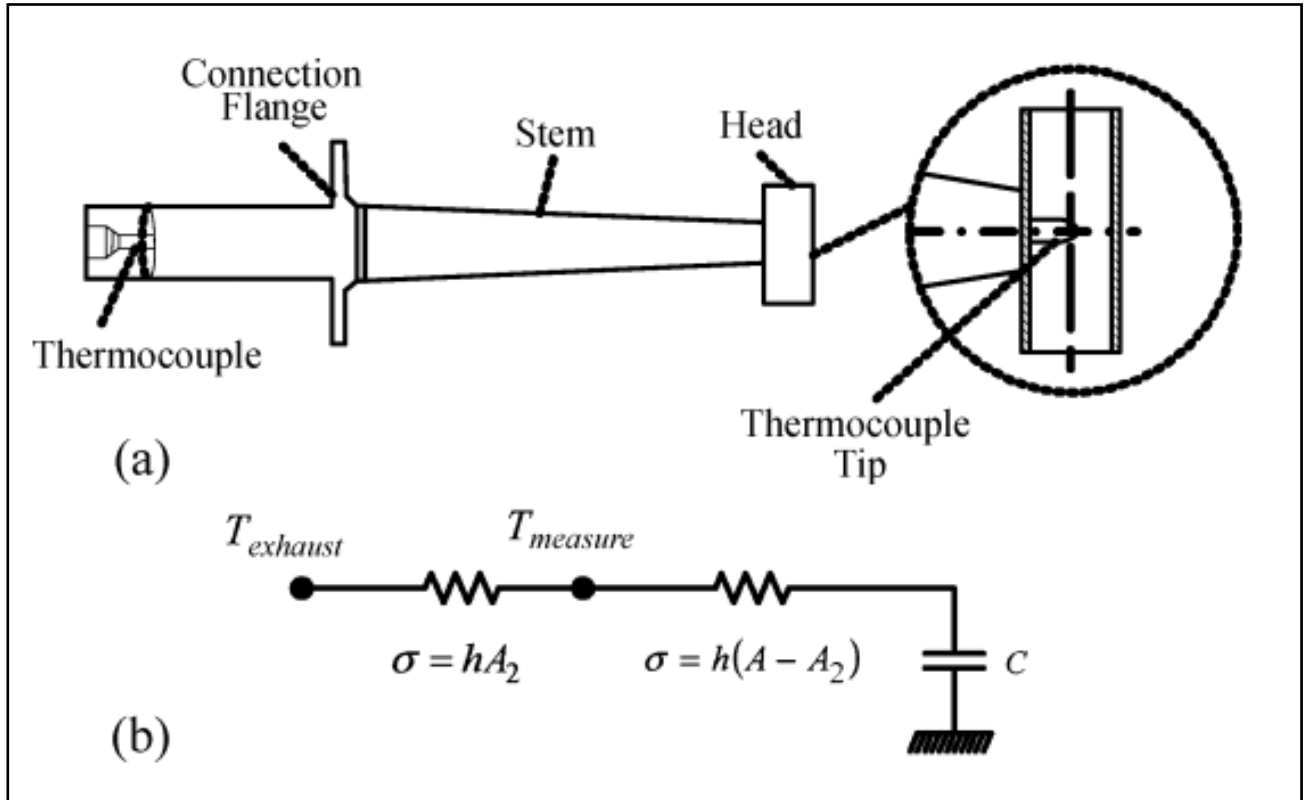


Figure.II.12.Radiation shield and thermocouple. (a) schematic of radiation shield and mounted thermocouple. (b) Simplified equivalent electric circuit for calculating the temperature at thermocouple position

Cet équipement provoquera un décalage basé sur son comportement de transfert de chaleur à présenter dans le modèle. Supposons un modèle simple des chemins de transfert de chaleur de la figure II.12. La température à la pointe du thermocouple sera alors approximée par:

$$\frac{T_{measure}}{T_{exhaust}} \approx \frac{A_2}{A_1} + \frac{1 - \frac{A_2}{A_1}}{\frac{C}{h \cdot A_1} s + 1} \quad (20)$$

Où A_1 est la surface active totale pour le transfert de chaleur par convection vers la tête de blindage, A_2 est la surface efficace pour le transfert de chaleur par convection vers la pointe du thermocouple, C (J/K) est la capacité thermique de la tête de blindage et h (W/m²K) est le coefficient de transfert de chaleur par convection [33].

Le dispositif de mesure de la température est le thermocouple qui a un décalage typique avec une constante de temps en fonction de son type et de sa conception. La constante de temps du thermocouple peut être facilement extraite de ses documents de temps de réponse.

