

II-1 Introduction

Le cycle de la turbine à gaz est constitué d'une série de transformations qui se succèdent jusqu'à l'obtention de l'énergie électrique qui est l'objectif de ce moteur thermique. Cette série de transformations commence par une énergie primaire, qui est l'énergie chimique, sur laquelle nous agissons pour faire varier l'énergie finale, qui est l'énergie électrique.



a) Energie chimique

L'énergie chimique est l'énergie primaire constituée du combustible d'une part et de sa combinaison avec l'oxygène d'une autre part. En présence d'une étincelle ou d'une flamme, elle se transforme en énergie calorifique.

b) Energie calorifique

L'énergie calorifique est issue de l'énergie chimique par l'entretien d'une flamme. Elle permet de faire monter la température des gaz de combustion qui seront dirigés vers la turbine pour se transformer en énergie cinétique.

c) Energie mécanique

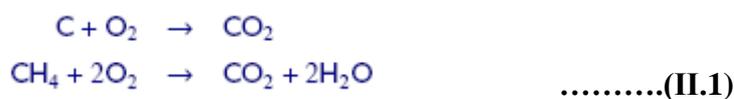
L'énergie mécanique est obtenue par un couple sur le rotor de la turbine. Ce couple est produit par l'intermédiaire d'une autre énergie qui est l'énergie cinétique, produite par la détente des gaz et récupérée par le rotor de la turbine sous forme d'énergie mécanique.

d) Energie électrique

L'énergie électrique est fournie par l'alternateur à la suite de la transformation de l'énergie mécanique sous forme de couple et l'excitation de son rotor.

II-2 Les réactions de combustion :

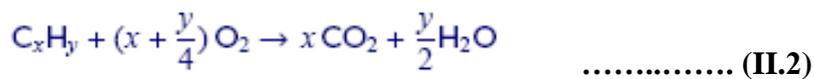
Les réactions de combustion, comme toutes les réactions chimiques, se font sans variation de masse de chacun des éléments. Les équations chimiques qui décrivent ces réactions doivent donc satisfaire cette contrainte. À titre d'exemple, les réactions de combustion du carbone et du méthane sont respectivement :



On distingue dans une telle réaction, les réactifs, qui subissent la réaction, que l'on sépare en combustible, qui est l'agent réducteur, tels que ceux mentionnés à la section précédente, et comburante, qui est le corps contenant l'agent oxydant, le plus fréquemment l'air.

Les produits de la combustion d'hydrocarbures comprennent du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau, qui selon les conditions de pression et de température, pourra être sous forme liquide ou vapeur.

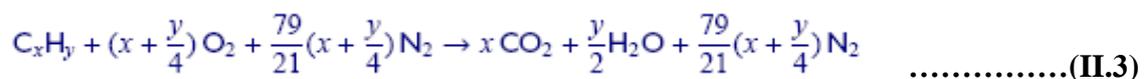
Pour un hydrocarbure composé uniquement de carbone et d'hydrogène, de formule C_xH_y, la réaction de combustion s'écrit :



La réaction est dite complète si les gaz brûlés ne comprennent que des produits complètement oxydés.

En réalité, plusieurs produits intermédiaires sont formés au cours d'une combustion réelle et qui s'avèrent importants en pratique, en particulier pour les problèmes de pollution.

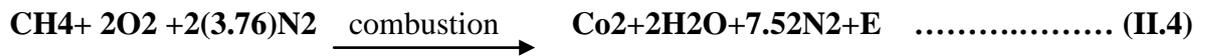
Dans la plupart des cas, comme on l'a mentionné précédemment, le comburant utilisé est l'air, plutôt que l'oxygène pur. La composition de l'air est approximativement, en fractions molaires, 21% d'oxygène, 78% d'azote, et 1% d'argon. (En réalité, aux hautes températures atteintes dans les moteurs thermiques, l'azote réagit avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote, qui constituent une source de pollution), et pour simplifier on considère que l'air est composé de « 21% d'oxygène et de 79% d' azote atmosphérique » auquel on attribue une masse molaire fictive pour tenir compte de la présence d'argon. La réaction de combustion d'un hydrocarbure avec l'air devient donc :



