

**II.1. Historique de la turbine à gaz:**

Dans l'histoire de la turbine à gaz, on peut distinguer trois périodes :

**La première**, celle des précurseurs, est très ancienne puisqu'il est classique de la faire remonter à Héron d'Alexandrie avec son Éolipile, simple sujet de curiosité ou d'amusement. Viennent ensuite les premiers dépôts de brevets. Pour les turbomoteurs, en 1791, l'Anglais John Barber brevetait un appareil hybride puisque cette turbine à gaz comportait encore un compresseur alternatif. Pour les turboréacteurs, c'est le Français Lorin qui, en 1911, en fait breveter le principe.

**La deuxième**, celle des premières réalisations, commence à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et peut être considérée comme achevée en 1951. Entre 1872 et 1900 environ, les premiers turbomoteurs sont effectivement construits mais ne peuvent atteindre leur autonomie par suite de l'insuffisance des rendements de compression et de détente. Par contre, entre 1901 et 1906, les recherches des Français Armengaud et Le Male aboutissent au premier turbomoteur autonome avec un rendement global à 3 %. Entre 1935 et 1945, de nombreuses réalisations apparaissent, notamment dans le domaine aéronautique où les turbines à gaz bénéficient des actives recherches menées au cours de la dernière guerre mondiale.

Le premier vol d'un avion équipé d'un turboréacteur a lieu en Allemagne, fin août 1939 (moteur HE S 3 monté sur avion Heinkel 178 V1), précédant, en mai 1941, une réalisation voisine en Grande-Bretagne (moteur de Whittle W 1X monté sur avion Gloster E.28). Enfin, 1951 voit deux premières mondiales avec des turbines à gaz de la firme française Turboméca. Le 18 avril, c'est l'hélicoptère SO 1120 Ariel 3 qui effectue un premier vol propulsé par un turbomoteur, l'ARTOUSTE. Le 6 novembre, c'est le premier vol d'un turboréacteur à double flux, l'ASPIN, monté sur le Fouga Gémeaux IV.

**La troisième**, la période industrielle, commence en 1939. C'est, en effet, au cours des cinquante dernières années que ces machines se sont développées de façon tout à fait spectaculaire.

On peut citer M. Sedille qui, dès 1948, pressentit avec raison cette évolution : «Il est hors de doute que, dans les années à venir, un effort considérable permettra de multiplier dans toutes les branches d'utilisation les installations turbo motrices à gaz ».

Actuellement, la turbine à gaz fait partie de notre environnement courant : l'aviation commerciale et militaire utilise quasi exclusivement des machines de ce type pour propulser ses

aéronefs. Pour les applications industrielles, la turbine à gaz est maintenant le concurrent direct des moteurs diesels, et cette évolution est loin d'être terminée.[8]

## **II.2. Définition:**

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue. Elle peut être considérée comme un système autosuffisant. En effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit 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.

Sous sa forme la plus simple, une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique; une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu'à la pression atmosphérique.[9]

## **II.3. caractérisation des organes**

Dans sa forme la simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments :

- ❖ Un compresseur, centrifuge ou 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 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 .voir la figure (Fig. II.3).

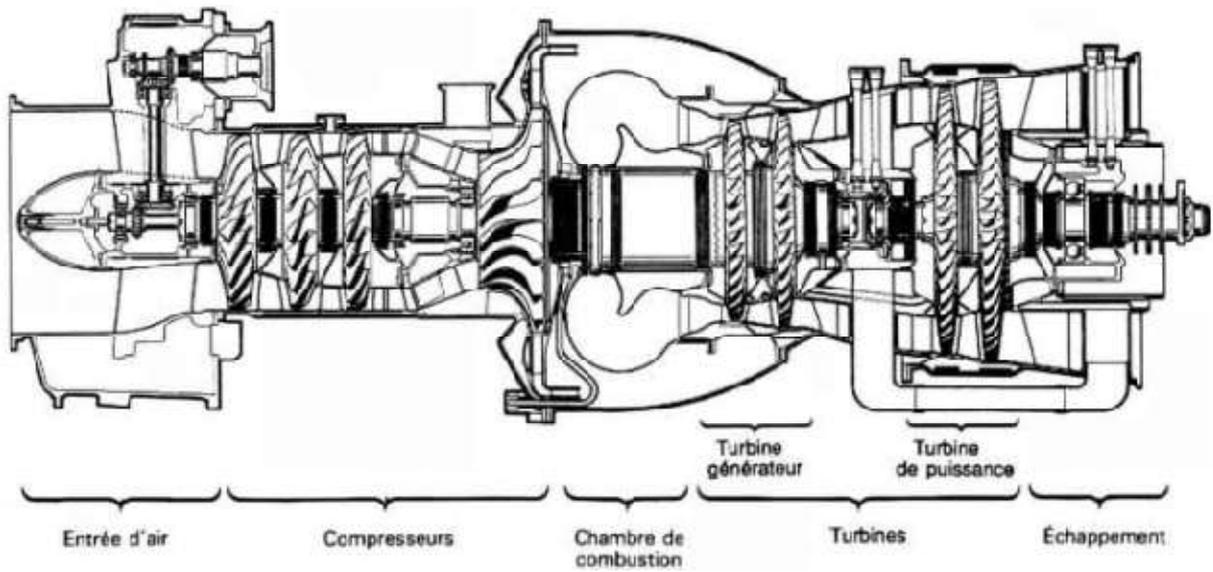
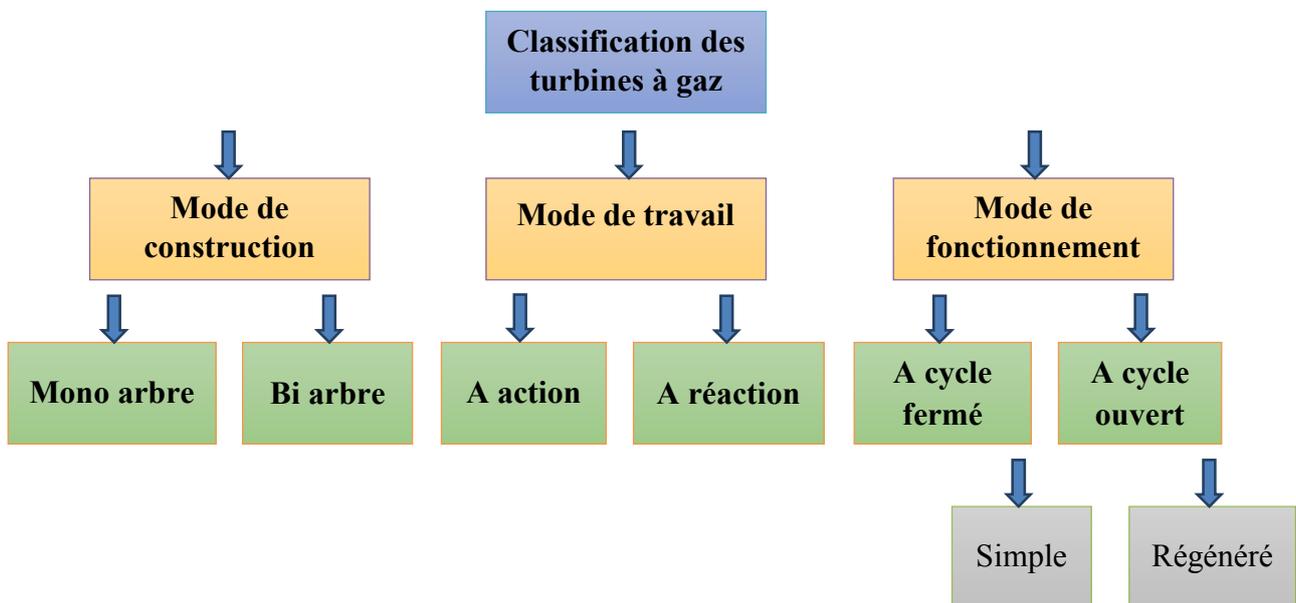


Fig. II.1 différents organes caractérisant un turbomoteur

II.4. différents types des turbines à gaz :

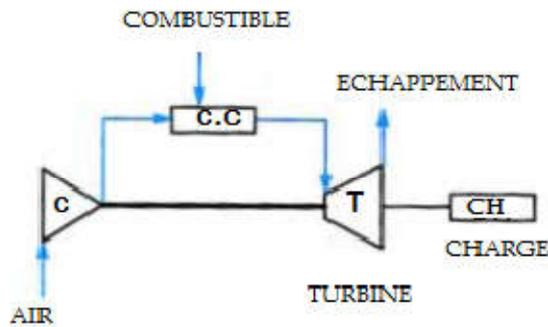
Les turbines à gaz sont classées en trois principales catégories :



**II.4.1. par le mode de construction :[10]**

**II.4.1.1. turbine mono-arbre :**

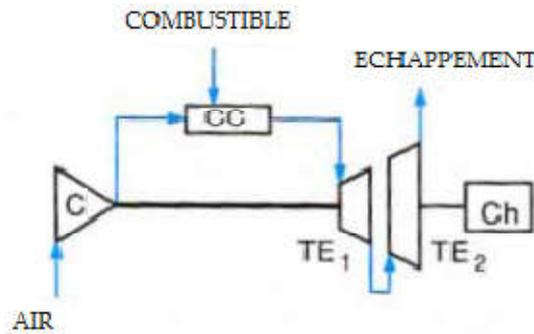
Le compresseur et les sections de la turbine sont montés sur un même arbre ce qui permet de tourner à la même vitesse, ce type est utilisé pour les applications qui n'ont pas besoin des variations de vitesse telle que l'entraînement des génératrices pour production de l'électricité (Fig.II.2).