II.15. Conclusion

Dans ce chapitre, des généralités et les différents organes constituant la turbine à gaz ont été présentées. Une classification selon les divers critères utilisés et une chronologie de développement des turbines à gaz, ont été détaillées. Nous avons par la suite passé aux différents facteurs que ce soit internes ou externes influençant sur les performances de l'installation. Puis nous avons abordé la modélisation de modèle d'une turbine à gaz présente par Rowen.

Chapitre III
Simulation de la turbine
à gaz

Introduction

Dans ce chapitre nous sommes concerné à la partie de (SIMULINK) SIMULINK : outil additionnel à matlab permet modélisation la simulation et l'analyse de système dynamiques linéaires. Se systèmes peuvent être analogique discrets ou hybride discrets avoir plusieurs parties échantillonnées à des cadences différentes.

Les paramètres régissant le fonctionnement de ces systèmes peuvent être modifié en ligne, soit en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats se forme de graphique ou de valeur numérique en cours de simulation.

SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de boucle classique par catégories (système directe ou continue bloc linier ou non linier de connexion etc.)

III. Simulation

III.1REPRESENTATION SOUS SIMULINK :

III.1.1.SIMUNLINK :

Le logiciel Simulink est le standard de fait dans l'industrie pour l'activité de modélisation, de spécification et de simulation des systèmes.

Simulink est une extension du logiciel de calcul Matlab. Il permet de modéliser et de simuler des systèmes évoluant dans le temps. Par abus de langage, Simulink désigne également le langage graphique permettant de représenter ces systèmes. Les technique et méthodes constituant le logiciel Simulink sont issues de l'analyse numérique.

III.1.2.LES BRIQUES DE BASE

Simulink se lance en tapant simplement Simulink sur le terminal de Matlab. Un nouveau modèle se crée avec File -> New -> Model, qui affiche une fenêtre blanche, sur laquelle on pourra déposer les différents blocs (par drag and drop) et les lier entre eux à l'aide de la souris.

Les blocs sont groupés dans différents groupes :

- **Sources** : permet de spécifier des sources d'input à un système (Step, constante,...).
- **Skins** : permet de spécifier des outputs. Nous utiliserons principalement To **Workspace**, qui permet d'envoyer le résultat au **workspace** de Matlab, et **Scope** qui permet d'afficher le résultat directement dans un graphique.

- **Divers** : le bloc **Fcn** (Groupe User Defined Fonctions) permet de décrire soi-même une fonction, le bloc **State Space** (Groupe Continuos) un système simple d'équations différentielles. Le bloc **DEE** « Différentiel équation editor » permet d'utiliser des équations différentielles arbitraires. Pour pouvoir l'utiliser, taper **de** sur le terminal Matlab.

III.1.3.SCHEMA BLOC SOUS SIMULINK DE LA TURBINE :

La simulation a eu lieu dans deux cas:

- La période [0-5] second représente la simulation avec charge1 (100 MW).
- La période [5-10] second représente la simulation après la variation de la charge2 (50 MW), qui représente 50% de la charge1, qui sont connectée en parallèle a la charge1