II-2-1 Principe de la combustion :

L'évolution de la combustion fait intervenir l'oxydation des composants du combustible qui peuvent être oxydés, elle peut donc être représenté par une équation chimiques pendant la combustion la masse de chaque élément de meure la même suivant le principe de conservation de la masse. Dans l'évaluation de la combustion, l'oxygène est fournie par l'air, on considère que l'air se composé de 21% de O₂ et 71% de N₂ cette hypothèse conduit à la conclusion que pour

chaque mole d'oxygène il y'a $\frac{79}{21}=3.76$ mole d'azote par conséquent lorsque l'oxygène provient de l'air pour la combustion de méthane la réaction s'écrit comme suite :



La pression et le débit du gaz sont assurés par deux vannes :

- Vanne d'arrêt et de détente du gaz (VSR).
- Vanne de réglage du débit gaz (VGC).

Ces vannes sont pilotées chacune par un ensemble comportant un relais hydrauliques et une électrovanne asservie par (électro – hydraulique) un système de régulation appelé SPEEDTRONIC.

II-2-2 Chambre de combustion:

Les chambres de combustion en barillet (dans notre cas) dans les turbines à gaz ont un nombre variant de 7 à 14 selon la puissance de la turbine (7 pour FIAT et 14 pour ALSTHOM). Ces chambres sont disposées concentriquement autour de la partie échappement du compresseur. Elles sont boulonnées sur la cloison de la section de refoulement du compresseur L'air nécessaire à la combustion est fourni directement du compresseur axial. Le combustible est injecté dans les chambres de combustion.

Les corps des chambres de combustion sont munis de pattes usinées permettant le montage des bougies d'allumage et des détecteurs de flamme. Les tubes de flamme comportent en plus des trous de refroidissement des trous de passage à travers lesquels passent les bougies d'allumage et les détecteurs de flamme.

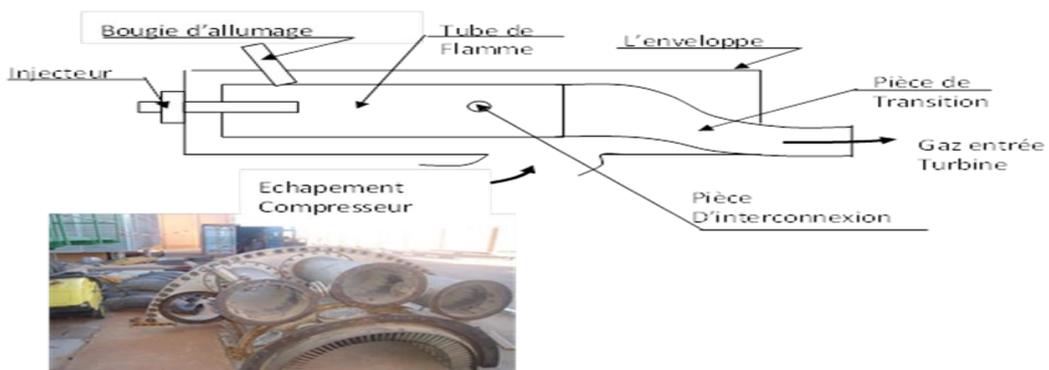


Figure II-1: les chambres et Les enveloppes des chambres de combustion

Les chambres de combustion sont reliées entre elles par des tubes d'interconnexion. Toutes les chambres ne sont pas identiques car il y a celles qui reçoivent les bougies d'allumage (2 chambres), celles qui reçoivent les détecteurs de flamme (2 ou 4 chambres).