**Fig. II.2 schéma de la turbine à un seul arbre**

**II.4.1.2. turbine bi-arbre :**

Contrairement à la turbine à gaz à un seul arbre, les deux sections de la turbine ne sont pas reliées mécaniquement ce qui leur permet de tourner à des vitesses différentes ce type est utilisé dans les applications qui demandent une large variation de vitesse tel qu'entraînement des compresseurs (Fig. II.3).



**Fig. II.3 schéma d'une turbine à gaz bi-arbre**

**II.4.2. par le mode de travail :[10]**

On distingue deux types de turbine :

**II.4.2.1. Turbine à action :**

Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique  $P_1 > P_2 = P_3$ .

**II.4.2.2. Turbine à réaction :**

Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique  $P_1 > P_2 > P_3$ . Le taux de réaction  $\epsilon$  caractérisera le % d'énergie thermique totale.

**II.4.3. différents types d'architectures :[11]**

Plusieurs architectures de turbomoteurs sont utilisées à savoir :

- Turbine liée
- Turbine libre
- Turbine à échangeur chaleur
- Compression refroidie et détente réchauffée
- Cycle ferme

**II.4.3.1. Turbine liée :**

La machine la plus simple est la turbine liée appelée encore turbine fixe ou turbine solide. Elle ne comporte, outre la chambre de combustion, qu'un seul ensemble tournant, arbre sur lequel sont montés le compresseur et la turbine de détente ; le tout combine les fonctions de générateur de gaz (entraînement du compresseur) et de récepteur (prise de puissance) (Fig. II.4).

La chambre de combustion peut être soit intégrée à la machine, soit séparée ; dans ce dernier cas, elle est reliée au compresseur et à la turbine par des collecteurs. Cette disposition n'est rencontrée, en pratique, que dans les installations non aéronautiques où les problèmes de masse et d'encombrement sont en général beaucoup moins critiques.

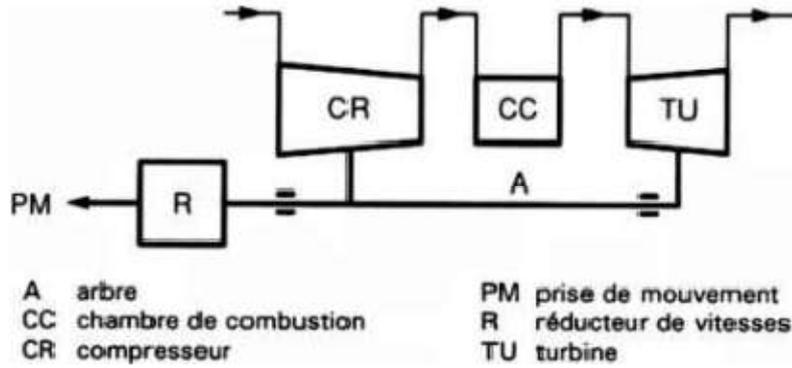


Fig.II.4 turbine liée (prise avant)

Turbine liée : diagramme d'optimisation d'un cycle réel (Fig. II.5.a) et cycle idéal (Fig. II.5.b) :

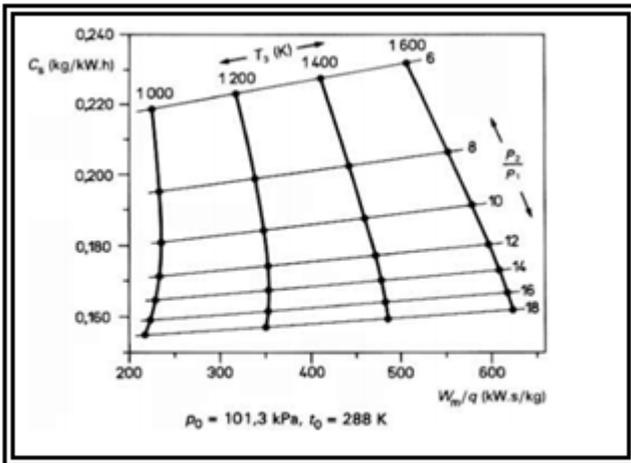


Fig. II.5.b cycle idéal

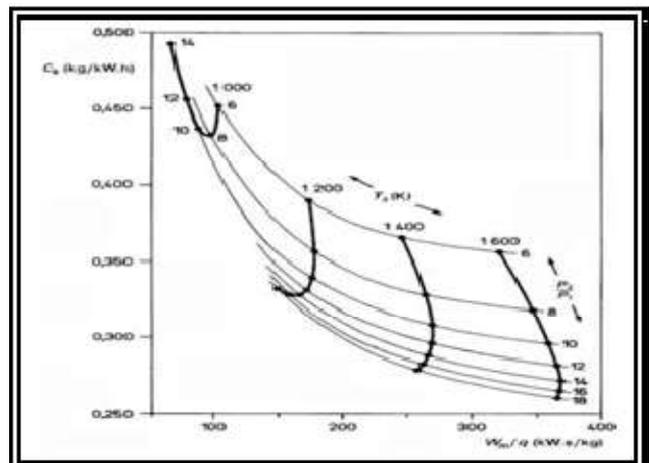


Fig. II.5.a cycle réel

Bien souvent, un boîtier d'engrenages ou réducteur de vitesses vient compléter le turbomoteur afin de faciliter son accouplement à la machine entraînée. Selon la position du réducteur, on a affaire à un turbomoteur à prise de mouvement avant ou arrière. Sans réducteur, la turbine à gaz est dite à prise directe.

**II.4.3.2. Turbine libre :**

Elle est constituée d'un générateur de gaz bien distinct du récepteur de puissance. Le générateur de gaz peut être mono corps, c'est-à-dire qu'il ne comporte, outre la chambre de combustion, qu'un seul rotor commun au compresseur et à la turbine ; ce dernier organe porte alors le nom de « turbine générateur » (Fig. II.6.a et b).

Pour les machines plus sophistiquées, généralement de plus forte puissance, le générateur de gaz peut être double corps, c'est-à-dire constitué de deux ensembles tournants, avec des vitesses de rotation distinctes : un corps basse pression et un corps haute pression. Ce dispositif, où les deux compresseurs fonctionnent en série, facilite la conduite de la machine lors des régimes transitoires rapides lorsque les taux de compression globaux sont élevés ; on évite ainsi de rencontrer le phénomène de pompage (Fig. II.6.c).

Le récepteur comprend l'organe de détente, appelé turbine de puissance, monté sur un arbre indépendant de celui du générateur de gaz et pourvu ou non d'un réducteur de vitesses. La prise de mouvement peut être avant ou arrière et l'arbre de puissance concentrique ou non à celui du générateur de gaz. (Fig. II.6.c).

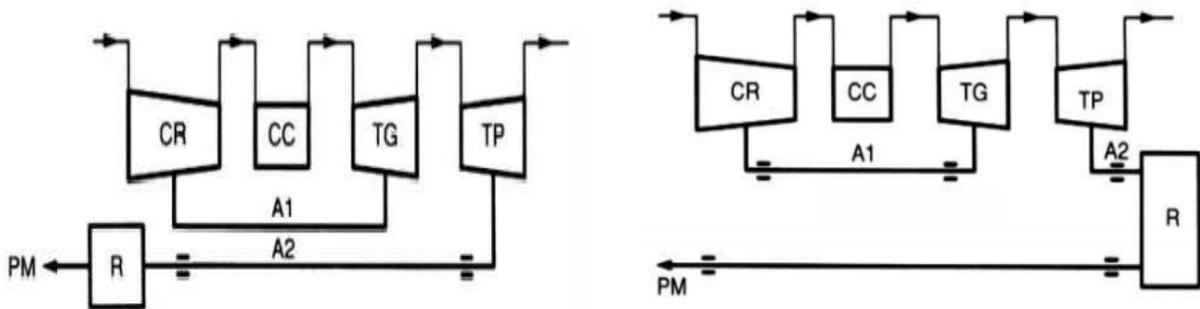


Fig. II.6.a Mono corps: prise direct de mouvement Direct arrière

Fig. II.6.b Mono corps : prise avant et arbre concentrique

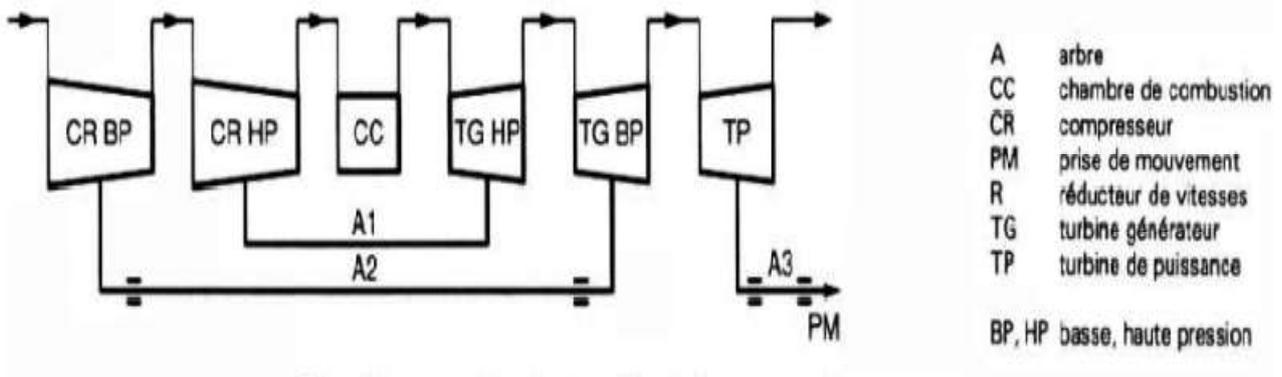


Fig. II.6.c double corps, prise direct arrière, et arbres concentrique

II.4.3.3. Turbine à échangeur de chaleur :

Appelées aussi turbines à récupérateur, ces machines sont caractérisées par l'emploi d'un échangeur thermique qui récupère une partie de la chaleur perdue dans les gaz d'échappement de la turbine pour la transférer au fluide actif après la compression ; de ce fait, pour une même température à l'entrée de la turbine, l'apport de chaleur dû à la combustion est diminué, ce qui améliore le rendement thermique du moteur. Des gains de 20 à 30 % sont ainsi possibles mais au prix d'une sensible complication de la machine (Fig. II.7).

