

Chapitre 1

I. Introduction :

Actuellement et dans tous les pays du monde, les besoins en l'énergie électrique (ou électricité) ne cessent d'augmenter, la croissance de cette énergie améliore de plus en plus les progrès industrielles et le développement.

On peut définir la production de l'énergie électrique comme étant la transformation **d'énergie primaire en énergie électrique**.

I.1. Les forme d'énergies :

Les formes d'énergie peuvent se transformer ou se convertir d'un type à un autre.

- **L'énergie cinétique** : ou l'énergie du mouvement. Elle dépend proportionnellement à la vitesse de l'objet en mouvement, et elle peut se transformer en énergie mécanique, exemple: L'énergie des cours d'eau (énergie hydraulique) et celle du vent (énergie éolienne)
- **L'énergie thermique** : C'est l'énergie de la chaleur. Elle est due à l'agitation des molécules et des atomes. Dans une machine à vapeur par exemple ou une turbine, elle est transformée en énergie mécanique après dans une centrale thermique, elle est convertie en énergie électrique.
- **L'énergie gravitationnelle** (la force de la pesanteur) peut être servie dans les applications industrielles, comme par exemple le barrage hydroélectrique qui utilise, à partir d'une hauteur, les chutes d'eau pour entrainer une turbine.
- **L'énergie chimique** : L'énergie chimique est l'énergie associée aux liaisons entre les atomes constituant les molécules. Certaines réactions chimiques sont capables de briser ces liaisons, ce qui libère leur énergie

parmi les applications industrielles: l'essence utilisée par une voiture, la pile électrique ou la batterie

- **L'énergie rayonnante** : C'est l'énergie transportée par les rayonnements, comme l'énergie lumineuse ou le rayonnement infrarouge. Les deux sont émis, par exemple, par le Soleil ou les filaments des lampes électriques. L'énergie des rayonnements solaires peut être récupérée et convertie en énergie électrique (photovoltaïque) ou en énergie thermique (solaire thermique).
- **L'énergie nucléaire** : L'énergie nucléaire est l'énergie stockée au cœur des atomes, plus précisément dans les liaisons entre les particules (protons et neutrons) qui constituent leur noyau. En transformant les noyaux atomiques, les réactions nucléaires s'accompagnent d'un dégagement de chaleur (énergie thermique). Dans les centrales nucléaires, on réalise des réactions de fission des noyaux d'uranium, et une partie de la chaleur dégagée est transformée en énergie électrique.
- **L'énergie électrique** : est l'énergie fournie sous forme de courant électrique à un système électrotechnique ou électronique. L'électricité est directement utilisable pour effectuer un travail : déplacer une charge, fournir de la lumière, calculer et chauffer...etc.

I.2. Les sources d'énergie:

Elles sont considérées comme des énergies primaires telles quelles sont captées dans la nature. Il existe deux catégories de ressources d'énergie :

➤ Les sources d'énergie non renouvelable :

Ce sont des ressources **fossiles** faciles à exploiter mais épuisables et polluantes (production du CO₂), on peut citer : le pétrole, gaz naturel, charbon...

➤ Les sources d'énergie renouvelable :

Ces ressources sont *naturellement disponible (inépuisable)*, elles sont pratiquement non polluantes mais la puissance produite est faible.
Exemple : le soleil, le vent, les fleuves d'eau, les mers.....

I.3. les différents types de production d'énergie électrique :

Les centrales électriques ont pour rôle de produire de l'énergie électrique, ou plus exactement de transformer l'énergie primaire en énergie électrique.

Il existe plusieurs types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dit centrales thermiques à vapeur,
- Les centrales thermiques à combustion (turbine à gaz)
- Les centrales thermiques mixtes
- Les centrales nucléaires
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales éoliennes,
- Les centrales solaires photovoltaïques.

II. Les centrales Thermiques à flamme :

Introduction :

Pratiquement, les centrales thermiques sont les plus utilisées en Algérie pour produire de l'électricité, elles nécessitent de disposer d'une source de chaleur qui est généralement obtenue par la combustion d'un combustible fossiles tel que le gaz naturel, pétrole, charbon...

Ces centrales thermiques, grâce à leur flexibilité et réactivité, constituent l'un des moyens les plus efficaces pour faire face aux variations de la demande d'électricité.

On distingue :

- Les centrales thermiques à *vapeur*
- Les centrales thermiques à *combustion* (*turbine à gaz*)
- Les centrales thermiques à *cycle combinée*

II.1 Les centrales thermiques à vapeur:

Une centrale thermique à vapeur produit de **l'électricité** à partir d'une **source de chaleur**, en brûlant un combustible (charbon, gaz,..) dans une **chaudière** qui produit de la vapeur. Cette vapeur d'eau met en mouvement une **turbine** qui entraîne un **alternateur**. L'ensemble, turbine et alternateur, est appelé turboalternateur (fig. 1).

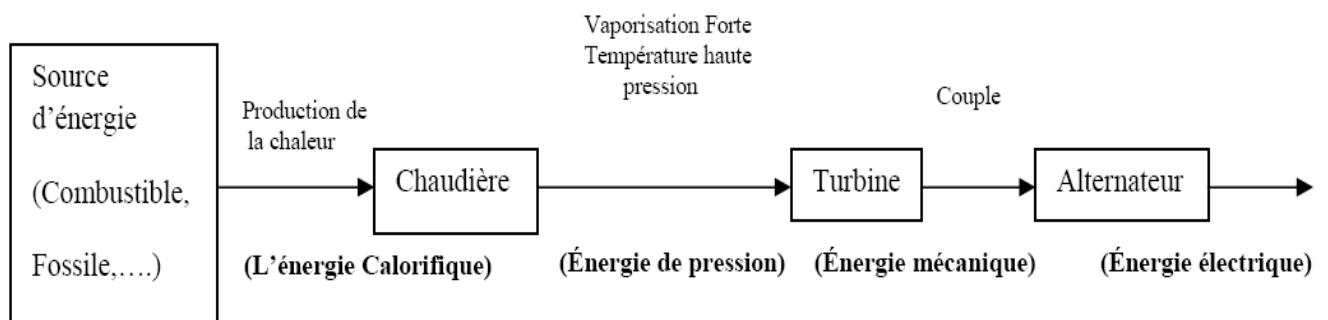


Fig.1 principe de la production d'énergie électrique par une centrale thermique

II.1.1. Principe de fonctionnement :

La centrale utilise l'énergie fournie par la combustion (gaz naturel, fuel, charbon...) qui constitue la source de chaleur. L'objectif est de faire chauffer de l'eau à partir de la chaleur libérée afin de disposer une vapeur. Cette vapeur d'eau qui est transportée sous haute pression et sous haute température permet d'entraîner à grande vitesse une turbine accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique produisant ainsi une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est condensée

et transformée en eau réutilisé comme source de vapeur et effectue alors un cycle thermodynamique (fig. 2)