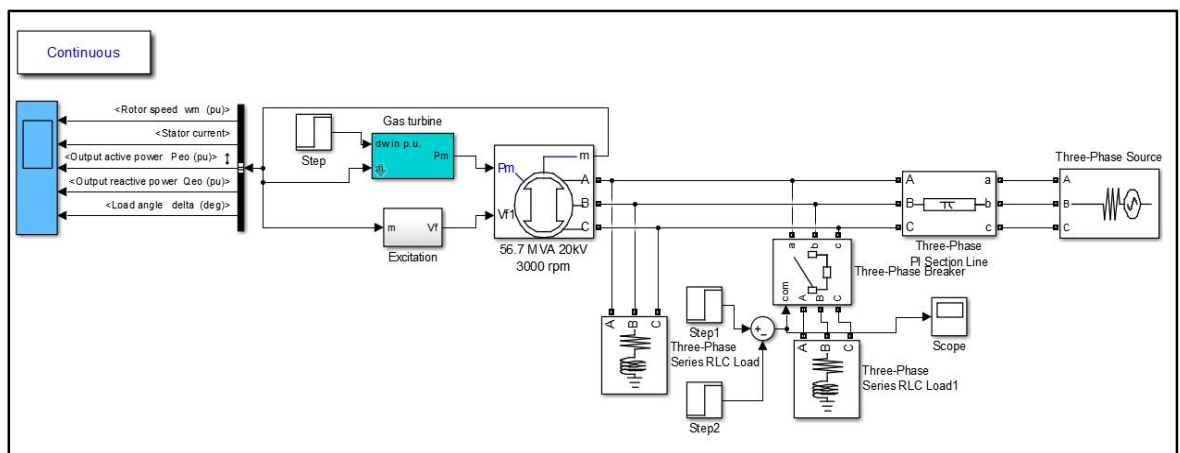


Figure III.1.Représentation du bloc turbine à gaz sous Simulink

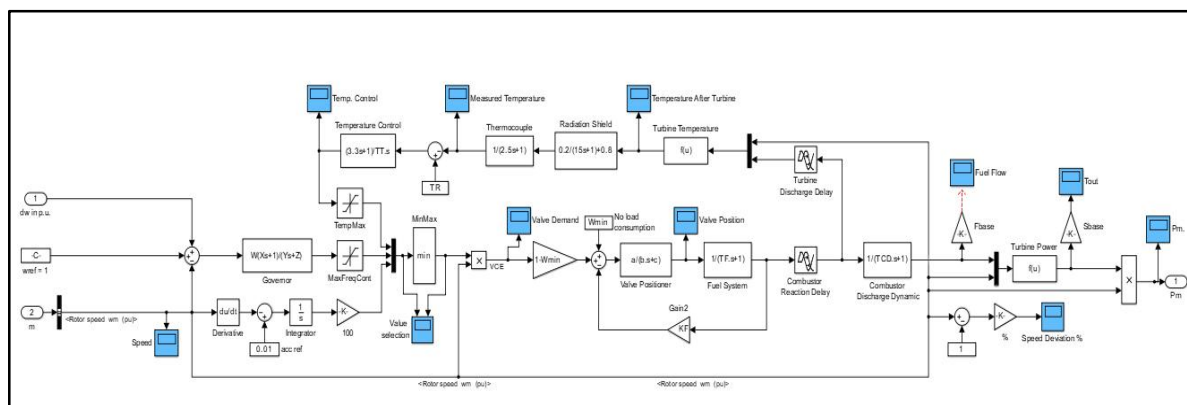


Figure III.2. Modele de Rowen pour les HDGT pour les études dynamiques.

III.1.4. Paramètres de turbine

Parameter	valuer
Initial Output Power (T0,pu)	1
Rated Generator Power(S,MVA)	56.7
Speed Governor Gain($W=1/\text{droop, pu MW/pu/Speed}$)	16.7
Speed Governor Lead Conctant (X,S)	0.6
Speed Governor Lead Conctant (Y,S)	1
Speed Governor Mode (1=droop,0=isochronus)	1
Fuel Demand Signal Max Limit (Max,pu)	1.5
Fuel Demand Signal Min Limit (Min,pu)	-0.13
Valve Positioner Parameter(a)	1
Valve Positioner Time Conctant (b,s)	0.05
Valve Positioner Parameter (c)	1
No Load Feul Consumption (Wmin)	0.23
Fuel System time Conctant (TF,s)	0.4
Fuel System External Feedback Loop Gin (TF,s)	0
Delay of combustion System (ECR,s)	0.01
Transport Delay of Turbine and Exhaust System (ETD,s)	0.04
Compressor Discharge Lag Time conctant (TDC,s)	0.2
Reted Exhaust Temperature (TR,degf)	950
Temperature Contoller Intergration Conctant (TT,degf)	450
Inertia (TI,2*H)	15.64

Tableau III.1: Paramètres de turbine

III.1.5.Paramètres de Machine Synchronou

Parameter	valuer
Nominal power p_n (MVA)	56.7
line-to-line voltage v_n (KV)	20
frequency f_n (Hz)	50
Vitesse nominale n (tr/min)	3000
Reactance $X_d X_d' X_d'' X_q X_q' X_q'' X_l$ (pu)	1.65,0.25,0.2,1.59,0.46,0.2,0.14 /1.1
Time constants [$T_{d0}' T_{d0}'' T_{q0}' T_{q0}''$] (s)	[4.5, 0.04, 0.67, 0.09]
Stator resistance R_s (pu)	[0.0045]
Initial coefficient,friction ,factor ,pole pairs [H(s) F(pu) p()]	[15.64/ 2 0 1]
Initial conditions $\delta_w(\%) \theta_h(\deg) i_a, i_b, i_c(\text{pu})$	[5.86664e-07 5.86664e-07 -19.3222 -
$\phi_a, \phi_b, \phi_c(\deg) v_f(\text{pu})$	139.3222 100.678 0.903413]

Tableau III.2: Paramètres de Machine Synchronous

III.1.6.Paramètres de la Charge1

Parameter	valuer
Nominal phae-to-phase voltage v_n (Vrms)	20E3
Nominale frequency f_n (Hz)	50
Active power p (w)	100E6
Indictive reactive power Q_l (positive var)	1E6
Capacitive reactive power Q_c (negative var)	0