Bien qu'en principe la récupération puisse s'appliquer aussi bien aux turbines liées qu'aux turbines libres, c'est le plus souvent sur ces dernières qu'elle est utilisée mais en dehors du domaine aéronautique, où poids et encombrement la condamnent.

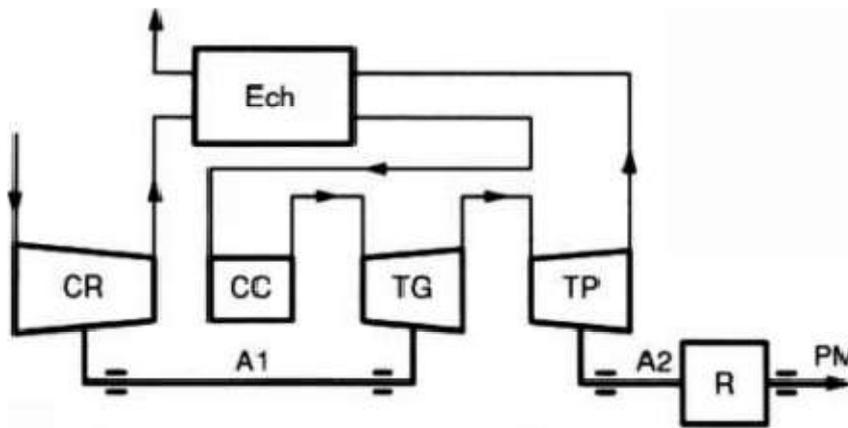


Fig. II.7 turbine à échangeur

Turbine libre avec échangeur (Fig. II.8.c) diagramme d'optimisation d'un cycle réel (Fig. I.8.b) et cycle idéal (Fig. II.8.a).

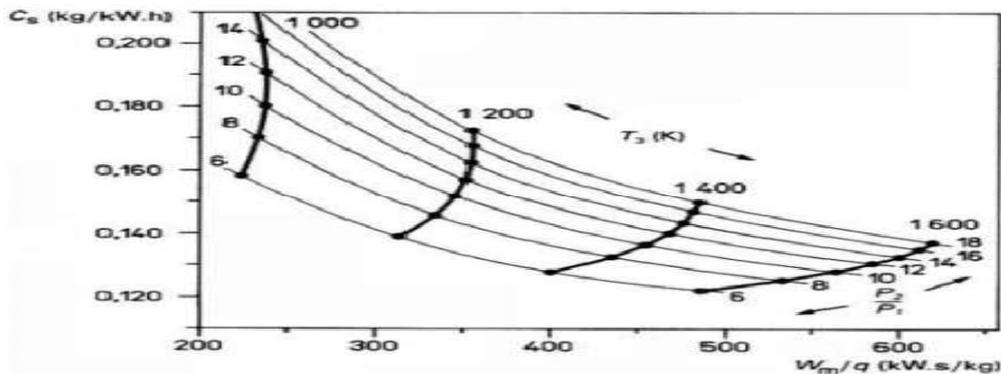


Fig.II.8.a cycle idéal

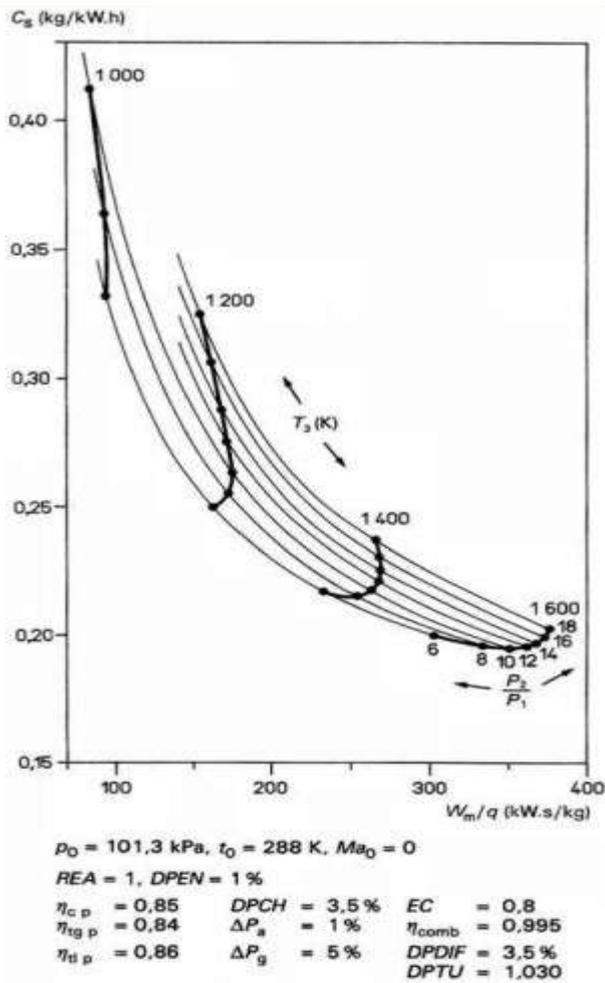


Fig. II.8.b cycle réel

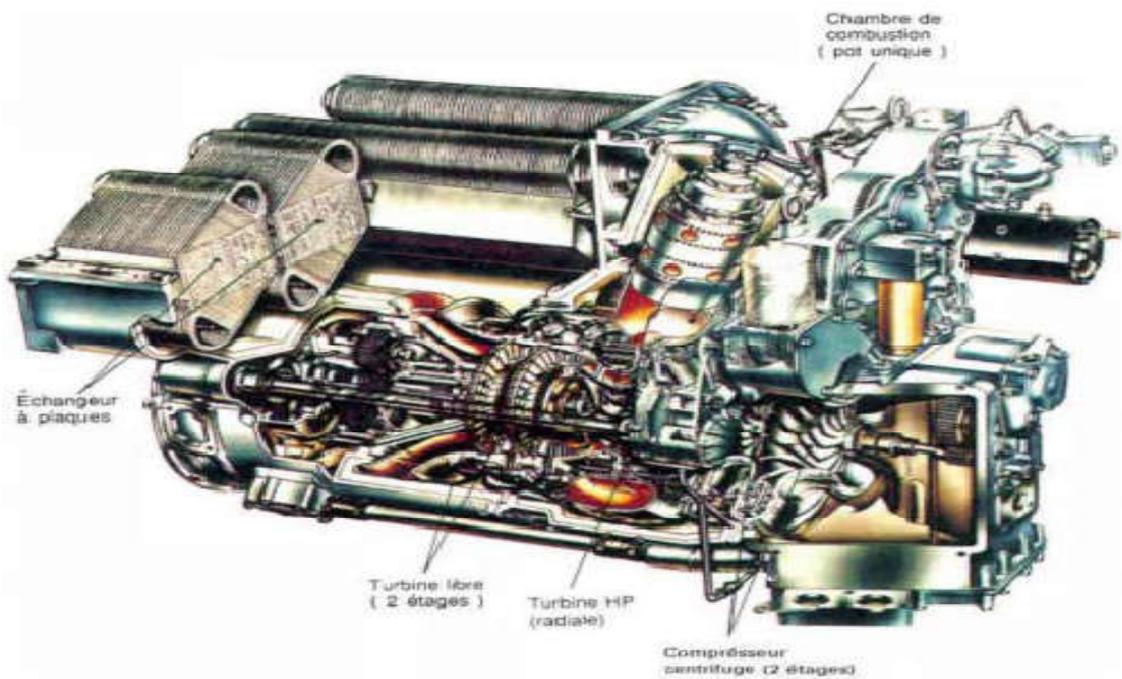


Fig. II.8.c turbine libre avec échangeur

II.4.3.4. Compression refroidie et détente réchauffée :

La compression refroidie permet d’augmenter la puissance spécifique et le rendement thermique du moteur en se rapprochant d’une compression isotherme moins coûteuse en énergie qu’une compression adiabatique. On réalise, par le biais d’un échangeur thermique, un refroidissement du fluide actif entre deux éléments du compresseur. Comme il est nécessaire de disposer d’un fluide réfrigérant en quantité suffisante (Fig. II.9.a), cette disposition ne se rencontre pratiquement que dans les installations industrielles.

En aéronautique, on utilise parfois l’injection d’eau dans le compresseur ; ce procédé qui, par vaporisation de l’eau, prélève une certaine quantité de chaleur au fluide actif est à rattacher à la compression refroidie.