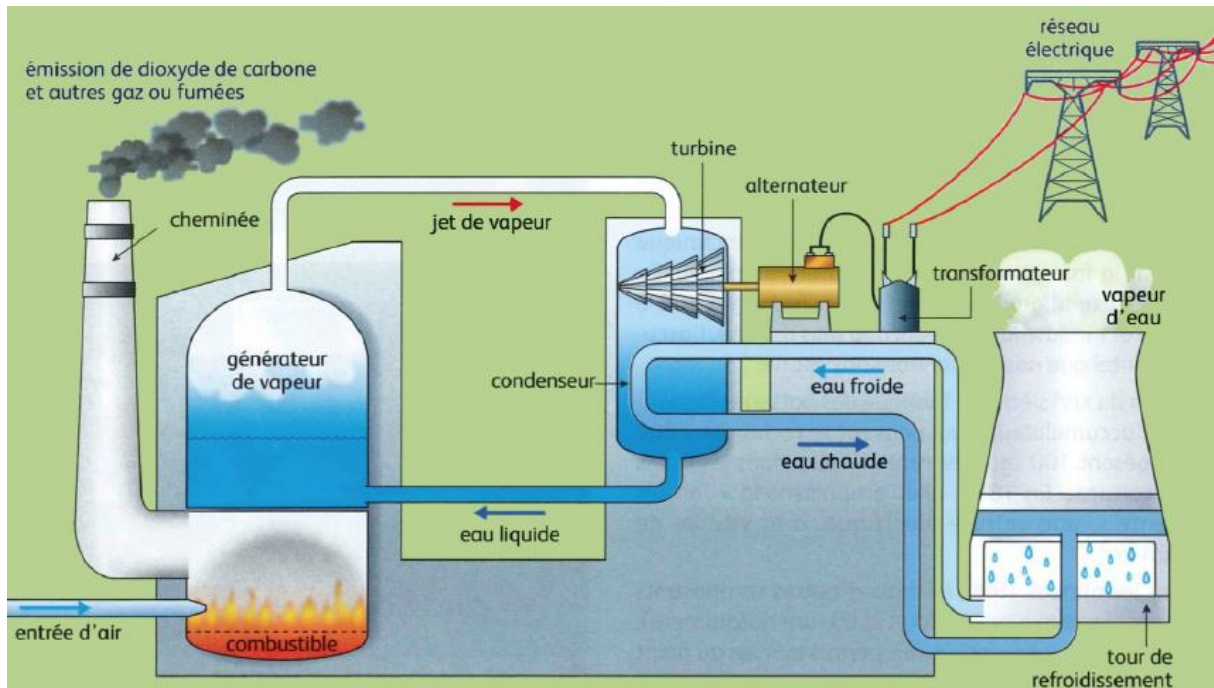


Fig.2 Schéma de principe d'une centrale thermique à vapeur

II .1.2 Principaux éléments constitutifs :

A) Chaudière : appelée aussi **générateur de vapeur**, c'est au niveau de la chaudière que l'eau se transforme en vapeur surchauffée, elle contient les éléments suivants (fig. 3) :

- La chambre de combustion: dont laquelle un combustible est brûlé pour produire l'énergie calorifique qu'il sert à transformé l'eau liquide en vapeur. La chambre de combustion contient de tubes d'eau qui composent les surfaces de chauffe soumise au rayonnement de la flamme.
- Le réservoir de vapeur: dont laquelle se fait la transformation liquide-vapeur saturée.
- Surchauffeur : sert à produire de la vapeur surchauffée à partir de la vapeur saturée sortant du réservoir de vapeur.
- Réchauffeur : il reçoit la vapeur provenant du corps HP (haute pression) de la turbine pour le renvoyé vers les corps MP (moyen

pression) et BP (basse pression). Ceci aide à améliorer le rendement.

- L'économiseur : il reçoit l'eau liquide provenant du condenseur et augmente sa température de certain degré avant de l'envoyer vers le réservoir de vapeur. (pour améliorer aussi le rendement)

En trouve en plus :

- Les Brûleurs: Leurs but est d'engendrer la combustion du combustible (gaz naturel, charbon...) tout en assurant le mélange avec de l'air.
- Système de protection.
- Réchauffeur d'air assurant la récupération de la chaleur des fumées qui facilite la combustion.