Tableau III.3: Paramètres de la Charge1

III.1.7.Paramètres de la Charge2

Parameter	Valuer
Nominal phae-to-phase voltage v_n (Vrms)	20E3
Nominale frequency f_n (Hz)	50
Active power p (w)	0.5*100E6
Indictive reactive power Q_l (positive var)	0.5*1E6
Capacitive reactive power Q_c (negative var)	0

Tableau III.4: Paramètres de la Charge2

III.2.Résultats de la simulation

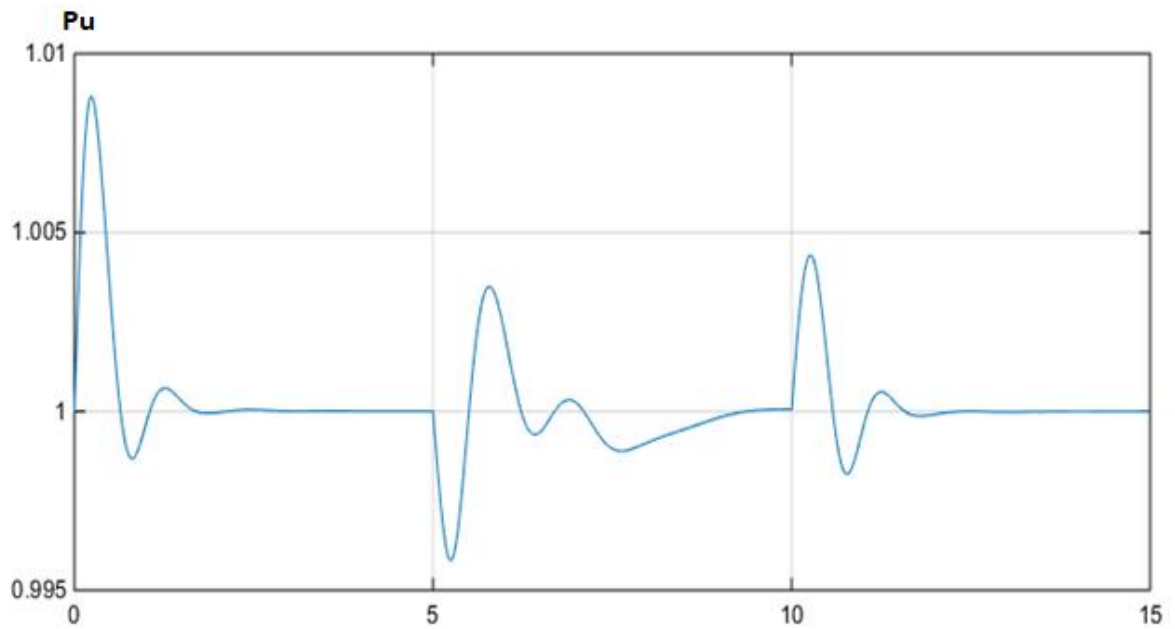


Figure III.3. L'évolution de Vitesse du rotor w_m

Après un régime transitoire de **2.36 second** la vitesse de rotation de la turbine se stabilise à la valeur de **1pu**.

Après un régime transitoire de **[5-9.27] second** la vitesse de rotation de la turbine se stabilise à la valeur de **1pu**.

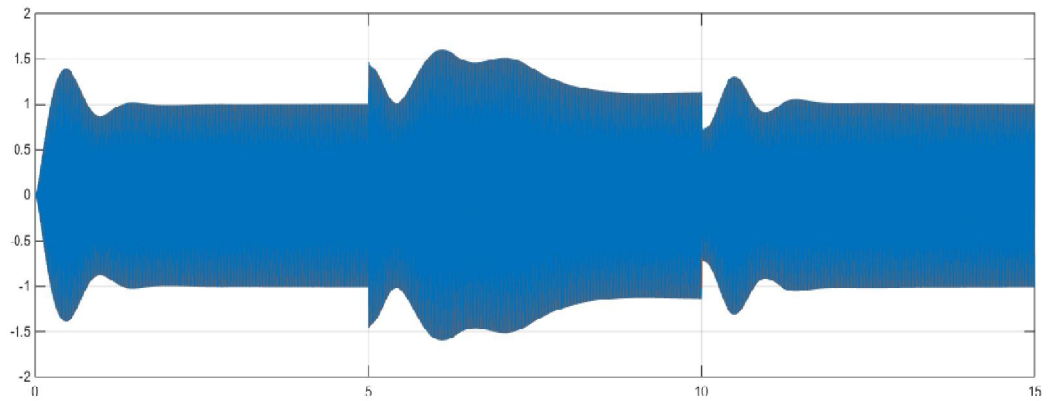


Figure III.4. L'évolution de Courant statorique

Après un régime transitoire de **1.64 second** le Courant statorique de la turbine se stabilise à la valeur de **1pu**.