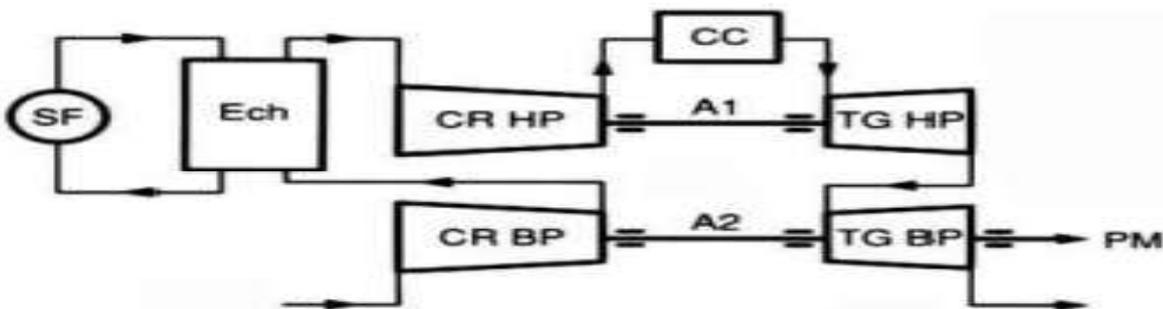


Fig. II.9.a compression refroidie

La détente réchauffée (Fig. II.9.b), directement inspirée des turbines à vapeur dites à resurchauffe, permet aussi l’augmentation de la puissance spécifique et du rendement du moteur. Elle vise à effectuer une détente qui se rapproche de l’isotherme et qui produit donc plus de puissance qu’une détente adiabatique. Grâce au large excès d’air que laisse la combustion principale, il est possible de brûler dans une deuxième chambre de combustion une nouvelle quantité de carburant et de remonter ainsi le niveau de température du fluide actif avant de terminer sa détente. On peut aussi, notamment dans le cas de machines à cycles fermés, répéter l’opération par un deuxième apport de chaleur au fluide actif et utiliser, pour l’ensemble du réchauffage, des échangeurs thermiques situés entre deux détentes partielles.

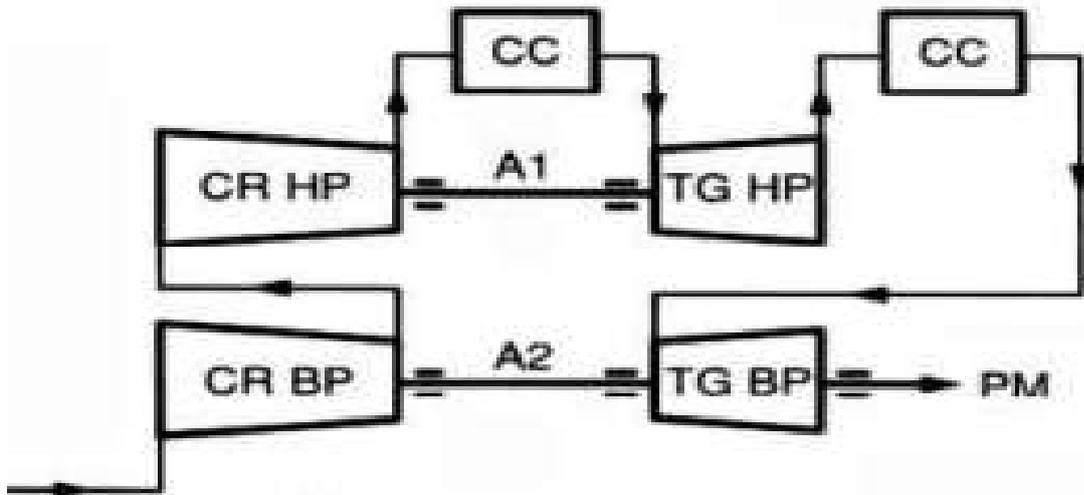


Fig. II.9.b détente réchauffée

Ce procédé, souvent combiné à la compression refroidie (Fig. II.9.c), permet d'améliorer notablement les performances mais, encore une fois, au prix d'une sérieuse complication de la machine. Ces techniques, essentiellement utilisées dans les domaines de forte puissance.

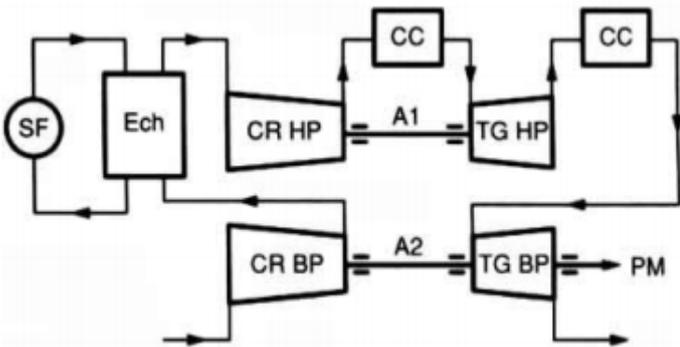


Fig. II.9.d Diagramme du compresseur

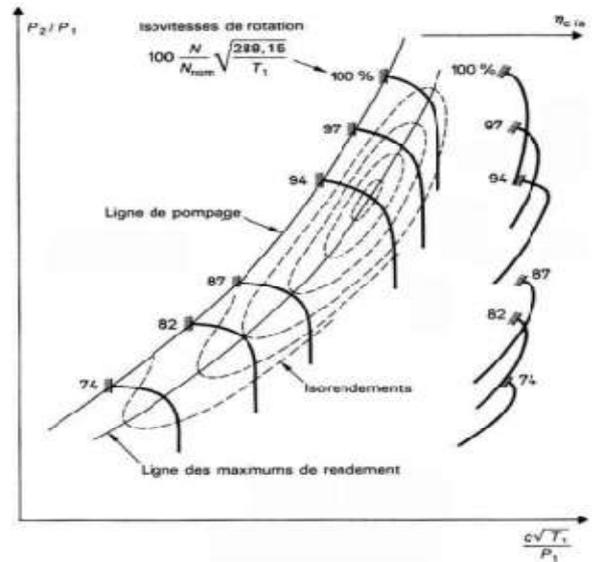


Fig. II.9.c Compression refroidie et détente réchauffée

II.4.3.5. Turbine à gaz à cycle fermé : [11]

Dans les machines à cycles ouverts, le fluide actif (air atmosphérique) est renouvelé en permanence. Au contraire, dans les installations à cycles fermés, ce sont les mêmes particules de fluide qui parcourent indéfiniment les différents organes de la machine. ( Fig. II.10.a)

La chambre de combustion est alors remplacée par un échangeur thermique qui transfère la chaleur d’une source chaude au fluide actif. Il devient indispensable de refroidir le fluide, dans un autre échangeur (radiateur ou pré réfrigérant), qui joue le rôle de source froide, avant son retour à l’entrée du compresseur.

Les dispositifs d’amélioration des cycles ouverts sont aussi applicables aux turbines à cycles fermés : récupérateur à la sortie turbine, compression refroidie et détente réchauffée (Fig. II.10.b).

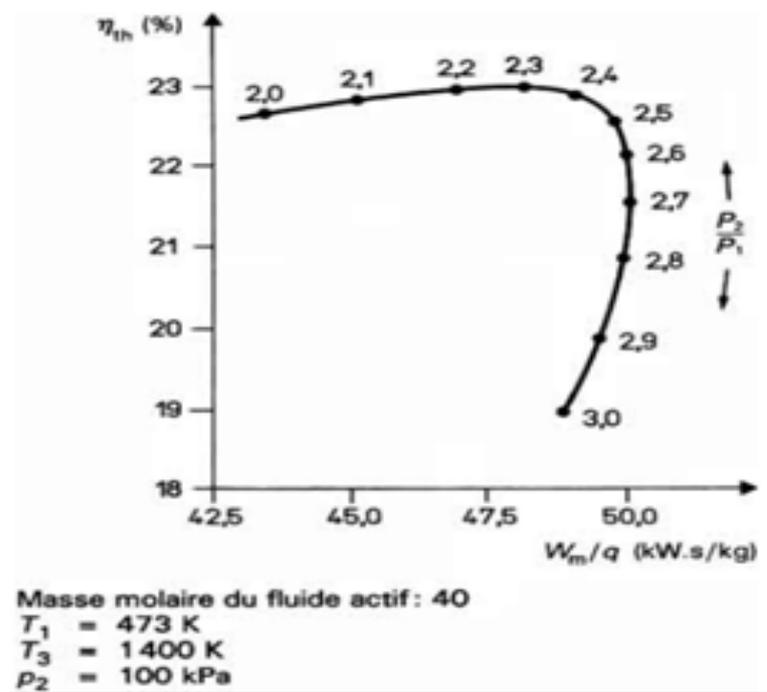


Fig. II.10.b Cycle fermé : influence du rapport de pression

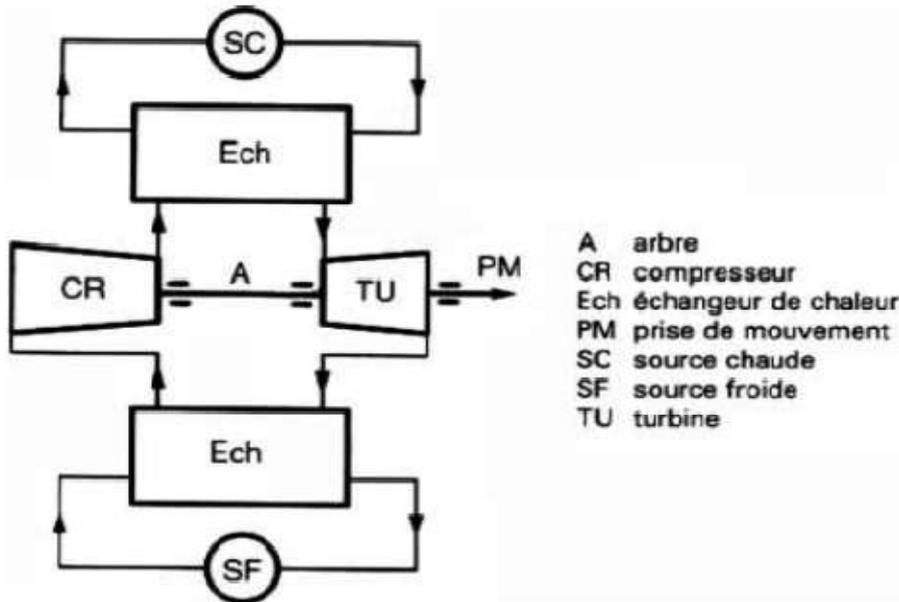


Fig. II.10.a turbomoteur à cycle fermé

**II.4.4. par le mode de fonctionnement thermodynamique :**

Il existe deux cycles thermodynamiques :

