

CENTRALE A TURBINE A GAZ

INTRODUCTION

Le principe de fonctionnement de la turbine à gaz consiste à soumettre un certain débit gazeux successivement à une compression et une détente, ces deux opérations étant séparées par un réchauffage à l'aide de la chaleur fournie par un combustible.

Pour que cet ensemble d'opération ait un rendement positif, il faut et il suffit que le travail fourni par la détente soit supérieur à celui absorbé par le compresseur (car le rendement est lié à la puissance interne). Ce résultat peut être atteint par deux moyens qui peuvent être employés soit indépendamment, soit simultanément. Le premier consiste à fournir au gaz comprimé une grande quantité de chaleur, de manière à obtenir une température élevée à l'amont de la turbine et, par conséquent, produire dans celle-ci une variation d'enthalpie importante. Quand au deuxième, il est caractérisé par le fait que la compression et la détente sont réalisées avec des rendements élevés, ce qui conduit à une réduction de la différence entre le travail théorique et celui réel.

En fait, le progrès technique qui a permis la réalisation de la turbine à gaz moderne a suivi simultanément ces deux voies : les perfectionnements des méthodes de la métallurgie et de la mécanique des fluides ont abouti, d'une part, à la fabrication de métaux pouvant résister à des températures dépassant 1000 °C, d'autre part, à la construction de compresseurs et de turbines dont le rendement atteint des valeurs de l'ordre de 90 %.

Cette double évolution a entraîné un accroissement du rendement de toutes les turbines à gaz, quel que soit le cycle thermodynamique adopté pour celles-ci ; mais, de plus, certains perfectionnements apportés au cycle permettant d'assurer au rendement des valeurs encore plus élevées, qui pourraient même être comparable à celle des rendements des centrales à vapeur moderne de grande puissance. Toutefois les perfectionnements importants du coût de la turbine à gaz, (et en particulier de cycle thermodynamique) doit donc tenir compte non seulement du rendement, mais aussi de tous les autres facteurs intervenant dans le calcul du prix de revient de l'énergie produite.

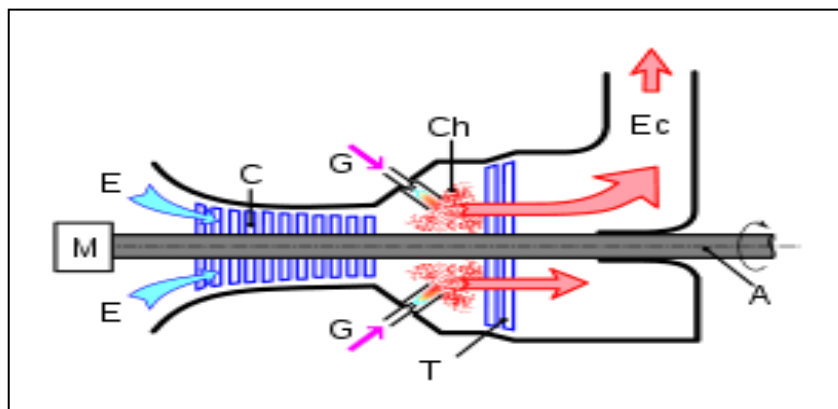
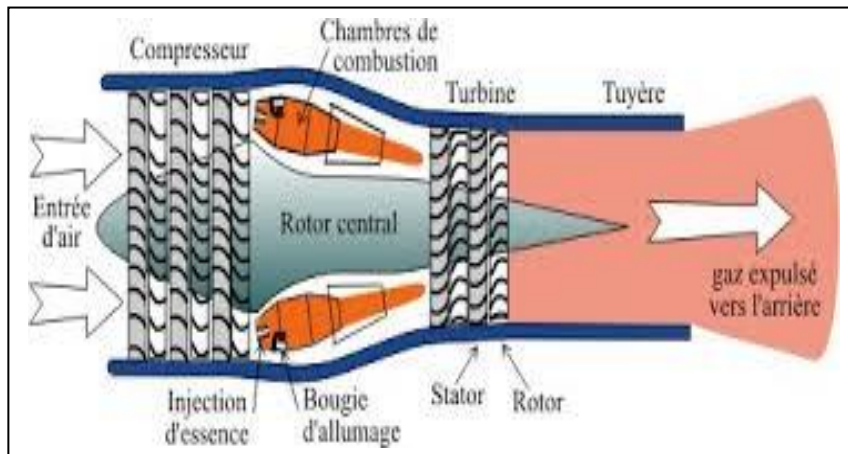
Il est à noter que le terme *turbine à gaz* peut désigner, soit la turbine proprement dite, soit l'ensemble de l'installation. dans le premier cas, la turbine à gaz est simplement la machine tournante dans laquelle un gaz subit une détente en fournissant de l'énergie mécanique ; elle ne diffère donc pas de la turbine à vapeur que par le fait qu'elle fonctionne permanent, au lieu d'un fluide condensable. D'ailleurs, la théorie de la turbine à vapeur s'applique, en principe, aussi à la turbine à gaz, étant entendu que les valeurs numériques qui interviennent dans les différentes relations établies dans cette théorie doivent être choisies en tenant compte de la nature et de fluide se détendant dans la turbine. En fait, c'est dans le deuxième sens que le terme *turbine à gaz* est employé le plus souvent. Cet usage est justifié par le fait que, dans le cas d'une turbine à gaz, les différentes parties de l'installation sont liées entre elles d'une manière plus étroite que dans le cas de la turbine à vapeur.