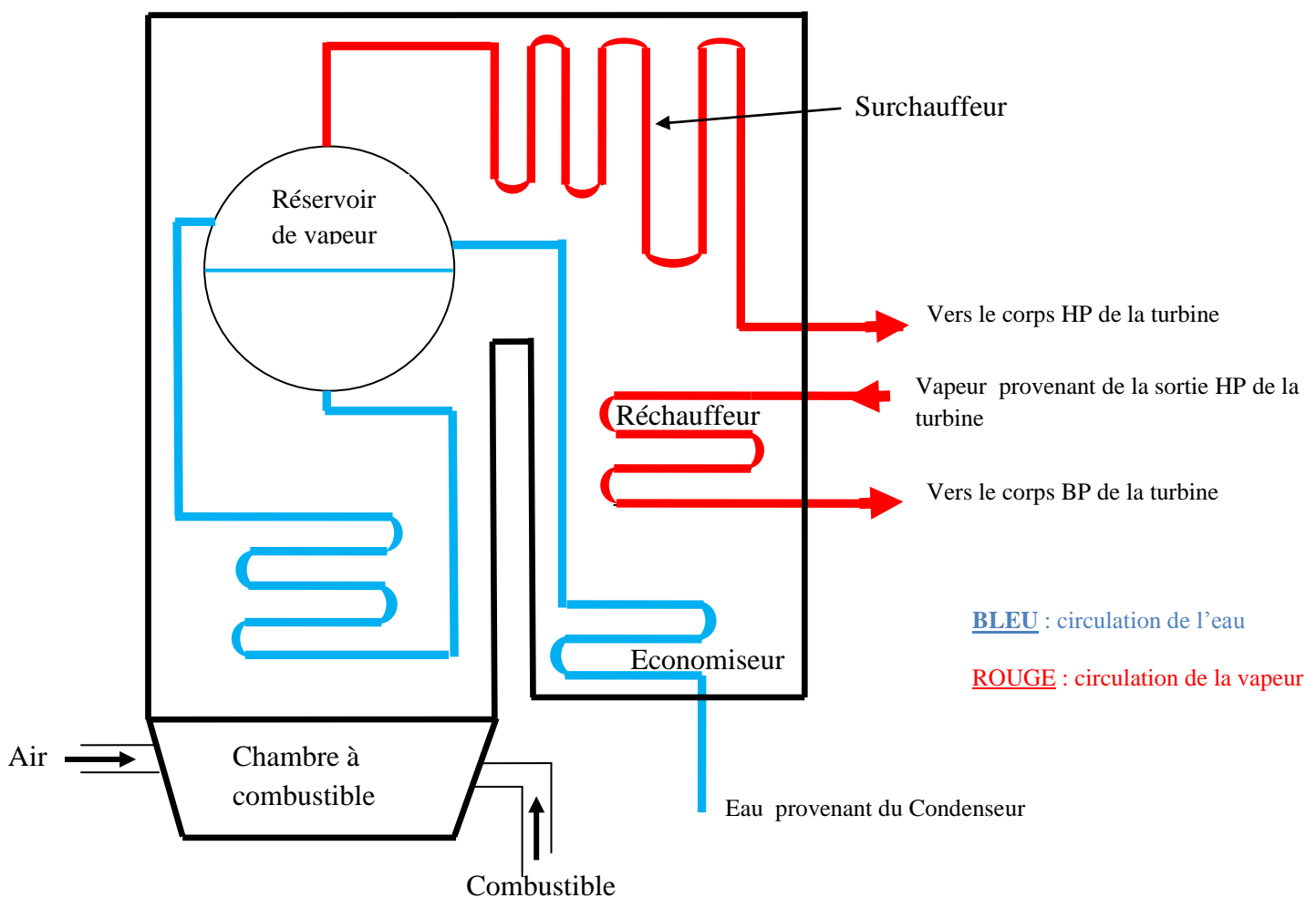


Fig 3 : schéma simplifié d'une chaudière.

B) Les tuyauteries de liaison :

- des tuyauteries pour transporter la vapeur d'eau surchauffée de la chaudière vers la turbine (couleur rouge dans la figure 3).
- des tuyauteries pour transporter de l'eau liquide condensée dans le condenseur vers la chaudière (couleur bleu dans la figure 3).

C) Le condenseur :

Son rôle est de transformer la vapeur sortant de la turbine en eau liquide en utilisant une quantité d'eau de refroidissement qui peut être issu d'une rivière, mer ou encore d'un réservoir d'eau (fig. 4).

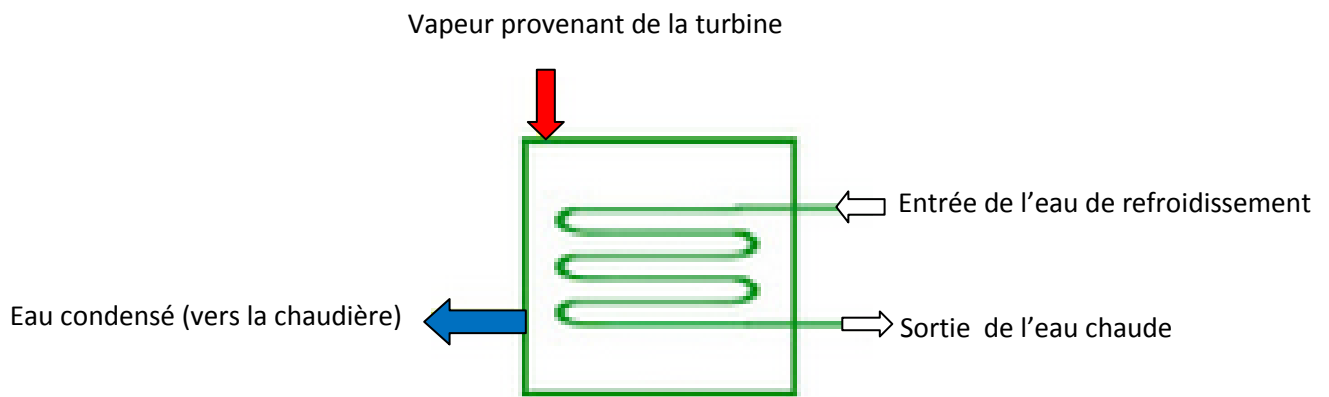


Fig 4 : Schéma simplifier du condenseur

D) La turbine

Une turbine à vapeur est considérée comme *un moteur thermique* qui convertit l'énergie provient de la vapeur d'eau en énergie mécanique. La vapeur se détend et refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique.

La turbine à vapeur comprend une partie fixe appelée stator et partie mobile appelée rotor contenant des aubes (ailettes) mobiles (fig 5) et (fig 6):



Fig. 5 : rotor d'une turbine utilisé dans une centrale thermique

La vapeur en mouvement exerce une pression contre les aubes, entraînant leur rotation

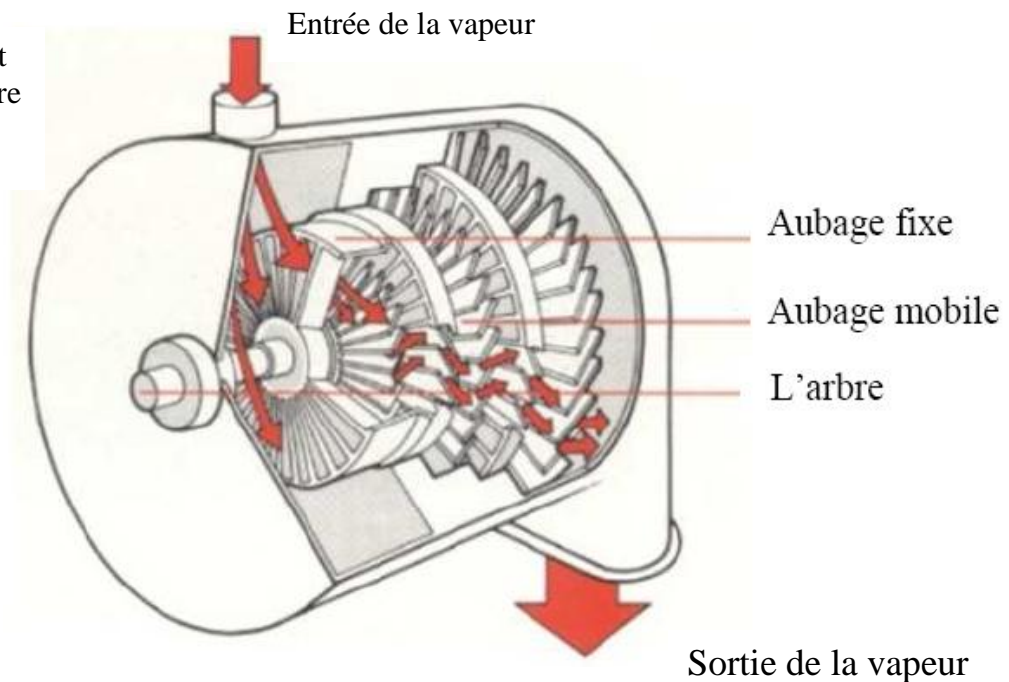


Fig. 6 : schéma d'une turbine

➤ **Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur :**

L'eau s'échauffe et se vaporise sous pression dans la chaudière, la détente de la vapeur haute pression accroît considérablement la vitesse d'écoulement et en résulte de puissants jets de vapeur qui passe entre les aubes de la turbine entraînant un rapide mouvement de rotation. La vapeur étendue et refroidie, va ensuite se condenser dans une enceinte close (condenseur) qui est constamment refroidie extérieurement par une circulation d'eau froide. L'eau

de condensation est renvoyée dans la chaudière ou elle retrouve son état initial ; elle a alors subi un **cycle de transformation**.