II-2-3 Les Composantes:

La chambre de combustion est composée de :

1-Carter des chambres de combustion : C'est une enveloppe qui permet de diriger l'air à la sortie du compresseur vers l'enveloppe intermédiaire des chambres de combustion



Figure.II-2:Carter des chambres de combustion

2-Le tube de flamme ou chemise :

C'est un tube cylindrique fermé d'un seul côté avec un chapeau qui supporte l'injecteur, le tube est percé avec des trous calibrés pour assurer la combustion correcte du combustible. Le tube est divisé en trois zones :

- ✓ **Zone de réaction :** mélange l'air avec le gaz pour assurer la combustion.
- ✓ **Zone de refroidissement :** une série de trous disposés le long de tube.
- ✓ **Zone de dilution :** des trous servant à introduire de l'air afin de refroidir les gaz chauds à la température désirée.

3-Enveloppe intermédiaire Entoure chaque tube de flamme, elle sert à guider le débit d'air d'échappement du compresseur vers le chapeau de tube de flamme. Il joue le rôle d'un déflecteur.

4- Pièce de transition

Dirigent les gaz chauds vers la première directrice de la turbine, ils sont accrochés au corps d'échappement du compresseur ; et d'autre part fixé sur l'anneau de retenue de la première directrice turbine.



FigureII-3 : La pièce de transition

5- Les bougies d'allumage

Permet de produire une étincelle qui provoque l'allumage.

L'électrode de la bougie est alimentée par le transformateur d'allumage, après l'allumage l'électrode est rétractée quand la pression des gaz chauds augmente dans les chambres

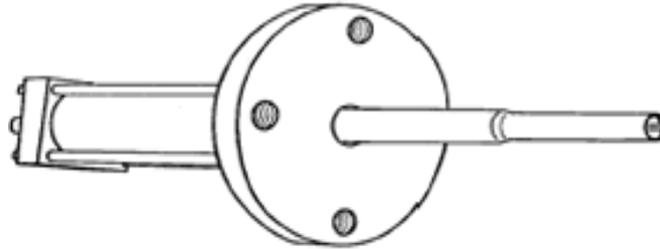


Figure.II-4 Bougie d'allumage.

6- les détecteurs de flamme

Deux détecteurs d'ultraviolet sont montés dans les chambres qui portent les numéros 5 et 6, Une fois la flamme est détectée un signal électrique est envoyé au système SPEEDTRONIC.

7- Tubes d'interconnexion

Ils relient les 14 chambres afin de permettre à la flamme de se propager aux autres chambres non encore allumées.



Figure.II-5 : Tubed'interconnexion

8- Injecteurs de combustible :

Le combustible gazeux est introduit dans chacune des chambres par un injecteur dont le rôle est aussi du mélange à la quantité correcte d'air de combustion.

Le gaz qui pénètre dans l'injecteur est dirigé à travers des orifices situés dans le chapeau de façon que l'injecteur répartisse le gaz dans la zone de réaction du tube de flamme.



Figure.II-6 : Injecteurs de combustible.

II-3 Caractéristiques des chambres :

Désignation	Groupe ALSTHOM	Groupe FIAT
Chambres de combustion	14 chambres	08 chambres
Détecteurs de flamme	02 détecteurs [ch4 et ch5] aux ultraviolets	04 détecteurs [ch7 et ch8] aux ultraviolets.
Bougies d'allumage	02 Bougies [ch12 et ch13] électrodes rétractables	02 bougies [ch3 et ch4] électrodes rétractables
Pression du gaz	18 à 20 bars	15 bars
Tension d'alimentation des bougies	15 KV	6 KV
Pièces de transition	14 pièces	08 pièces
Les injecteurs	14 injecteurs	08 injecteurs

Tableau II.1 : caractéristiques techniques.

II-3-1 Principe de fonctionnement :

Le flux d'air à haute pression (8 à 14 bars selon la puissance des groupes) provenant du compresseur est refoulé dans l'espace annulaire établi à l'arrière du corps de refoulement du compresseur. L'air pénètre dans l'enveloppe externe de la chambre de combustion et s'écoule vers l'avant contrairement à son sens avant son introduction dans le tube de flamme.