TURBINE A CYCLE SIMPLE

Le vocable *turbine à gaz* couvre actuellement un ensemble plus ou moins complexe d'appareils dans lesquels la force motrice est produite dans une turbine par un flux de gaz chauds. Ceux-ci peuvent être produits dans une chambre de combustion à partir de combustibles liquides, gazeux ou même solides (charbon pulvérisé, par exemple), ou encore parvenir de l'échappement des moteurs à piston libre ou turboréacteurs. On envisage pour l'avenir l'emploi de réacteurs nucléaires comme source de chaleur à haute température.

Les turbines à gaz utilisent donc un écoulement gazeux pour produire de l'énergie mécanique à partir d'énergie calorifique. La turbine est alimentée en gaz par combustion des carburants. Des tuyères fixes dirigent les jets de gaz sur les aubes d'un rotor. La force ainsi exercée sur ces dernières met en rotation l'arbre de la machine

Les schémas thermiques utilisables sont extrêmement divers ; le schéma suivant en représente un des plus simples.



L'air extérieur est aspiré en A par un compresseur axial C (les paramètres à l'entrée sont P_1 et T_1) puis comprimé adiabatiquement à la pression P_2 et à la température T_2 , préchauffé dans un échangeur de chaleur e, après quoi il sert à la combustion d'un combustible approprié

(liquide ou gazeux). La combustion se passe théoriquement à pression constante ; mais en réalité, à cause de la perte de charge, la pression P_3 (à l'admission turbine T) est légèrement inférieure à P_2 ;

$$P_3 = (0.92 - 0.98) P_2$$

Les gaz brûlés, dont les paramètres sont P_3 et T_3 , se détendent adiabatiquement dans la turbine T. Le rotor de cette dernière est fixe sur le même arbre que celui du compresseur C. Donc la puissance transmise à l'arbre (puissance interne de la machine) est :

$$P_i = P_T - P_c (>0)$$

La puissance externe (effective) P_e , transmise à une machine réceptrice et mesurée sur la bride d'accouplement est :