**II.4.4.1. Turbine à gaz à cycle fermé :**

Dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.

**II.4.4.2. 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 :

**II.4.4.2.1. 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 est perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement

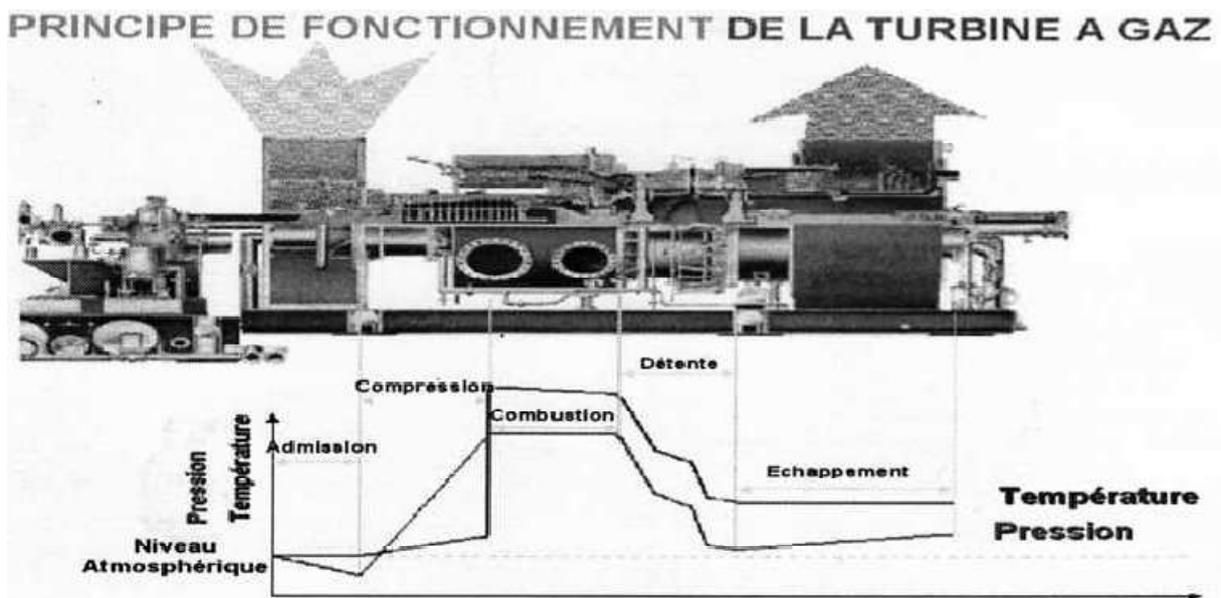
**II.4.4.2. Turbine à cycle régénéré :**

C'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation

De nos jours la turbine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages.

**II.5. Éléments de thermodynamique : [10]**

Du point de vue thermodynamique, la turbine à gaz est une machine cyclique qui sert à transformer l'énergie calorifique des gaz de combustion en énergie cinétique et par suite en énergie mécanique servant à entrainer une machine réceptrice. La variation des paramètres thermodynamiques (pression, température) à travers les différents organes de la machine sont illustrés à la figure suivant (Fig. II.11)



**Fig. II.11. Turbomoteur à cycle fermé**

On distingue les cycles suivants :

- Cycle ouvert (idéal et réel)
- Cycle fermé (idéal et réel)

**II.5.1. Le cycle ouvert idéal :**

En toute rigueur, on désigne par cycle une évolution thermodynamique fermée où l'état final coïncide avec l'état initial (Fig. II.12.a). Dans ce type de cycle fermé, la machine est sans cesse parcourue par les mêmes molécules de fluide.

Par abus de langage, le terme de cycle a été étendu à toute évolution thermodynamique d'ensemble : d'où la notion de cycle ouvert qui désigne une évolution thermodynamique où l'état final diffère de l'état initial. Cette situation se rencontre dans la plupart des turbomachines où l'air atmosphérique, jouant le rôle de fluide actif, est sans cesse renouvelé.

Par ailleurs, il est nécessaire de distinguer entre cycle idéal et cycle réel. On appelle cycle idéal, tout cycle thermodynamique dans le quelles rendements de compression et de détente sont supposés égaux à 1. En outre, les diverses pertes de charge et les vitesses d'écoulement dans chaque plan de référence sont supposées nulles (ce qui revient à confondre pressions statiques et totales). Il est évident que le cycle idéal est purement théorique et ne s'applique pas, en toute rigueur, aux machines réelles, mais il renseigne cependant sur le niveau maximal des performances.

Dans le cycle réel, les rendements de compression et de détente sont naturellement inférieurs à l'unité et les pertes de charge sont prises en compte.[12]

On distingue quatre principaux types de cycles, qui peuvent être décrits sommairement à l'aide du diagramme entropique (T, S) comme le montre la (Fig. II.12.).

- une compression isentropique de 1 à 2.
- un apport de chaleur isobare de 2 à 3.
- une détente isentropique de 3 à 5 (jusqu'à la pression atmosphérique).

Une partie de cette détente (de 3 à 4) libère la puissance nécessaire à la compression ; l'équilibre des puissances du compresseur et de la turbine générateur se traduit, en négligeant le débit de carburant par :

$$H_3 - H_4 = H_2 - H_1$$

Qui peut s'écrire :

$$H_3 - H_2 = H_4 - H_1$$

I.5.2. Le cycle ouvert réel :

- une compression adiabatique avec augmentation d'entropie de 1 à 2'.
- un apport de chaleur avec une chute de pression due à la perte de charge du foyer de 2' à 3'.
- une détente adiabatique jusqu'à la pression atmosphérique, avec augmentation d'entropie de 3' à 5', (Fig. II.12.).

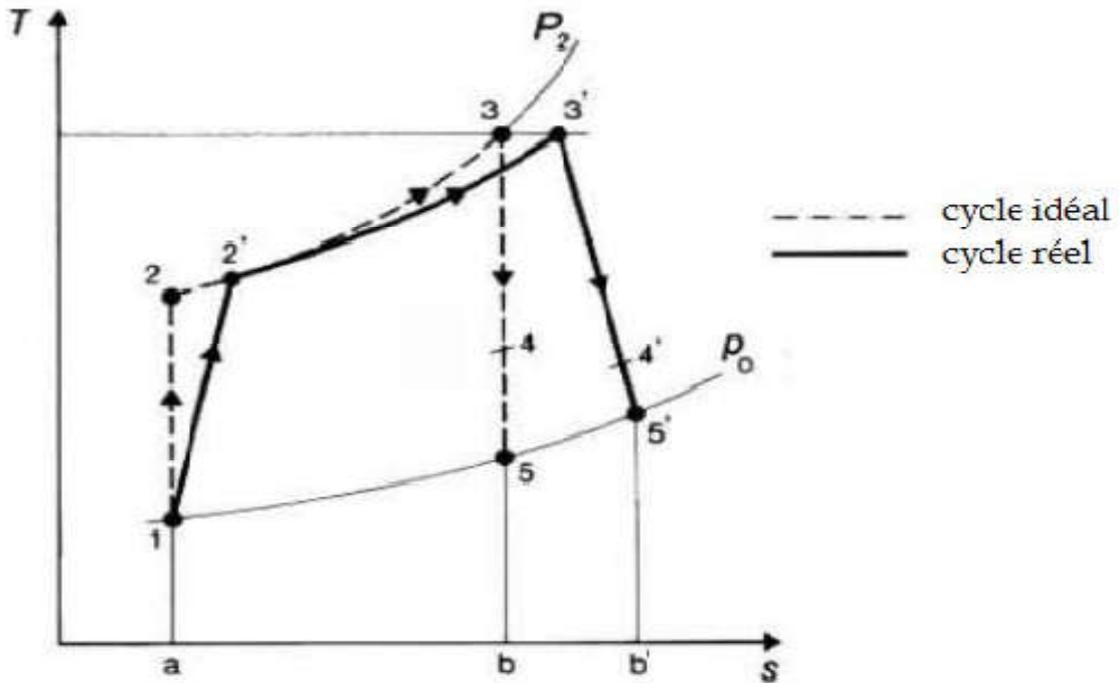


Fig. II.12.a Cycle ouvert réel et idéale

II.5.3. Le cycle fermé idéal :

Il est identique au cycle ouvert idéal sauf que la pression  $P_1 = P_5$  peut différer de la pression atmosphérique (Fig. II.13). Les relations du cycle ouvert idéal s'appliquent également au cycle fermé idéal.