Après un régime transitoire de **[5-8.92] second** le Courant statorique de la turbine se stabilise à la valeur de **1.11pu**.

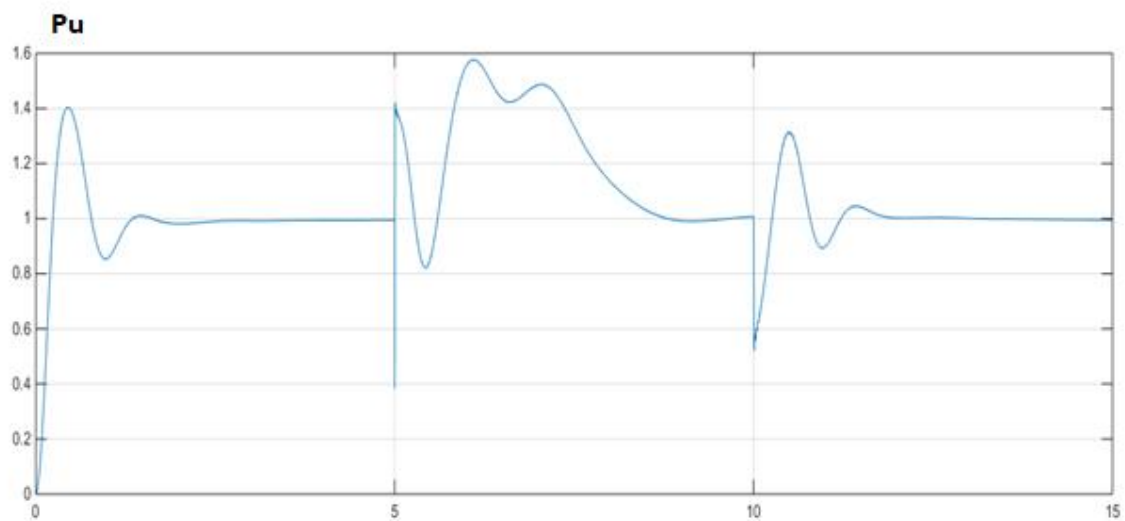


Figure III.5. L'évolution de Puissance active de sortie Peo

Après un régime transitoire de **2.73 second** la valeur de la puissance active à la sortie du turbine se stabilise à la valeur de **0.99pu**.

Après un régime transitoire de **[5-8.95] second** la valeur de la puissance active à la sortie du turbine se stabilise à la valeur de **0.99pu**.

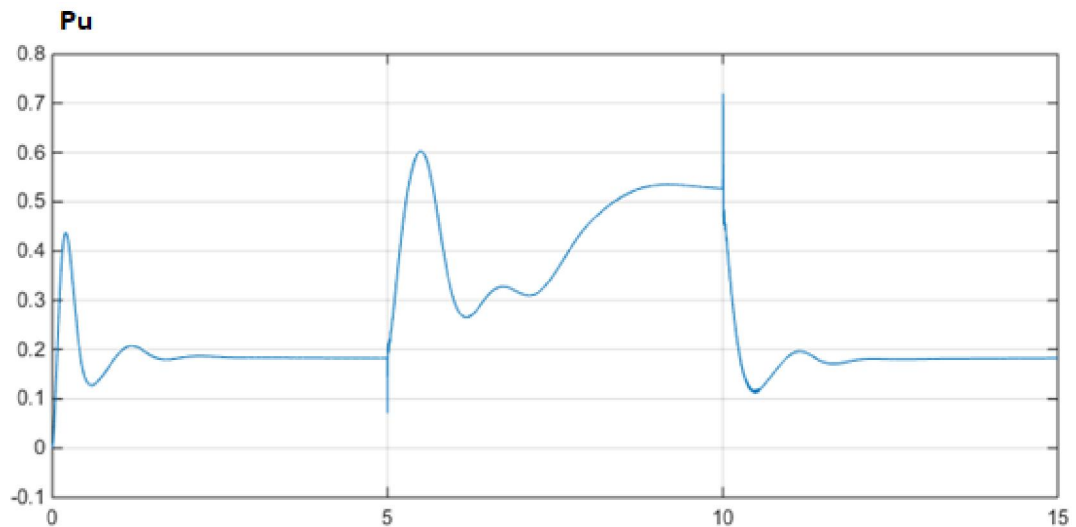


Figure III.6. L'évolution de Puissance Réactive de sortie Qeo

Après un régime transitoire de **2 second** la valeur de la puissance réactive à la sortie du turbine se stabilise à la valeur de **0.18pu**.

Après un régime transitoire de **[5-9] second** la valeur de la puissance réactive à la sortie du turbine se stabilise à la valeur de **0.53pu**.