L'air pénètre par des trous calibrés (ou fentes) dans les tubes de flamme. Une partie de cet air arrive jusqu'au chapeau du tube, elle sert de comburant (appelé air primaire), l'autre partie sert au refroidissement du tube de flamme, de la paroi interne de la chambre de combustion et de la pièce de transition. ; Le flux d'air entrant dans la chambre de combustion remplit trois fonctions :

- 1- Oxydation du combustible par l'intermédiaire du (comburant)
- 2- Refroidissement des pièces métalliques (tube de flamme, pièce de transition, tube d'interconnexion)
- 3- Dilution des produits de combustion (homogénéité) des gaz à une température convenable à l'entrée de la turbine.

II-3-2 Contrôle de la combustion :

Le contrôle de la combustion assuré par le système de régulation (SPPEDTRONIC) suivant le régime de fonctionnement en agissant sur les vannes VSR et VGC. Cette régulation englobe le système intégré de température (ITS) qui surveille les températures d'échappement et analyse cette répartition de température afin de déterminer les conditions de fonctionnement du système de combustion.

II-4-La Turbine:

II-4.1 Description:

La turbine c'est la partie dans laquelle l'énergie engendrée par les gaz chauds sous pression venant du système de combustion « Énergie thermique » est transformée à un travail utile pour entraîner le rotor « Énergie mécanique ».

Elle entraîne à la fois le compresseur, l'alternateur et le réducteur des auxiliaires. La turbine comporte trois (03) étages, chaque étage est composé des directrices (aubes fixes) suivie d'une roue (aubes mobiles).



Figure. II-7 : Turbine à gaz.

II-4-2 Principe de fonctionnement :

1) ROTOR :

Le rotor compose de :

1. Arbre avant : s'étend de la bride arrière de liaison au rotor compresseur à la face avant de la 1^{ère} roue turbine. Il comporte la fusée du palier N°2.

2. Arbre Arrière : S'étend de la 3^{ème} roue à la bride avant de l'accouplement avec le rotor alternateur il comporte la fusée du palier N°03.

3. Roue turbine : Composé de trois (03) roues, chaque roue porte des aubes sur son périmètre. La longueur des aubes est de plus en plus longue en partant de la 1^{ère} à la 3^{ème} roue.

Les roues sont séparées avec des entretoises (entre 1^{ère} et 2^{ème} roue et entre le 2^{ème} et la 3^{ème} roue). L'ensemble est maintenu par 12 tirants formant le rotor turbine.

Les faces des entretoises comportent des fentes radiales pour le passage de l'aire de refroidissement.

Les aubes de la 1^{ère} et la 2^{ème} roue comportent des fentes longitudinales pour le refroidissement.