I.5.4. Le cycle fermé réel :

Il est identique au cycle ouvert réel sauf que la cession d'énergie calorifique s'accompagne d'une perte de charge, ramenant le fluide aux conditions du (Fig. II.13) : de 5' à 1.

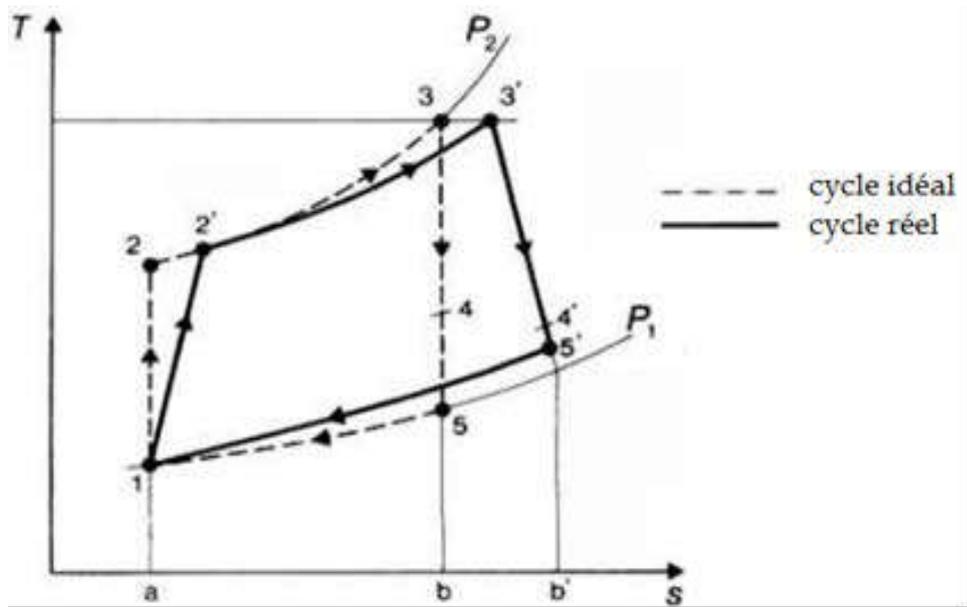


Fig. I.13. Cycle fermé réel et idéale

La puissance fournie par la turbomachine est la différence entre la puissance totale mise à jour dans la détente de 3 à 5, et la puissance nécessaire à l'entraînement du compresseur de 3 à 4 :

$$W_{mmq} = (H_3 - H_5) - (H_3 - H_4) = H_4 - H_5$$

Le rendement thermique a pour définition :

$$\eta_{th} = \frac{\text{principe fournie par la turbomachine}}{\text{puissance apportée à la turbomachine}}$$

Dans le diagramme (T, S), il est représenté graphiquement par :

$$\eta_{th} = \frac{\text{aire}(1,2,3,5,1)}{\text{aire}(a,2,3,b,a)}$$

**II.6. La récupération des gaz d'échappement :**

Une turbine à gaz peut être considérée non seulement comme un moteur à combustion, mais aussi comme un ensemble plus complexe d'interagir, en termes d'énergie, avec des processus extérieur. En effet, elle peut alimenter le processus avec de l'air, comprimé par le compresseur axial, recevoir des gaz chaud, pressurisés par un processus et surtout, elle dispose d'une quantité remarquable de gaz d'échappement chauds, à une température élevée et avec un contenu très haut d'oxygène.

Cette dernière caractéristique permet de récupérer une quantité considérable d'énergie en trois cycles fondamentaux :

- cycle combiné
- cycle cogénération
- cycle régénération

### II.6.1. Cycle combiné : [9]

Un cycle combiné consiste dans la récupération de la chaleur latente dans les gaz d'échappement ; ceci est obtenu en acheminant les gaz d'échappement vers une chaudière pour régénérer de la vapeur.

La vapeur est détendue dans une turbine à vapeur qui, à son tour, entraîne un générateur pour la génération supplémentaire d'énergie électrique.

Dans ce processus, pour une consommation de combustible égale dans la chambre de combustion, le travail utile  $T$  total, fourni par le système turbine à gaz –turbine à vapeur (en le considérant tant qu'énergie électrique aux bornes du générateur) augmente et, en conséquence, par thermodynamique, le rendement global augmente selon l'équation suivante :

$$\eta = \frac{E}{Q}$$

Où :

$\eta_{th}$  : Rendement thermodynamique du système.

$E_{total} = E_{GT} + E_{ST}$  (énergie électrique produite par une turbine à gaz + la turbine à vapeur)

$Q$  : Énergie introduite dans la chambre de combustion par le combustible par conséquent, l'augmentation du rendement, par rapport au cycle simple sans récupération de gaz d'échappement, est égale à :  $E_{GT} / Q_{OOL}$

II.6.1.1. configurations typiques des cycles combinés :

Comme nous avons déjà vu précédemment, de cycle combiné se compose des éléments principaux suivants :

Turbine à gaz

- Chaudière de récupération des gaz d'échappement
- Turbine à vapeur
- Générateur

Les configurations possibles dépendent de l'existence d'une cheminée de by-pass pour les gaz d'échappement, qui permet à la turbine à gaz de fonctionner toute seule quand la chaudière subit des opérations de maintenances, et du type de raccordement entre la turbine à vapeur et le générateur.

Les figures suivantes (Fig. II.14.a) montrent les configurations principales des cycles combinés qui, pour des raisons de simplicité, sont représentées en tant que turbo- groupes individuels cependant, elles peuvent être appliquées à des groupes multiples.

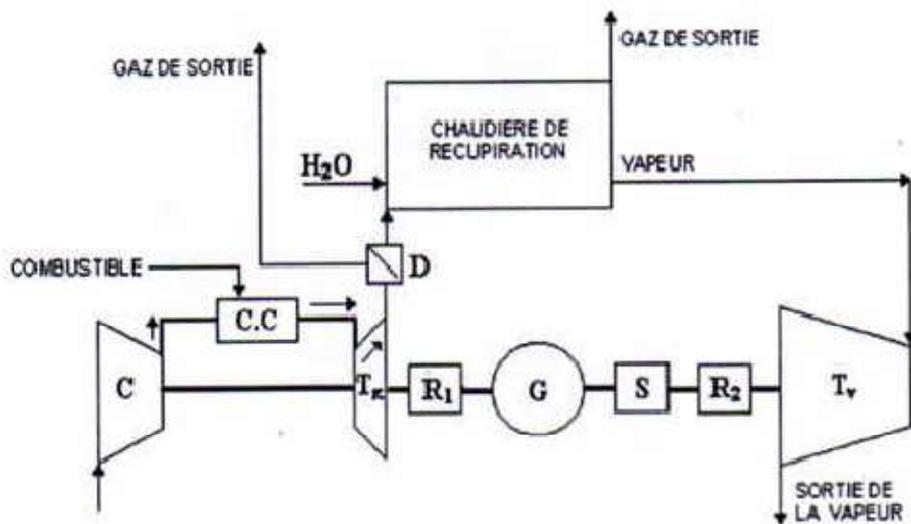


Fig. II.14.a Cycle combiné sur un seul arbre et avec un seul générateur

La figure ci-dessus (Fig. II.14.a) montre un cas dans lequel la turbine à gaz et la turbine à vapeur entraînent un générateur simple par ses deux extrémités.

Selon la taille de la turbine à vapeur (qui, à son tour, dépend de la taille de la turbine à gaz), il est nécessaire d'installer une vitesse de réduction entre la turbine à vapeur et le générateur .Un réducteur de vitesse est toujours nécessaire entre la turbine à gaz et le générateur, sauf pour les turbines des gammes 7001 et 9001.

Dans ce cas-ci, il est également nécessaire d'installer un synchroniseur S entre la turbine à vapeur et le générateur ; un synchroniseur sert à connecter la turbine au réseau (suivant la synchronisation de la turbine à gaz) et à la débrancher encore l'arrêt.

Le principe de fonctionnement du synchroniseur est de connecter le générateur et la turbine à vapeur, quand cette dernière développe un couple moteur plus grand que le couple prédominant de la charge. Le débrayage a lieu évidemment dans le cas opposé.

Par conséquent, dans la phase de démarrage, avec l'alternateur déjà connecté au réseau et entraîné par la turbine à gaz, la turbine à vapeur augmente ses TPM sans être connectée au générateur, car son couple sert seulement à accélérer son propre rotor et ne fournit pas un couple positif à la charge. Quand la turbine atteint la vitesse de synchronisation, toute augmentation de puissance sur l'arbre, dérivant du débit accru de vapeurs, correspond à une augmentation du couple moteur à la charge, qui met le synchroniseur en service : à partir de ce moment-là, la turbine à vapeur entraîne le générateur ainsi que la turbine à gaz.

Le système de contrôle prend en charge toutes les séquences de démarrage, synchronisation et arrêt de la turbine à vapeur mentionnées ci- dessus.