Au cours de ce **cycle**, examinons la **masse d'eau considérée** :

- Elle reçoit dans la chaudière **la quantité de chaleur Q_1** pour s'échauffer et se vaporiser.
- Fournit un **travail W** en mettant en mouvement les aubes de la turbine.
- Fournit au condenseur la **quantité de chaleur Q_2** en reprenant l'état liquide.
- Donc, $Q_1 > 0$, $W < 0$ et $Q_2 < 0$

Puisque le système reprend son état initial (**cycle** de transformation),

L'écriture en valeur absolues des quantités de travail et de chaleur échangées entre l'eau et les éléments du système à l'intérieur ou elle évolue :

$$|W| = |Q_1| - |Q_2|$$

On peut dire donc que la quantité de chaleur disparue $|Q_1| - |Q_2|$ est transformée en travail $|W|$, la turbine à vapeur est donc un **moteur thermique** dont l'agent de transformation de la chaleur en travail est **l'eau**.

Principe de Carnot : « Pour transformer de l'énergie calorifique en travail, l'agent d'un moteur thermique doit être en relation avec deux source et avec des températures différentes. De plus, l'agent ne fournit du travail que s'il prend de l'énergie calorifique à la source « chaud » et s'il en rend une partie à la source « froide » ».

Dans le cas de la turbine à vapeur, la chaudière est la *source chaude* et le condenseur est la *source froide*.

➤ **Une turbine peut être à plusieurs corps :**

- a) Pour les centrales à petites puissances (<100 MW) on utilise des turbines à un seul corps.

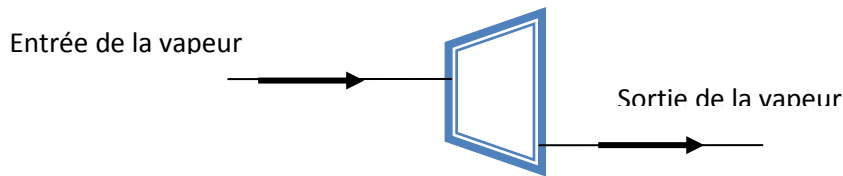


Fig. 7 : turbine à un seul corps.

b) Pour les centrales à grandes puissances ($>100\text{MW}$) on utilise des turbines à plusieurs corps (02 corps par exemple).

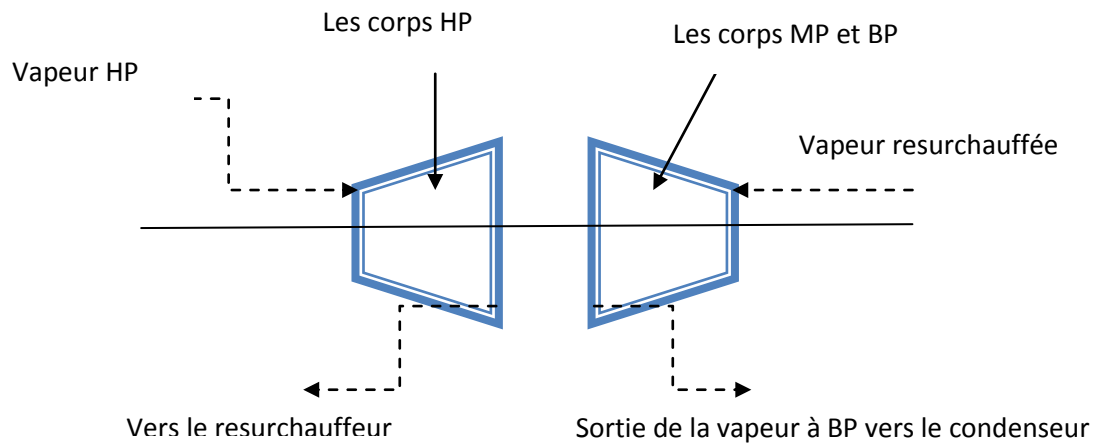


Fig. 8 : Turbine à plusieurs corps.



E) L'alternateur :

Les centrales de production de l'électricité sont équipées d'alternateur triphasé. Un alternateur est constitué d'une partie mobile, le rotor, et d'une partie fixe, le stator (fig.9). L'enroulement du rotor est alimenté en courant continu (électro-aimant), la paroi interne du stator (encoches) comporte des

enroulements triphasés de fils de cuivre. Lorsque le rotor tourne, il se produit une variation du champ magnétique qui induit un système de tension triphasé alternatives dans le bobinage du stator. L'électricité produite est évacuée vers un transformateur qui élève sa tension afin de l'intégrer sur les réseaux de transport électrique.



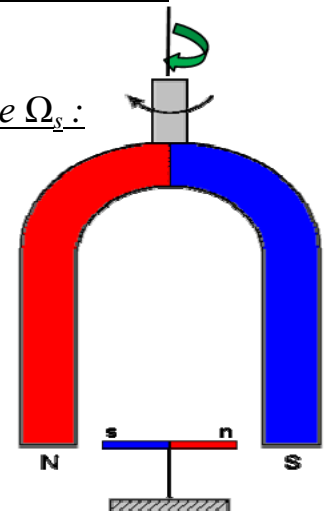
Fig. 9: Turbine et alternateur d'une centrale thermique

L'**alternateur** est une **machines synchrones** fonctionnant en mode générateur :
la vitesse du champ tournant Ω_s est égale à la vitesse de rotation du rotor Ω .

Principe de production du champ tournant pour le fonctionnement alternateur :

Principe : A partir d'un électro-aimant tournant à une vitesse Ω_s :

En fait, Si on entraîne l'aimant en U à l'aide d'un système Mécanique tournant à vitesse constante, l'aiguille Aimantée tourne dans le même sens, à la même vitesse : il s'agit d'une rotation *synchrone*. D'où l'existence d'un champ magnétique tournant.