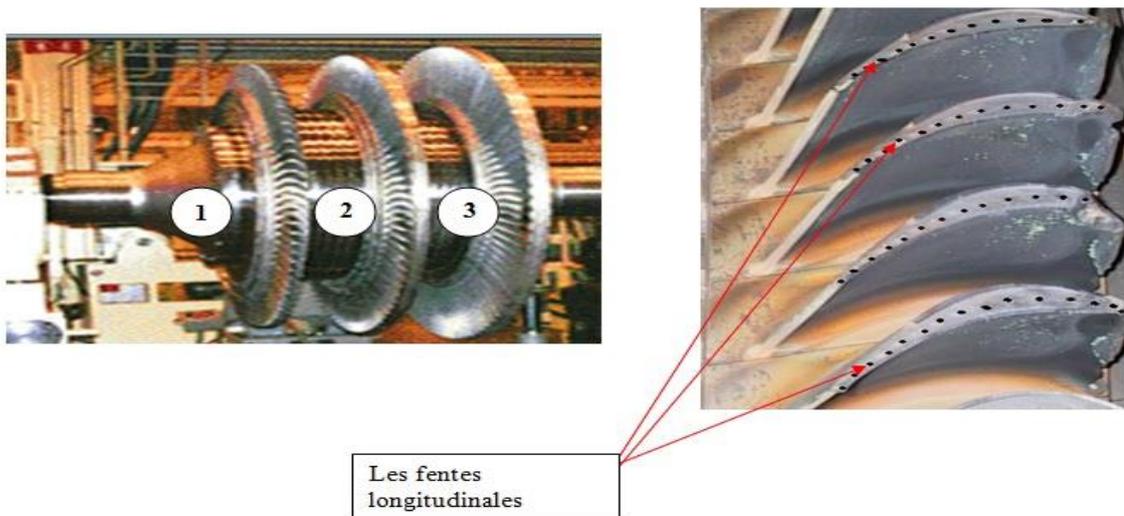


Figure.II-8 : les étages de la turbine.

2) STATOR :

Le stator de la turbine comporte le corps turbine et le cadre d'échappement.

Corps turbine :

Il assure les positions axiale et radiale des directrices et des segments de protection ainsi que les jeux par rapport aux aubes turbine.

Le corps turbine est placé entre le corps d'échappement et le carter des chambres de combustion.

Il dirige les gaz chauds sur les aubes des roues de chaque étage (rotor turbine).

En trouve trois catégories de Directrice :

1. Directrice 1^{ère} étage : Reçoit les gaz chauds à la sortie des pièces de transition. Elle est formée de 18 segments, chaque segment comprend deux aubes,

2. Directrice 2^{ème} étage : Formée de 16 segments de trois (03) aubes chacune, elles reçoivent l'air de la 1^{ère} roue.

3. Directrice 3^{ème} étage : Formée de 16 segments de quatre (04) aubes chacune, elles reçoivent les gaz chauds de la 2^{ème} roue.

Des diaphragmes placés sur les périmètres intérieurs des directrices 2^{ème} et 3^{ème} étages.

Des segments de protection montés sur une surface circulaire du corps turbine, la fonction de ces segments est de :

- Réduire les jeux avec les sommets des aubes mobiles pour minimiser les fuites des gaz chauds « amélioration du rendement ».
- Servir d'écrans thermiques et séparant les gaz chauds du corps turbine.

• Cadre d'échappement :

- Il permet de guider les gaz chauds sortant de la 3^{ème} roue vers le diffuseur.
- Il est formé d'une partie intérieure et une partie extérieure reliées par 10 entretoises radiales.
- Il est formé d'une partie intérieure et une partie extérieure reliées par 10 entretoises radiales.
- La partie intérieure supporte le palier N°3.

Le palier N° 03 comprend deux (02) bagues flottantes et cinq (05) labyrinthes d'étanchéité (l'étanchéité se fait par de l'air extrait du compresseur « 4^{ème} étages »)

- Refroidissement du corps turbine

Le corps turbine est refroidi par de l'air prévenant des ventilateurs placés à l'extérieur de l'enceinte de la turbine.

L'air circule dans des passages aménagés dans le corps turbine qui se prolongent dans le cadre d'échappement, Il refroidit notamment la face arrière de la dernière roue de la turbine.

II-5- Principe de fonctionnement d'une tranche de production :

Dès que la ligne d'arbre est mise en mouvement par le moteur de lancement, l'air atmosphérique est aspiré, filtré et dirigé à travers les gaines d'admission vers l'entrée du compresseur axial à (17 étages – Alsthom -18 étages- Fiat).

A la sortie de compresseur, l'air pénètre dans un espace annulaire entourant les 14 chambres (Alsthom), 08 chambres (Fiat) de combustion puis dans l'espace situé entre l'enveloppe des chambres et les tubes de flamme.

Le combustible est introduit par les injecteurs dans chacune des chambres de combustion où il est mélangé à l'air de combustion provenant du compresseur. La mise à feu est réalisée par deux bougies d'allumage (mais une seule suffit pour réaliser la mise à feu), chacune de ces deux bougies équipé une chambre de combustion déterminée. La combustion se propage dans les autres chambres à travers les tubes d'interconnexion qui les relient entre elles au niveau de la zone de combustion quand la turbine atteint sa vitesse nominale.