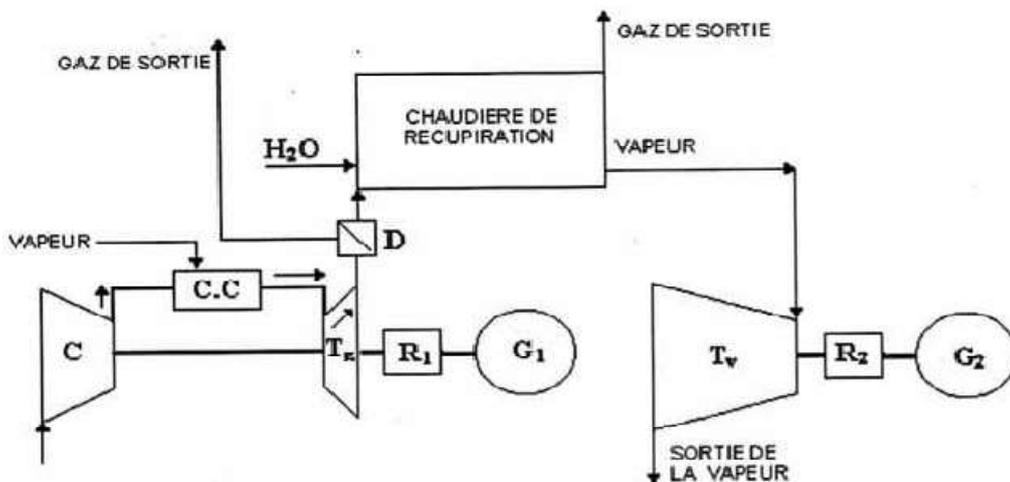


Fig. II.14.b Cycle combiné sur un seul arbre et avec un seul générateur

Dans ce cas-ci (Fig. II.14.b), étant donné que la restriction imposée par la transmission d'énergie partagée avec la turbine à gaz n'est plus présente, la turbine à vapeur n'a pas besoin d'aide synchroniseur pour un embrayage et un débrayage automatique.

La vanne **D** doit être installée lorsque la centrale a besoin de la turbine à gaz pour continuer à assurer la fourniture d'énergie électrique même lorsque l'installation de vapeur est hors service pour maintenance ou à cause de défauts dans la chaudière ou dans la turbine à vapeur.

Dans ce cas-ci, l'aiguillage dévie tout le débit des gaz d'échappement vers la cheminée de by-pass. La présence d'un aiguillage est nécessaire même lorsque la centrale requiert de moduler la puissance développée par l'installation de vapeur en agissant sur la vapeur fournie ; ceci est obtenu, à son tour, en réglant l'alimentation en gaz d'échappement acheminés vers la chaudière.

Dans tous les autres cas l'utilisation d'un aiguillage n'est pas nécessaire.

### **II.6.2. La cogénération :**

La cogénération est définie comme la production séquentielle d'énergie (électrique ou mécanique) et la récupération de chaleur pour être traitée utilisée dans un processus de production.

Sa configuration classique comprend les éléments suivants :

- Une turbine à gaz entraînant un générateur.
- Un conduit d'échappement connecté au processus de production.

À la différence du cycle combiné cité précédemment, la cogénération est un processus où la chaleur, latente dans les gaz d'échappement de la turbine, n'est pas employée exclusivement pour produire de la vapeur dans une chaudière afin d'entraîner une turbine à vapeur- générateur mais sert en premier lieu (très souvent, entièrement) à l'utilisation plus ou moins directe des gaz dans un processus de production.

L'énergie électrique produite par la turbine à gaz (plus l'énergie produite par la turbine à vapeur) est employée dans la centrale de production, pour satisfaire le besoin d'énergie électrique pour la mise en service du processus de production (moteurs électriques, fours électriques, ...etc.).

II.6.3. La régénération

Le cycle de régénération consiste dans la récupération de la chaleur latente des gaz d'échappement et dans son utilisation pour augmenter la température de l'air fournie par le compresseur avant qu'il soit envoyé dans la chambre de combustion (Fig. II.15 à gauche).

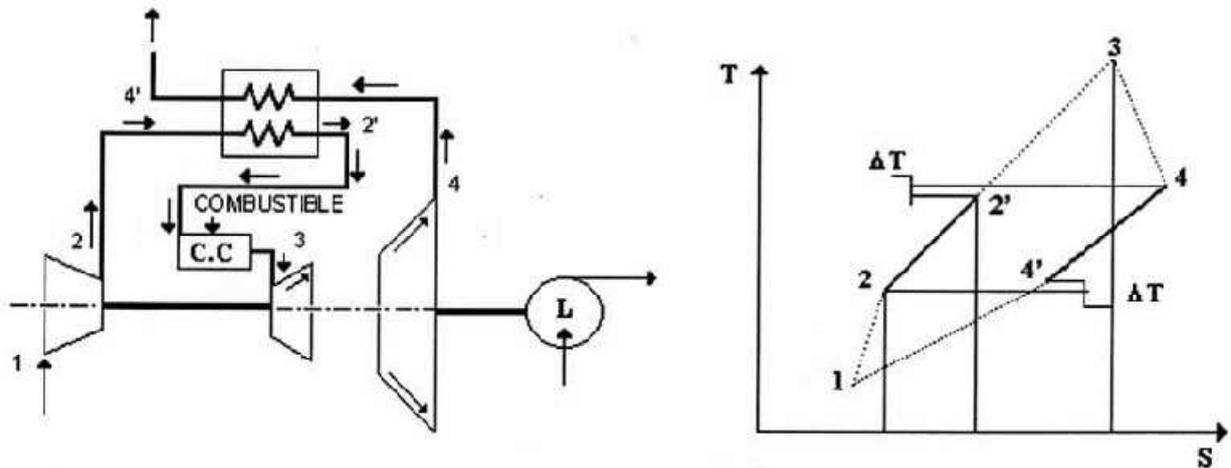


Fig. II.15 Cycle de régénération (turbine à gaz à deux arbres).

Le transfert de chaleur des gaz d'échappement à l'air refoulé par le compresseur a lieu pendant l'échange thermique à contre-courant dans un échangeur à calandre (régénérateur) ; ici, les gaz d'échappement traversent les faisceaux tubulaires, tandis que d'air circule entre la calandre et les faisceaux tubulaires.

Dans ce système, la chaleur à fournir avec le combustible dans la chambre de combustion afin d'atteindre le point 3, est réduite à la zone représentée par l'isobare 2'-3, alors que la chaleur «économisée» est représentée par la zone montrée par l'isobare 2-2' (Fig. II.15 à droite).

De cette façon, en tenant compte de l'équation thermodynamique de rendement :

$$\eta = \frac{W_u}{Q}$$

Où :  $W_u$  : est le travail utile sur l'arbre de la turbine.

$Q$  : est la chaleur fournie avec la combustible, et considérant également que, dans le cycle de régénération (Fig. II.15), la chaleur fournir avec le combustible devient  $Q_{2'-3}$  tandis que dans le cas d'un cycle simple elle est égal à  $Q_{2-3}$ .

Le rendement ( $\eta_r$ ) du cycle de récupération sera donc:  $\eta_r = \eta_s \cdot Q_{2-3} / Q_{2'-3}$

Le terme ( $Q_{2-3} / Q_{2'-3}$ ) est toujours supérieur à 1, représente le bénéfice du cycle de récupération par rapport au cycle simple, en termes d'économie d'énergie thermique.

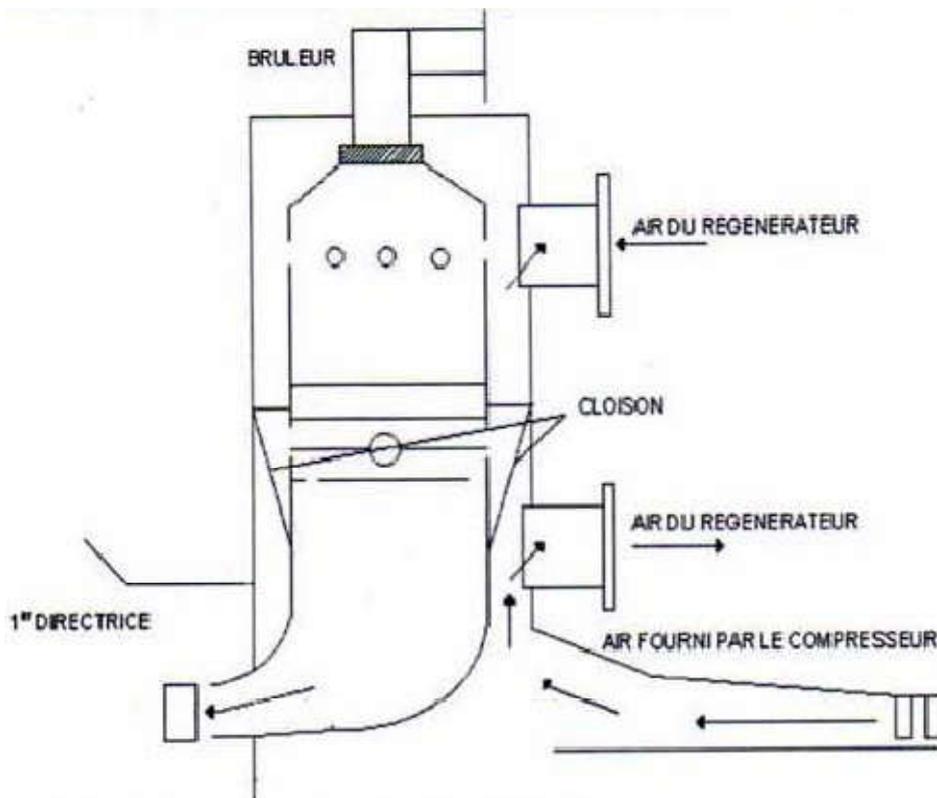
**II.6.3.1. considérations de conception et disposition typiques :**

Dans la figure (Fig. II.16) nous avons observé comment, avant d'entrer dans la chambre de combustion, l'air circule du côté refoulement du compresseur à travers le régénérateur, puis revient dans la chambre de combustion.