Constitution de la machine synchrone:

La machine synchrone est constituée essentiellement d'une partie fixe appelée stator et une partie mobile appelé rotor

D'un point de vue construction, Deux type de machines synchrones se présentent :

- Machine synchrone à pôles lisses (fig.10), on trouve les turbo-alternateurs utilisés généralement dans les '**centrales thermiques**')
- Machine synchrone à pôle saillant (fig.11) utilisée généralement dans les **centrales hydrauliques**



Fig. 10: Machine Synchrone à pôle lisses



Fig. 11: Machine Synchrone à pôle saillants

Principe de fonctionnement

Si on fait tourner le rotor (électro-aimant) à la vitesse de synchronisme qui est déterminée par le nombre de pôles de la machine et la fréquence, on aura des FEM induites dans les bobines du stator (induit). C'est le mode de fonctionnement le plus utilisé et dans ce cas elles sont appelées Alternateurs.

- ✓ La vitesse du champ magnétique tournant est égale à la vitesse du rotor est s'exprime :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ en rd/s}$$

Avec : ω : pulsation des courants alternatifs

p : nombre de paire de pôles.

La vitesse de synchronisme n_s en [tr/mn] s'exprime par la relation :

$$n_s = \frac{60.f}{p} \text{ en tr/mn}$$

Avec : f est la fréquence des courants statoriques ($\omega = 2\pi f$).

Si pour avoir une fréquence de **50 Hz** on aura :

P : nombre de paire de pôle	1	2	3	4	5	6	8
Vitesse en tours/minute	3000	1500	1000	750	600	500	375

F) Poste de transformation (fig.10) : chargé de porter le système de tension produite par l'alternateur à la tension du réseau (élévateur de tension).

Le transport de l'énergie électrique qui est souvent en **triphasé** se fait en haute tension pour réduire les pertes, alors que l'alimentation des utilisateurs se fait en moyenne ou basse tension, d'où la nécessité d'employer **des transformateurs triphasés** éleveurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation.



Fig 10 : **Transformateur** à la sortie d'une centrale



On récapitule avec un schéma global de la centrale thermique à vapeur, qui contient les éléments de la chaudière et une turbine à plusieurs corps, on peut suivre avec **les flèches** de la fig. 11, l'écoulement de la vapeur et celui de l'eau.

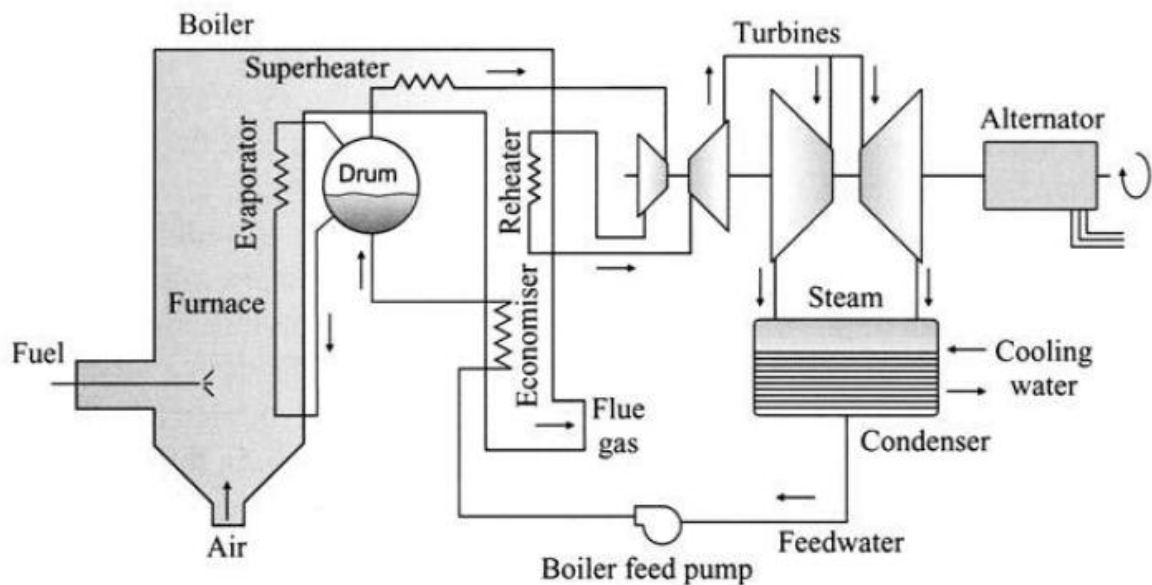


Fig. 11 : Schéma globale simplifié de la centrale thermique

Boiler : Chaudière

Superheater : Surchauffeur

Reheater : Réchauffeur

Steam : Vapeur

Cooling water : Eau de refroidissement

Condenser : Condenseur

Boiler feed pump : pompe d'alimentation de la chaudière

Economizer : Economiseur

Furnace :Four

Drum : Réservoir

Fuel : Carburant

Evaporator : Evaporateur

II. 1.3 Chaine d'énergie d'une centrale thermique

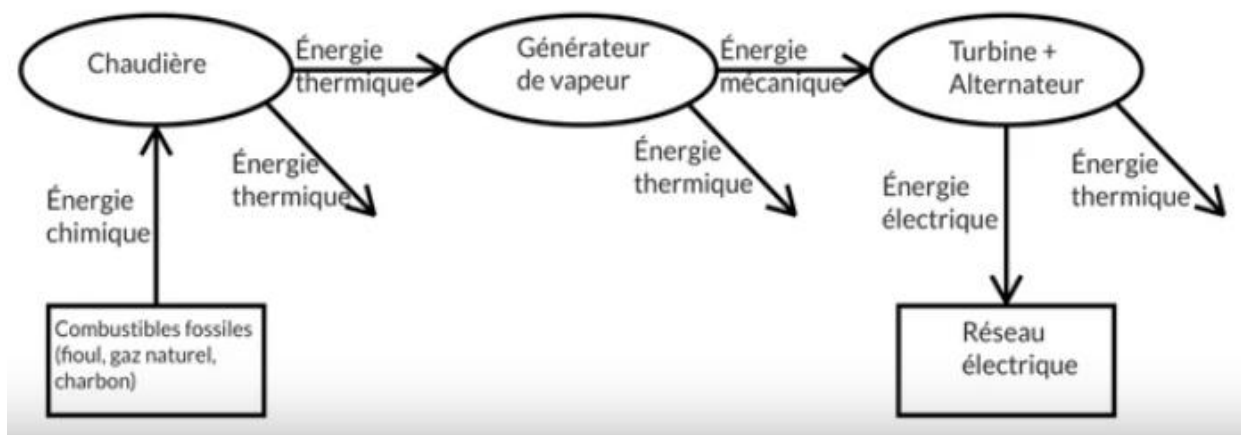


Fig. 11 : Chaine d'énergie d'une centrale thermique

➤ Avantage :

- Cette technologie offre une grande flexibilité d'utilisation qui permet de répondre à la demande.
- considérées comme des centrales de grande puissance.