Les gaz chauds venant des chambres de combustions traversent les trois étages turbines, chaque étage est constitué par un ensemble d'aubes fixes suivi d'une rangée d'aubes mobiles. Dans chaque rangée d'aubes fixes, l'énergie cinétique du jet de gaz augmente tandis qu'apparaît une diminution de la pression dans la rangée adjacente d'aubes mobiles, une partie de l'énergie cinétique du jet est convertit en travail utile transmis au rotor de la turbine.

Le travail fourni au rotor de la turbine sert à faire tourner l'alternateur et en partie à l'entraînement du compresseur axial et des auxiliaires de la turbine. Par définition un alternateur est une machine électromagnétique destinée à fournir un courant alternatif.

Il est composé principalement d'une partie fixe appelée stator et qui est solidaire du massif et d'une partie mobile tournante appelée rotor accouplé à celui de la turbine par des brides.

Ces deux parties comportent un circuit magnétique et sont séparées par un espace vide permettant la rotation appelée l'entrefer.

Le rotor support l'enroulement qui crée le champ magnétique (inducteur) et le stator contient l'enroulement où apparaît la puissance électrique (induit).

Le champ magnétique est créé par la rotation du rotor correspondant à la vitesse nominale de la turbine qui est de 3000 tr / mn.

A cette vitesse, le champ magnétique qui est la conséquence d'une puissance mécanique est transformé en puissance électrique au niveau des bornes du stator qui est le siège de puissance électrique qui doit être évacuée vers l'extérieur.

II-5-1 Cycle thermodynamique :

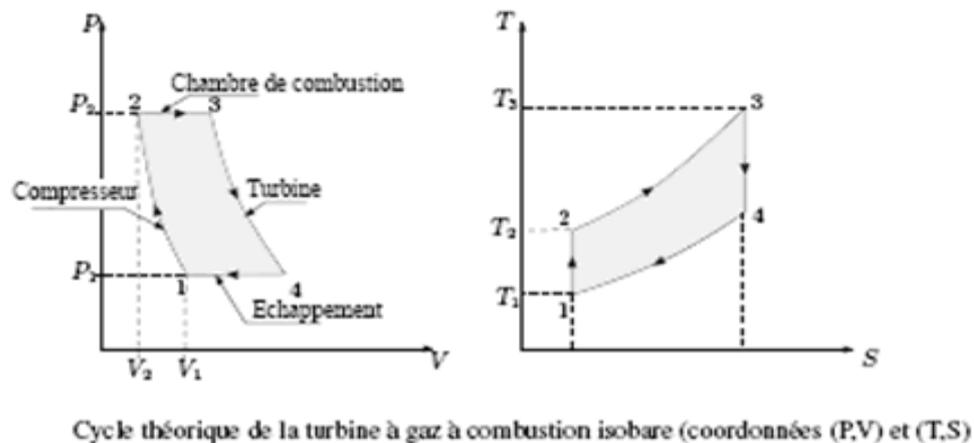
Le cycle thermodynamique peut être divisé en trois phases, l'atmosphère se chargeant de la quatrième.

La première phase est la compression, la seconde correspond à l'apport de chaleur dans la chambre de combustible. Une partie de l'air comprimé (de l'ordre de 30 %) est utilisé pour la combustion du combustible gazeux ou liquide, le reste permet de refroidir les parois de la chambre de combustion et mélangé aux gaz chaud ramène la température à une valeur admissible pour la turbine à gaz. la troisième phase est constituée par la détente gaz chaud.

I) Cycle théorique à compression et détente isentropique:

Considérons un cycle sans pertes et admettons la chaleur spécifique du fluide indépendante de la température. Le cycle donne la représentation de cette évaluation sur le **diagramme entropique**.

Le cycle théorique est communément appelé cycle de Brayton réversible.



- 1 à 2 : compression isentropique,
- 2 à 3 : combustion isobare,
- 3 à 4 : détente isentropique.

Figure II-9: Cycle théorique à compression et détente isentropique [3].