$$P_e = P_i \eta_m = (P_T - P_c) \eta_m$$

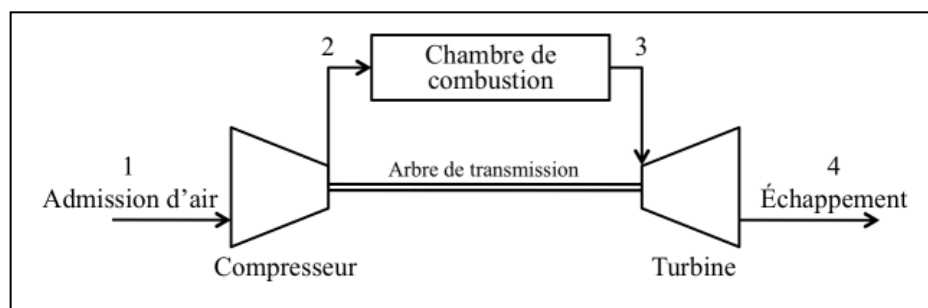
Où η_m est le rendement mécanique qui tient compte de la puissance consacrée à l'entraînement des auxiliaires (pompe à huile, pompe à combustible, etc.) et des pertes mécaniques (dans les paliers, dans un réducteur d'engrenage, etc.).

Le rendement global de la turbine à combustion interne η_g est le rapport de la puissance externe P_e sur celle dépensée dans la chambre de combustion P_{Chc} :

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{Chc}} = \frac{P_e}{q_{mc} P_{ci}}$$

où P_{ci} est le pouvoir calorifique inférieur du combustible (J/kg) et q_{mc} est le débit massique de combustible.

Dans ce cycle, l'air est aspiré de l'atmosphère et les gaz brûlés sont évacués vers l'atmosphère ; c'est une turbine qui fonctionne en circuit ouvert, elle est appelée *turbine à combustion interne*.



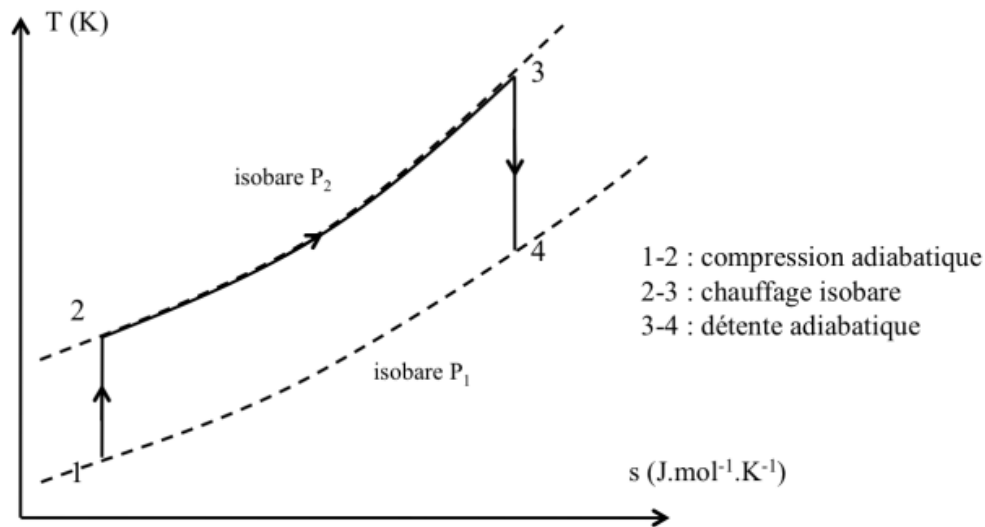


Fig.2. Cycle de la turbine à gaz.

Ce cycle est formé de deux adiabatiques (isentropiques) et de deux isobares :

- 1-2 : compression isentropiques,
- 2-3 : Echauffement isobare,
- 3-4 : Détente isentropiques,
- Refroidissement isobare.