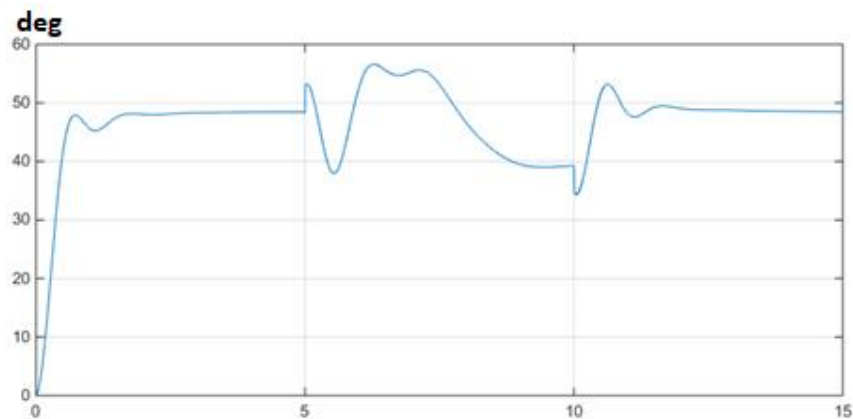


Figure III.7. L'évolution de l'Angle de charge delta (deg)

Après un régime transitoire de **1.72 second** l'Angle de charge se stabilise à la valeur de **48 deg**.

Après un régime transitoire de **[5-9.18] second** l'Angle de charge se stabilise à la valeur de **39 deg**.

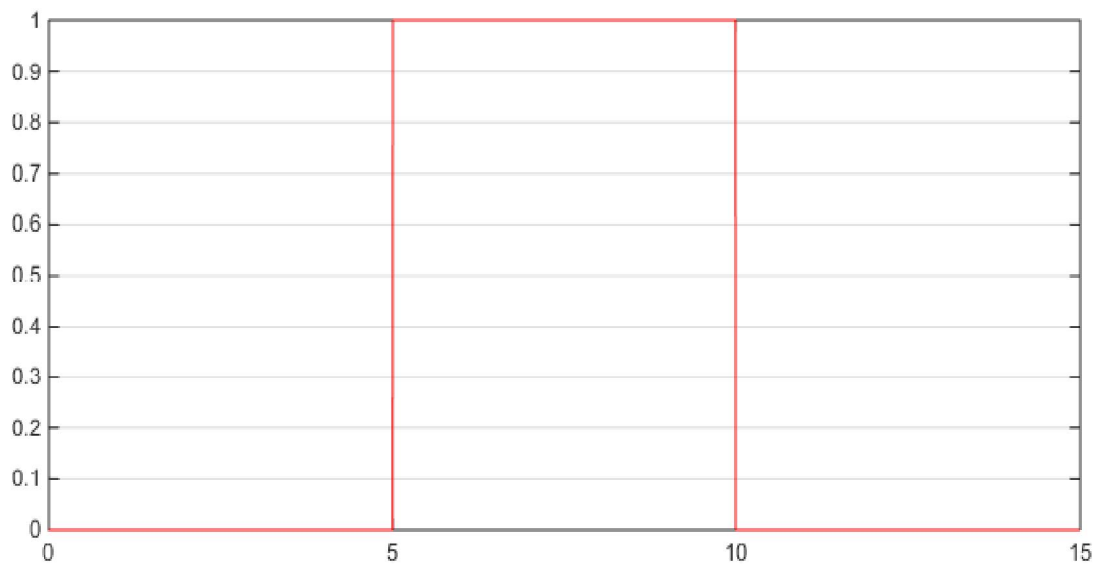


Figure III.8. L'évolution de la Charge

La période [0-5] second la charge est à la valeur de nominal.

La période [5-10] second la charge s'élève à valeur de **1 pu** en raison de l'augmentation de la charge