➤ Inconvénients :

- Cette technologie engendre des émissions de produits polluants

- Le thermique utilise souvent des sources fossiles (charbon, fioul, gaz) dont les réserves sont physiquement limitées et non-renouvelables à court et moyen terme.
- faible rendement par rapport au d'autre type de centrale thermique.

II.2 Les centrales thermiques à combustion (turbine à gaz):

Contrairement à la turbine à vapeur (TV), la turbine à gaz (TG) (appelée aussi turbine à combustion), fonctionne avec un fluide moteur gazeux et donc incondensable. Le combustible utilisé peut être gazeux (gaz naturel) ou liquide. Autrement dit, c'est le gaz produit par la combustion qui fait tourner la turbine.

Le mélange de l'air comprimé avec un combustible (gaz naturel, fioul,...) donne un **gaz à combustion**, ce dernier alimente une turbine dont la rotation fait tourner le rotor d'un alternateur pour produire de l'énergie électrique.

II.2.1 Principe de fonctionnement :

La fig. 12 donne le schéma d'un groupe à turbine à gaz à cycle simple.

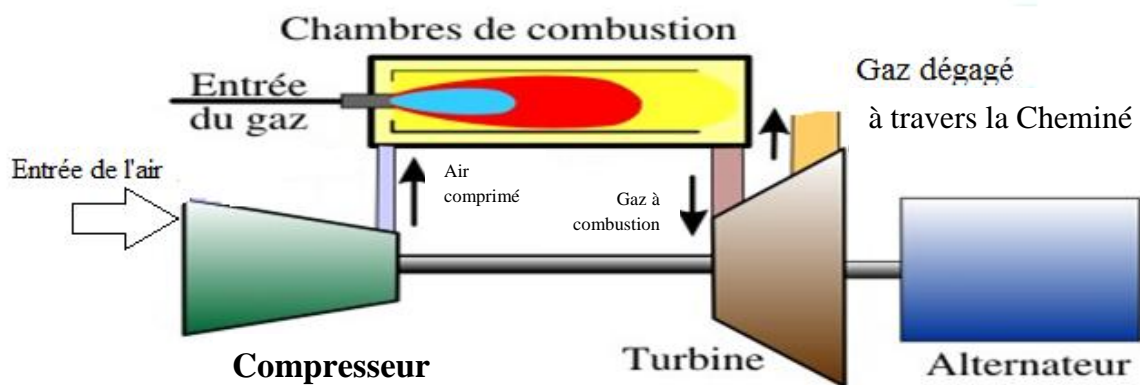


Fig. 12 : Schéma d'un groupe à turbine à gaz à cycle simple

En premier lieu, de l'**air frais** est injecté dans le **compresseur** pour obtenir de l'**air comprimé** à haute pression, cet air comprimé est ensuite propulsé dans la **chambre de combustion** où il sera mélangé avec un **combustible** (gaz naturel,

fioul, kérosène...), une fois allumé, la réaction produit du **gaz chaud à combustion** qui actionne la rotation de la **turbine** avant rejet dans le **cheminée**. La turbine entraine directement **l'alternateur** qui génère de **l'électricité**.

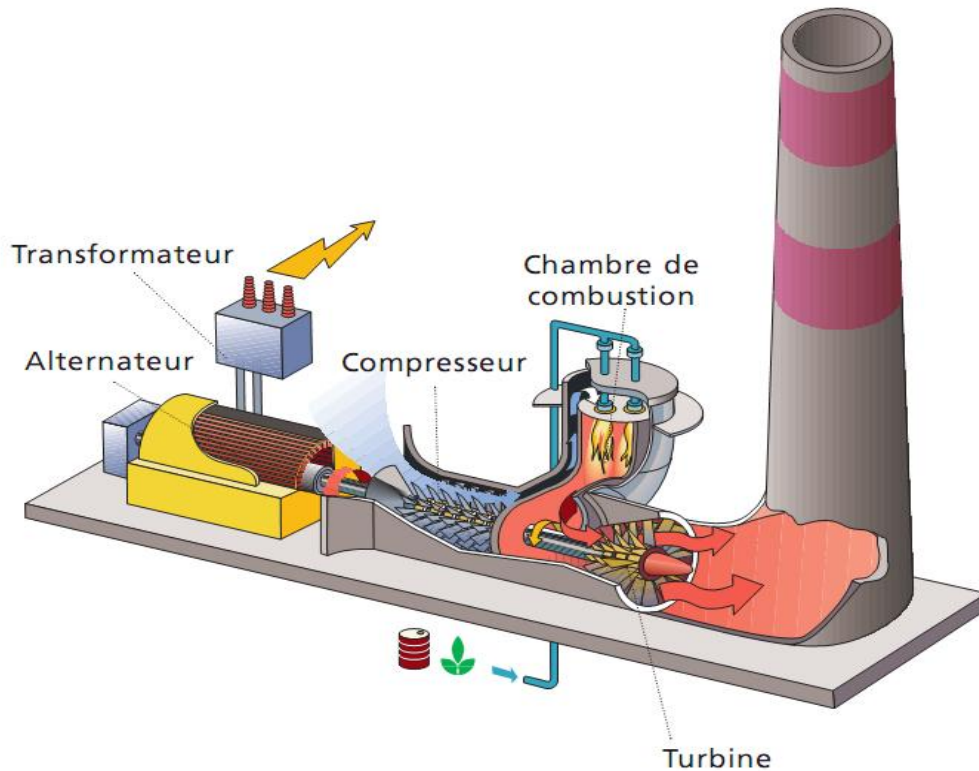


Fig 13 : turbine à gaz pour la production de l'énergie électrique

II.2.2 Principaux composant (fig. 13)

- **Compresseur** : généralement axial, son rôle est de comprimer l'air aspiré de l'extérieur (air ambiant) à une pression relativement élevée (entre 10 et 30 bars environ).

Constitué d'un stator et rotor, le compresseur est multi-étages, Chaque étage de compression est constitué d'une rangée d'ailettes mobil suivie d'une rangée d'aubage fixes.

Cette compression peut être considérée comme adiabatique du fait de l'écoulement à grande vitesse de l'air qui n'a pas le temps d'échanger de la chaleur avec l'environnement.