Soient W_T le travail par kg d'air que la turbine produit théoriquement et W_C le travail théorique absorbé par le compresseur pour 1 kg d'air comprimé. Le travail utile est :

$$W_u = W_T - W_C = (H_3 - H_4) - (H_2 - H_1)$$

Pour produire ce travail, il faut dépenser une quantité de chaleur égale à :

$$Q_{23} = H_3 - H_2$$

et le rendement théorique de la turbine s'écrit :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q_{23}} = \frac{(H_3 - H_4) - (H_2 - H_1)}{H_3 - H_2}$$

Pour un cycle réel, les pertes qui peuvent affecter l'installation sont les suivants :

- Pertes pendant la compression caractérisées par η_C ; rendement du compresseur :

$$\eta_c = \frac{H_2 - H_1}{H_{2'} - H_1}$$

- Pertes pendant la détente caractérisées par η_T ; rendement de la turbine :

$$\eta_T = \frac{H_3 - H_{4'}}{H_3 - H_4}$$

- Pertes de charge en cours de combustion caractérisées par l'écart entre la pression de sortie du compresseur et celle d'entrée dans la turbine.
- Pertes mécaniques caractérisées par η_m ; rendement mécanique.
- Pertes par imbrûlés pendant la combustion et pertes par rayonnement caractérisées par η_{cc} ; rendement de combustion.

Les plus importantes sont les deux premières qui influent directement sur la puissance récupérée.

Le travail utile du cycle réel 12'34' ayant pour expression présentée dans le problème 1.

Dans le cas d'une turbine à gaz fonctionnant à circuit fermé, c'est la même masse gazeuse qui est utilisée indéfiniment pour la production de travail. Cette masse est ainsi isolée de l'atmosphère et elle est comprimée dans le compresseur, chauffée dans un réchauffeur, détendue dans une turbine et refroidie dans un réfrigérant pour revenir au compresseur.

Grâce à la transmission de la chaleur par surface, le circuit fermé peut utiliser les combustibles solides (charbon) et le combustible nucléaire.

Les turbines fonctionnant en circuit fermé sont appelées *les turbine à gaz*.

La turbine en circuit fermé nécessite obligatoirement un réfrigérant et consomme en conséquence un débit d'eau sensible, l'échauffer d'air est une véritable chaudière nettement plus compliquée que la simple chambre de combustion, c'est une double infériorité vis-à-vis de la turbine en circuit ouvert. Cette infériorité est toutefois compensée par un certain nombre d'avantage propre à ce genre d'installation.

- Pureté de gaz véhiculé qui n'est pas mélangé aux produits de la combustion d'où la possibilité d'augmenter la température devant la turbine et surtout la possibilité de brûler n'importe quel combustible en particulier ceux qui sont bon marché : tourbe schlamme, lignite.
- La puissance obtenue est égale au produit du travail utile fonction du cycle par le débit masse, on peut accroître à volonté le débit masse sans changer la dimensions des machines en augmentant la pression dans le circuit fermé. On est évidemment limité dans cette voie par la résistance du matériel.

- Il est facile de faire varier la puissance délivrer à rendement et à vitesse constants en agissant sur la quantité de fluide contenue dans le circuit, c'est le rôle du compresseur de charge.
- Les turbines construites actuellement utilise l'air comme fluide moteur, mais il n'est pas interdit d'envisager l'emploi d'un autre gaz.

TURBINES A UN SEUL ARBRE ET A DEUX ARBRES

La turbine à combustion interne, dont les rotors du compresseur et de la turbine sont fixés sur le même arbre, est appelée *la turbine à un seul arbre*. Elle n'assure un bon rendement effectif, que pour la vitesse de rotation très proche de la vitesse nominale.

Puisque la turbine à une ligne d'arbre supporte mal les fluctuations de charge, d'où l'idée de séparer les deux fonctions de la turbine en fractionnant celle-ci en deux parties (figure 3), l'une turbine de compresseur TC entraînant le compresseur et l'autre turbine de puissance utile dite turbine libre TL entraînant une machine réceptrice.