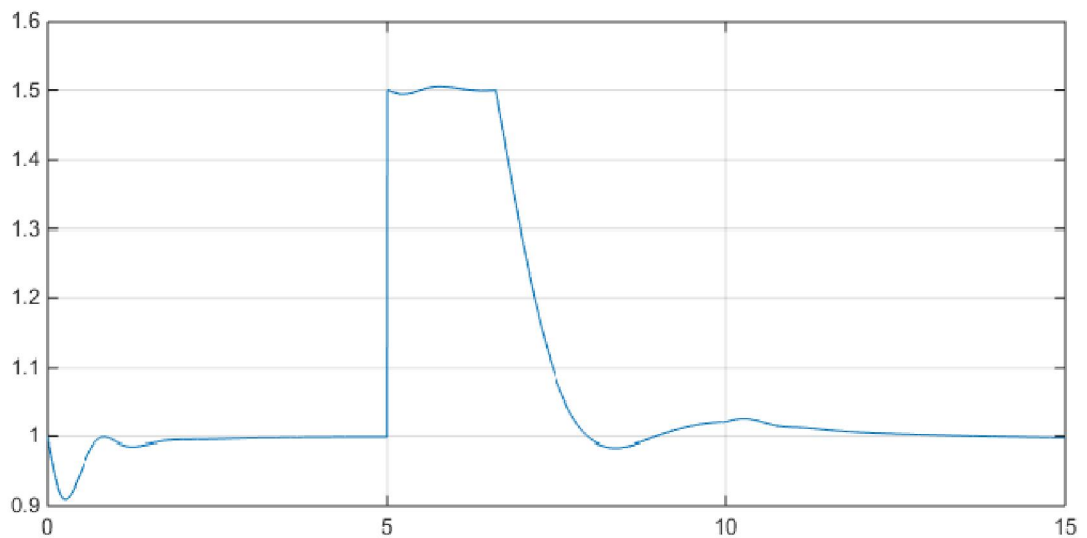


Figure III.9. L'évolution de Valve demand

Après un régime transitoire de **1.8 second** la valeur de Valve demand se stabilise à la valeur de **1pu**.

Dans la période **[5-6.6] second** la valeur de Valve demand s'élève à valeur de **1.5 pu** en raison de l'augmentation de la charge

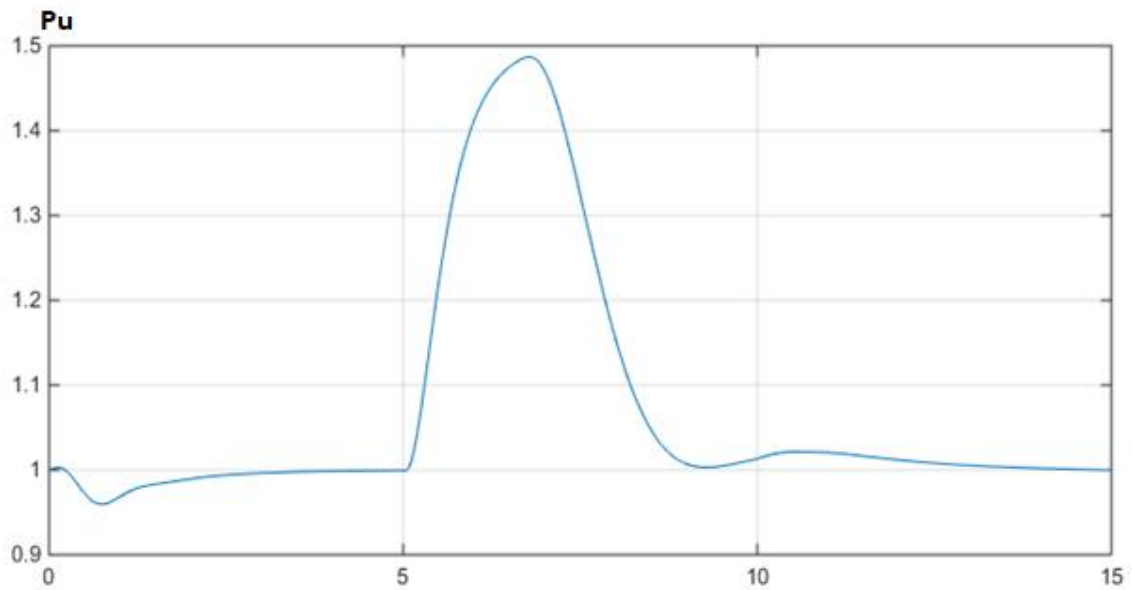


Figure III.10. L'évolution de puissance mécanique

Après un régime transitoire de **3.5 second** la valeur de la puissance mécanique se stabilise à la valeur de **1pu**.

Après un régime transitoire de **[5-9] second** la valeur de la puissance mécanique se stabilise à la valeur de **1 pu**.

III.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de simulation de la modèle ROWEN pour les HDGT (100MW) par logiciel MATLAB/Simulink, qui montre le SCHEMA BLOC en plus d'extraire les résultants des courbes liées à la turbine.(Vitesse du rotor , Courant statorique, de Puissance active de sortie, Puissance Réactive de sortie....)

Enfin, nous avons commenté les résultats de chaque courbe.

CONCLUSION GENERALE

Les turbines à gaz sont utilisées dans le monde entier dans la génération de l'électricité, des centrales thermiques et de l'industrie des hydrocarbures, dans différents endroits géographiques avec des conditions climatiques variables de température, de pression et d'humidité. Les turbines à gaz sont très sensibles à la variation de la température de l'air ambiant.

La réalisation de ce mémoire nous a permis d'acquérir des connaissances sur les différents types de centrales électriques dont dépend l'Algérie, notamment les centrales thermiques au gaz, qui représentent à leur tour plus de 90% de la production d'électricité.