Pour obtenir ceci, il est nécessaire de modifier le système extérieur logement de la chambre de combustion, « pour by-passer » l'air au régénérateur.

La figure suivante montre schématique comment cette modification est faite.

Les valeurs rendement les plus fréquentes pour un régénérateur oscillent autour de 80 ÷ 85 %

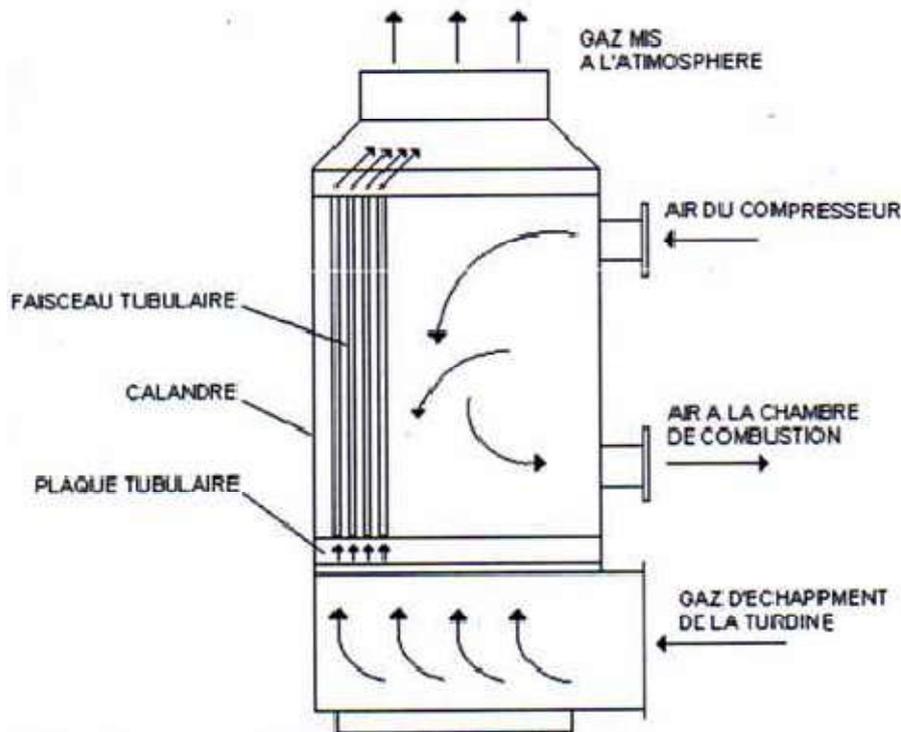


**Fig. II.16 Architecture d'une chambre de combustion avec cycle de régénération.**

Un cloison empêche l'air d'entrer directement dans la zone de combustion et le dirige vers la sortie, qui est raccordée à la tuyauterie d'admission du régénérateur par une bride (Fig.II.16).

Après avoir traversé le régénérateur, l'air entre à nouveau dans la chambre de combustion à une température plus élevée, en traversant la bride limite de la tuyauterie qui relie la sortie du régénérateur avec la chambre de combustion.

Le régénérateur est un échangeur à calandre, avec une calandre en acier faiblement allié, et d'une plaque tubulaire en acier allié (Fig. II.17).



**Fig. II.17 Schéma fonctionnelle du régénérateur**

L'air refoulé par la tuyauterie raccordée au refoulement du compresseur, échange de la chaleur avec des gaz d'échappement s'écoulant dans la direction opposée à l'intérieur du faisceau tubulaire, puis passe par la bride de sortie et par tuyauterie qui connecte ce dernier à la chambre de combustion.

### **II.7. Principales applications : [11]**

Chaque cas d'application d'une turbine à gaz comprend un nombre important paramètres de définitions spécifiques : type de combustible, durée de fonctionnement par an, températures extérieures extrêmes, montage, nuisances, etc. Il en résulte qu'une installation de turbine à gaz doit être personnalisée afin de répondre aux conditions d'exploitation envisagées.

Étudions tout d'abord les utilisations principales avant de passer en revue, au paragraphe suivant, les critères servant de base de réflexion pour choisir le dimensionnement d'une installation.

### **II.7.1. Utilisation des turbines à gaz pour la propulsion :**

L'utilisation de la turbine à gaz dans l'aviation (avions, hélicoptères) est bien connue. Dans le domaine des transports civils et militaires, les turbines à gaz sont également utilisées pour la propulsion, car elles permettent d'obtenir de grandes puissances avec des poids et dimensions faibles par rapport à ce

### **II.7.2. Production combinée chaleur force:**

Ce type d'application permet d'économiser les dépenses d'énergies. Le couple de force peut servir à l'entraînement d'une machine réceptrice et la chaleur peut servir pour le chauffage, séchage, production de vapeur pour un procès industriel. Le principe de cette application peut être encore, poussé plus loin pour obtenir des **installations industrielles dites à énergie totale** où la turbine à gaz peut fournir simultanément trois formes d'énergie : électrique (alternateur), pneumatique (par prélèvement d'air sur le compresseur), calorifique (récupérateur de chaleur des gaz d'échappement). Le rendement de telles installations est ainsi fortement revalorisé et peut atteindre 50 à 60%.

### **II.7.3. Pompage et compression :**

Dans tous les types d'application étudiés, il est tout à fait possible de remplacer l'alternateur entraîné par une pompe, par un compresseur ou une soufflante.

### **II.7.4. Production d'électricité :**

Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre à petite vitesse entraîne un alternateur (voir Fig. II.18). Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur. Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système.[9] des moteurs diesels.

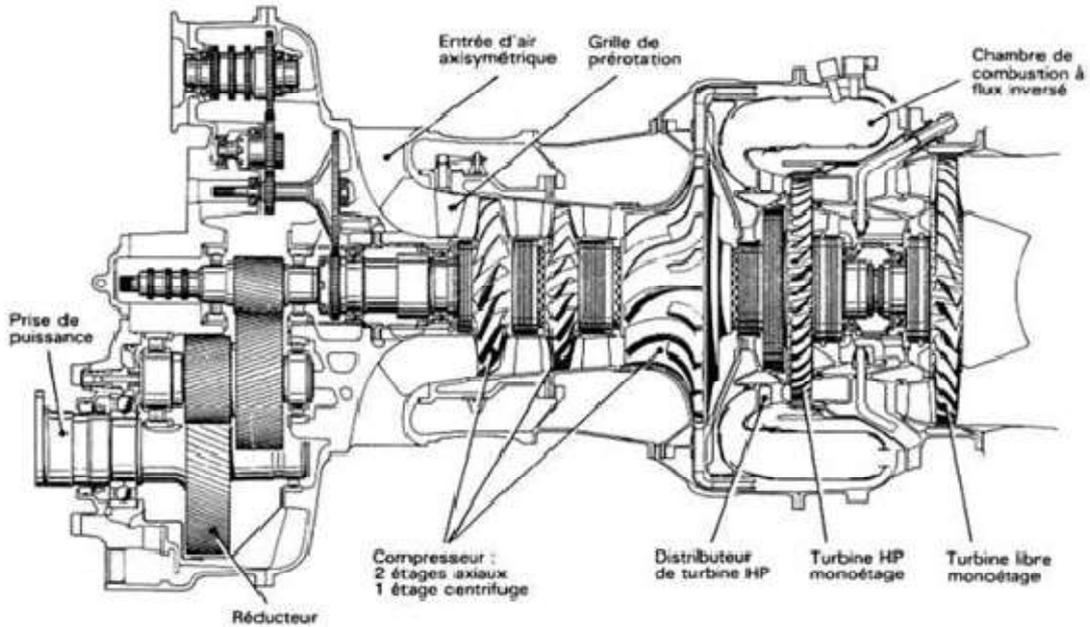


Fig. II.18 Turbomoteur à turbine libre TM 333

II.8. Avantages et inconvénients des turbines à gaz : [13]

❖ **Avantages**

Si on compare la turbine à gaz à ses concurrents dans la famille des moteurs à combustion interne, elle présente des avantages importants :

- Faible encombrement
- Excellent rapport Puissance / Poids
- Bon rendement
- Faibles émissions de polluant
- Mise en route rapide
- Équipements auxiliaires « bon marché ».

❖ **Inconvénients**

- Combustibles propres donc coûteux (les gaz brûlés se détendent directement dans la turbine)
- Performances dépendant des conditions extérieures (dégradées si T augmente ou si P diminue)

**II.9. Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté la turbine à gaz et ses principaux éléments ce qui nous a permis de conclure que le cette dernière est un moteur transformant l'énergie cinétique des gaz en énergie mécanique. Ainsi nous observons aussi qu'elle peut être classifiée par plusieurs façons par exemple par modes de travail et par de fonctionnement thermodynamique. et on a donné aussi le principe d'utilisation, La récupération des gaz d'échappement. Les avantages et ses inconvénients des turbines à gaz.