II-5-2 Bilan massique de cycle:

Travail massique absorbé par le compresseur: $W_C = C_P (T_2 - T_1)$

Chaleur massique fournie à la combustion: $Q_{23} = C_P (T_3 - T_2)$

Travail massique récupéré sur la turbine : $W_T = C_P (T_3 - T_4)$

Rendement thermique du cycle:

$$\eta_{th} = \frac{W_{utile}}{Q_{fournie}} = \frac{W_T - W_c}{Q_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \dots\dots\dots(II.6)$$

Autre formulation: on introduit deux grandeurs caractéristiques:

$$\lambda = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\tau = \frac{T_3}{T_1}$$

En remarquant que $p_3=p_2$ et $p_4=p_1$, on démontre facilement que $T_3/T_4=\lambda$ et $T_4= T_1 \tau/\lambda$

II) Cycle irréversible :

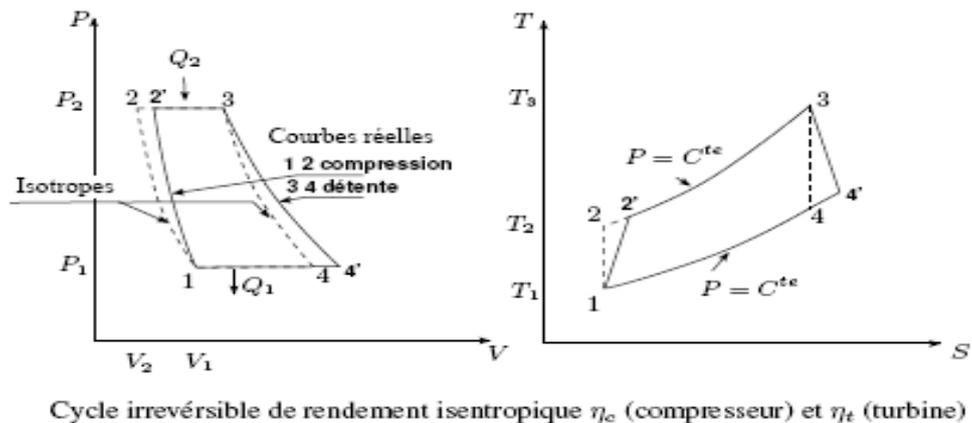


Figure II-10 Cycle irréversible [3].

En réalité, le cycle est irréversible: il est représenté par 1-2' -3 - 4' :

- la compression est adiabatique, de rendement isentropique η_c : en raison de travaux de frottement la température réelle est plus élevée que la température théorique, la courbe de compression n'est plus l'isotherme 1-2 mais l'arc 1-2' tel que $T_2' > T_2$.

- La détente dans la turbine est adiabatique de rendement isentropique η_t : en raison des travaux de frottement la détente ne s'effectue pas suivant un arc tel que $T_4' > T_4$.

- On considère que les caractéristiques γ et C_p sont conservés au cours du cycle (en réalité ce n'est le cas).

- Rendement compresseur:

$$\eta_c = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

- Rendement turbine:

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_{4'}}{T_3 - T_4}$$

- Température réelle de sortie du compresseur :

$$T_{2'} = T_1 \left(1 + \frac{\lambda - 1}{\eta_0} \right)$$

- Température réelle de sortie de la turbine :

$$T_{4'} = T_1 \left(\tau - \eta_t \left(\tau - \frac{\tau}{\lambda} \right) \right)$$

II-6 Les avantages et les Inconvénients d'une centrale TG :

On peut dire comme conclusion de ce travail les avantages et les inconvénients de ce type de centrales.

Les avantages :

- ✓ Prix d'installation moins chère qu'une centrale à vapeur, nucléaire ou hydraulique.
- ✓ Durée d'installation plus courte que les autres centrales.
- ✓ Nombre de personnels réduit.
- ✓ Démarrage court (8-15 min).
- ✓ Régulation plus précise.

Les inconvénients :

- ✓ Rendement très faible.
- ✓ Puissance limitée
- ✓ Pièces de rechange coûteuses