Une étude thermodynamique a été menée pour une turbine à gaz d'une capacité de 100MW de Modèle de Rowen pour les HDGT qui nous a permis de connaître les différents facteurs à travers lesquels il est possible de maîtriser le principe de fonctionnement des turbines à gaz.

Dans ce mémoire, nous avons fourni une connaissance de base sur les blocs de construction du modèle dynamique de HDGT. En plus, une loi physique simple et des simplifications peuvent être utilisées pour créer des exemples numériques simples basés sur les données des unités existantes.

RÉFÉRENCES

- [1] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [2] Recherche ECRIN entreprise, "L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", rapport de synthèse, mai 2002.
- [3] www.ets-net.org.
- [4] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [5] J.F. Walker, N. Jenkins, "Wind energy technology", John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [6] S. Winjnbergen, "Wind Force 12. A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020", Global Wind Energy Council (GWEC) report, Jun. 2005.
- [7] Besson Armand (2008). Présentation cours 1ere STI GEL (2007-2008) : "LE FONCTIONNEMENT DES CENTRALES NUCLEAIRES".
- [8] Ian Graham (2000), "Les énergies en questions, l'énergie hydraulique", Bonneuil-les-Eaux [France] : Gamma ; Montréal : École active, c2000, 48p.
- [9] "L'énergie de A à Z".
[En ligne] http://www.edf.com/html/panorama/transversal/media_eol/eol_anim_01.html. [Page consultée 10 mai 2017]
- [10] "L'énergie solaire". [Document électronique].
https://www.eleves.ens.fr/home/gouzien/Publications/Secondaire/Elie_Gouzien_TPE.pdf.
- [11] Zouglami A, Daghboudj S, "Etude numérique du vrillage des aubes d'une turbine à vapeur axiale", Mémoire Master, Université Larbi Tébessi, Tébessa, 2011.
- [12] Mémoire de MASTER Calcule optimale des soutirages dans Turbine à vapeur.
- [13] G. Danieus, « Energétique et turbomachines (691/IGM) ».
- [14] "Chaudière". Dans Wikipedia, l'encyclopédie libre. [En ligne].
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudière>. [Consulté le 20 mai 2017].
- [15] William Lévy (1990). "Condenseurs par surface dans les centrales thermiques". [En ligne]. <http://www.techniques-ingénieur.fr/basedocumentaire/archives->

th12/archivesthermique-industrielle-tiabec/archive-1/condenseurs-par-surface-dans-les-centralesthermiquesb1540/. [Consulté le 25 mai 2017]

[16] "Condenseur (séparation)". Dans Wikipedia, l'encyclopédie libre. [En ligne]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur_\(séparation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur_(séparation)). [Consulté le 27 mai 2017].

[17] « BP Statistical Review of World Energy 2014 » [archive], BP (consulté le 19 juin 2014)

[18] CIA World Factbook - Version du Janvier 1, 2014

[19] Gicaud Renaud (2001-2005). Extrait de "Systèmes Energétiques, tome 2", Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

[20] Tony Giampaolo « Gas Turbine Handbook: Principles and Practices » by, MSME, PE.

[21] Boissenin, Y., Molière, M., et Remy, P., 1994, "Les atouts de la turbine à gaz MS6001 B en cogénération - exemple de l'usine d'électricité de Metz", Revue technique GE Alsthom N°15.

[22] André LALLEMAND, 1995, "Production d'énergie électrique par centrales thermiques", Techniques de l'Ingénieur, D 4 002, pp.1-11.

[23] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines," *Trans. ASME, J. Eng. Power*, vol. 105, no. 1, pp. 865–869, 1983.

[24] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service," presented at the Int. Gas Turbine and Aeroengine Congr. and Expo., Cologne, Germany, 1992, unpublished.

[25] IEEE Working Group Report, "Dynamic models for combined cycle plants in power system studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1698–1707, Aug. 1994.

[26] S. K. Yee, J. V. Milanovic', and F. M. Hughes, "Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 108–118, Feb. 2008.

[27] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGrawHill, 1994.

[28] R. K. Turton, *Principals of Turbomachinery*. London, U.K.: Chapman & Hall, 1995.

[29] M. P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Gulf Professional, 2006.

[30] B. Vahidi, M. R. Bank Tavakoli, and W. Gawlik, "Determining parameters of turbine's model using heat balance data of steam power unit for educational purposes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1547–1553, Nov. 2007.

[31] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, and C. Borgnakke, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 4th ed. New York: Wiley, 1998.

[32] P. P. Walsh and P. Fletcher, *Gas Turbine Performance*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Blackwell Science, 2004.

[33] J. V. Nicholas and D. R. White, *Traceable Temperatures*, 2nd ed. New York: Wiley, 2001.