Cet air comprimé pénètre ensuite dans une chambre de combustion dans laquelle est injecté le combustible.

- **Chambre de combustion :** dans laquelle l'air comprimé est mélangé avec un combustible (gaz naturel). Après enflammations, la température augmente au envient de 1000° C.

Néanmoins, La chambre de combustion doit satisfaire des contraintes sévères telles que :

- 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.
- **Turbine :** généralement axiale, dans laquelle l'air subit une détente de pression et une diminution de température (jusqu'à 500°C), la turbine est actionnée alors par le gaz de combustion, ce qui fournit la puissance pour actionner le compresseur et pour faire tourner un alternateur, ensuite l'air est dégagé à l'extérieur. dans ce cas le cycle de transformation de l'air est donc ouvert.
 - **Alternateur**
 - **Transformateur**
 - **Eléments auxiliaires :** on peut citer parmi eux, le **système de démarrage** (Un dispositif appelé « convertisseur de couple »), système de lubrification, système hydraulique, circuit d'allumage, système de refroidissement, système de protection, capteurs, actionneurs, détecteurs, électrovannesetc.

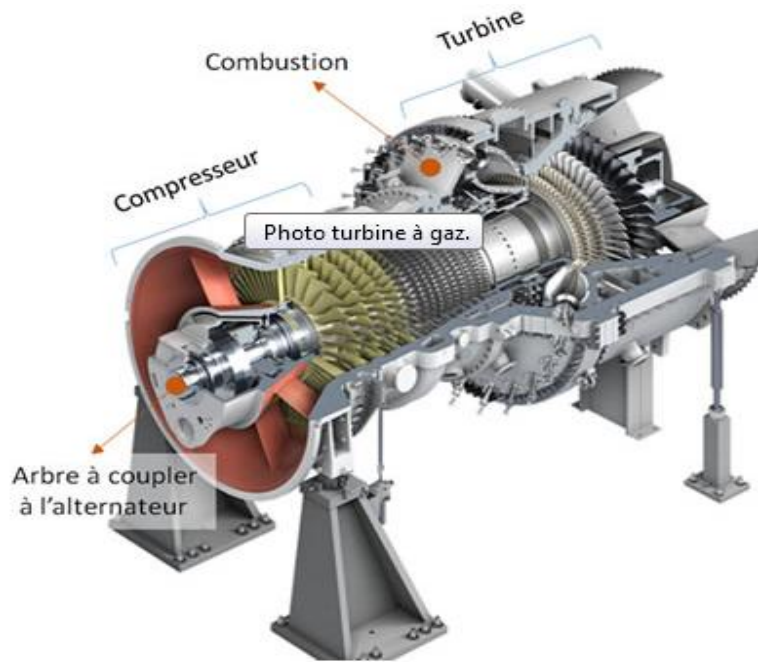


Fig. 14 : photo d'une turbine à gaz

II.2.3 Cycle avec régénération :

Le rejet à l'atmosphère des gaz d'échappement qui sont encore à température élevée, représente des pertes potentielles dans un cycle de turbine à gaz.

Dans un cycle à régénération, et afin d'augmenter le rendement, on réchauffe partiellement l'air comprimé avant entrée dans la chambre de combustion, ce qui réduit d'autant la consommation de combustible. Il suffit pour cela d'insérer un **échangeur de chaleur** entre les gaz d'échappement et l'air comprimé (fig. 15).

Échangeur de chaleur :



La récupération de la chaleur des gaz de combustion en utilisant des échangeurs de chaleur pour gaz de combustion assure un équipement de procédé plus efficace puisque l'énergie provenant de la chaleur, qui s'échappe normalement par les conduits ou la cheminée, est réutilisée.

Avantage des échangeurs de chaleur pour gaz de combustion ;

- Procédé de production plus efficace
- Réduction de la pollution atmosphérique (déchets combustibles toxiques)
- réduction de la consommation d'énergie
- coûts de fonctionnement réduit.

Il est à noter que la régénération ne peut être effectuée que si la température de sortie turbine est supérieure à la température de sortie compresseur.

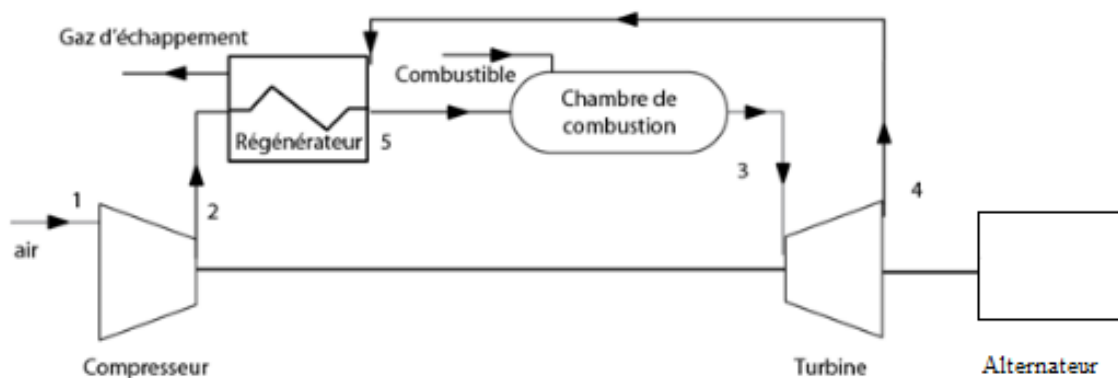


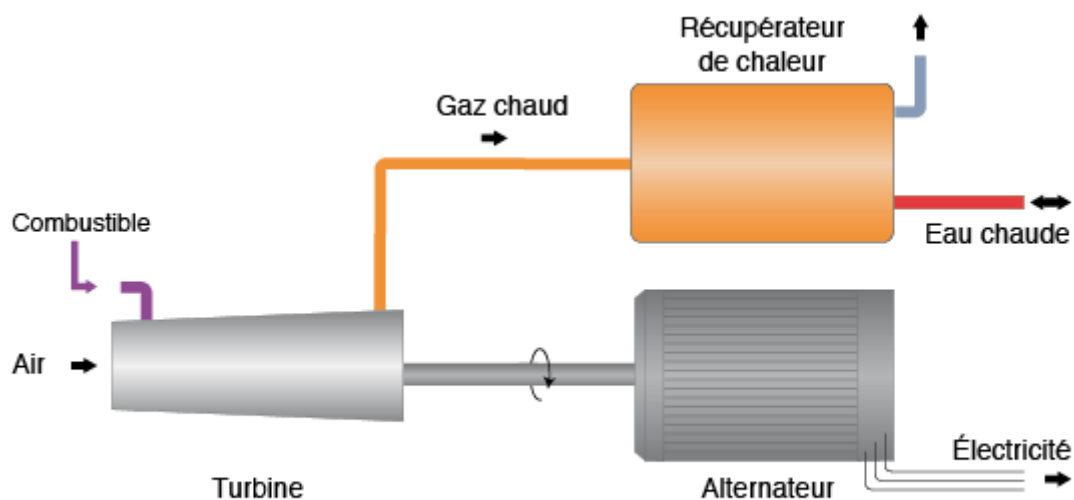
Fig. 15 : Cycle de turbine à gaz à régénération

➤ **Remarque :**

Les gaz chauds en sortie (d'échappement) de la turbine possèdent un niveau d'énergie suffisant qui peut être exploité dans une chaudière de post combustion en produisant de la vapeur.

Aussi les turbines à combustion sont souvent accompagnées d'une installation qui récupèrent une partie de la chaleur des ces gaz d'échappement en assurant ainsi une **cogénération**.

II.2.4 La cogénération



Les centrales thermiques dites à cogénération permettent de produire de la chaleur en plus de l'électricité, avec un meilleur rendement énergétique global. En effet, La chaleur dégagée lors de la production d'électricité est récupérée pour chauffer des locaux ou utilisée pour alimenter des procédés industriels. Cette production combinée permet d'économiser 15 à 20% d'énergie primaire par rapport à la production séparée des mêmes quantités de chaleur et d'électricité. En plus, elle réduit de façon significative les émissions de CO2.

La cogénération est donc une manière de valoriser les pertes d'énergie et d'optimiser l'efficacité énergétique d'un système.

II.2.5 Avantage et inconvénients de la centrale à combustion

➤ **Avantage:**

- Mise en marche rapide.
- Elle ne nécessite pas un système de condensation.

➤ **Inconvénients**

- Débit élevé de gaz d'échappement chauds (lors de l'utilisation en cycle ouvert).
- Nécessité d'un démarrage auxiliaire.
- Niveau de bruit élevé.

II.3 Centrale thermique à cycle combiné

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur deux cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une **turbine à combustible (TG)**: le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la turbine à combustible alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec une **turbine à vapeur (TV)**.

Les **centrales à cycle combiné** présentent l'avantage d'atteindre **des rendements élevés**, notamment par rapport aux turbine à combustion en cycle simple, ils permettent de réduire les émissions atmosphériques (dioxyde de carbone, oxyde d'azote, oxydes de soufre). Ces nouvelles installations contribuent aussi à améliorer les performances environnementales (fig. 16).

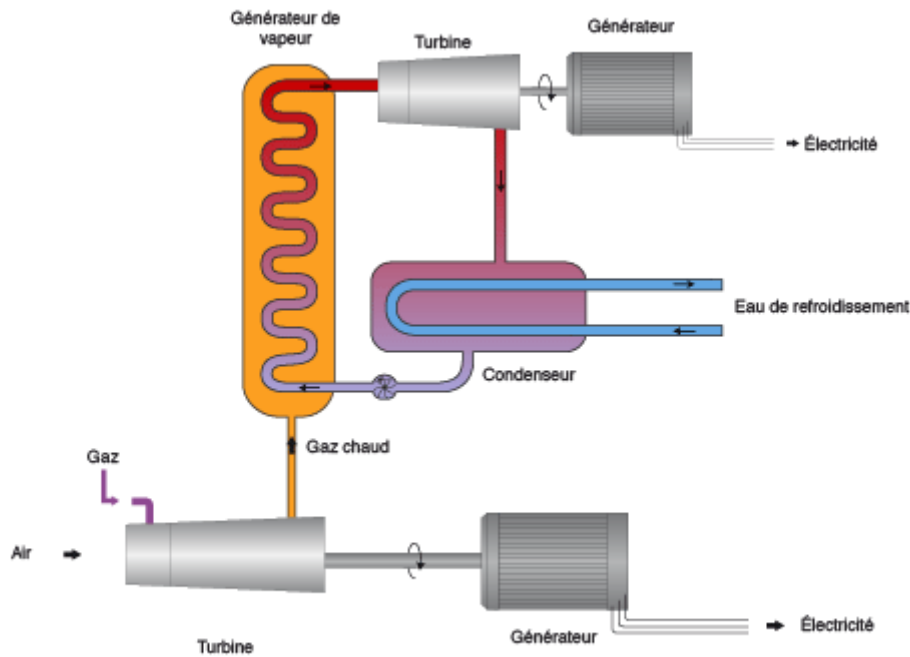


Fig.16 : Centrale thermique à cycle combinée

II.3.1 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de la centrale thermique à cycle combiné (fig. 16) est récapitulé dans les points suivants :

- ❖ Le compresseur comprime l'air aspiré de l'extérieur.
- ❖ Le mélange, air comprimé et un combustible (gaz naturel) s'enflamme pour avoir des gaz chauds de combustion.
- ❖ Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (TG) pour la faire tourner.
- ❖ La turbine fait tourner le rotor de **l'alternateur 1** pour produire de l'électricité.
- ❖ Les gaz chauds d'échappements de la turbine à gaz (TG) sont injectés dans la chaudière de la turbine à vapeur pour chauffer de l'eau afin de produire une vapeur.
- ❖ Cette vapeur fait tourner une turbine à vapeur (TV) qui entraîne **l'alternateur 2** produisant à son tour de l'électricité.

- ❖ La vapeur en sortie du corps de la turbine (TV) est envoyée vers un condenseur dans lequel circule de l'eau froide. Cette vapeur se transforme en eau, qui est récupérée et renvoyée à nouveau dans la chaudière.
- ❖ L'électricité produit par les deux alternateurs est injectée dans le réseau de haute tension à l'aide d'un transformateur de puissance.

II.3.2 Avantage d'une centrale à cycle combiné par rapport à une centrale à combustion et à vapeur:

- **Amélioration du rendement.** En effet, Dans une turbine à gaz en cycle ouvert, 2/3 de l'énergie introduite sous forme de combustible est perdue dans les fumées.

Le rendement de la centrale thermique à combustion à cycle ouvert :

$$\eta = \frac{\text{énergie électrique TG}}{\text{énergie fournie}}$$

Pour une centrale thermique combinée, le nouveau rendement est :

$$\eta = \frac{\text{énergie électrique TG} + \text{énergie électrique TV}}{\text{énergie fournie}}$$

Les plus récentes centrales à cycle combiné au gaz atteignent des rendements de plus de 60 %

- Capable de monter à pleine puissance en un temps réduit et peut répondre aux fortes variations de consommation.
- Réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), d'oxydes d'azote (NOX) et de dioxyde de soufre (SO₂).