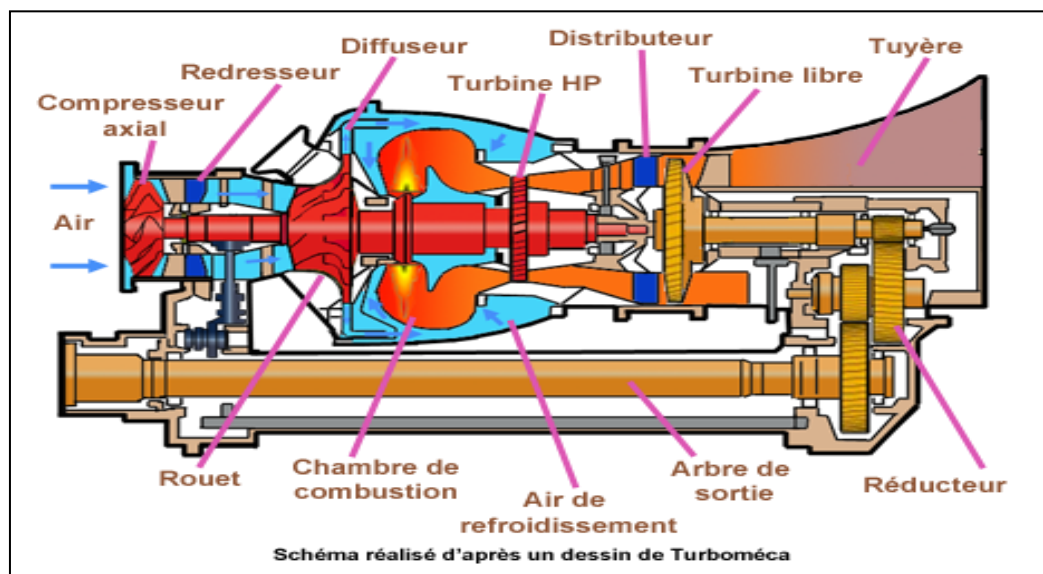


Fig.3. Turbine à deux arbres.

RENDEMENT

Il est difficile d'assurer un fonctionnement continu à haute température dans la chambre de combustion et dans les premiers étages de la turbine. Pour cette raison, le rendement d'une turbine à gaz est limité.

Une petite turbine à gaz, à simple cycle, a un rendement thermodynamique relativement bas, comparable à celui d'un moteur à essence. Des matériaux résistants à la chaleur, des revêtements améliorés et des dispositifs de refroidissement ont permis d'obtenir, sur des grosses unités à simple cycle, des rendements de 34 %.

On peut augmenter le rendement des turbines à gaz au moyen de dispositifs auxiliaires, comme les échangeurs, les régénérateurs et les réchauffeurs. Cependant, le coût est élevé et l'amélioration qu'ils apportent ne justifie pas leur utilisation.

Dans une installation à cycle combiné, la quantité de chaleur résiduelle est transmise à une chaudière. La chaleur ainsi récupérée d'une telle installation est supérieure approximativement à 50 % à celui de la turbine à gaz seule. Des turbines à cycle combiné, avec des rendements d'au moins 58 %, seront bientôt en service.

CARACTERE DE LA TURBINE A GAZ SIMPLE

Les turbines à gaz utilisées ne dépassent guère un rendement de 25 %, sauf celles alimentées par un moteur à piston libre qui réalisent de 30 à 35 %.

Malgré un rendement faible (de 15 à 20 %) très inférieur à celui des turbines à vapeur et moteur Diesel (de 35 à 38 %), la turbine à gaz simple présente un certain nombre d'avantages que nous allons énumérer et qui dans certains cas justifient son emploi tout au moins pour des puissances modérées (inférieures à 1.2 MW) :

- La construction en est simple en raison des faibles pressions utilisées (5 à 15 bars) et l'absence d'échangeur donc prix d'achat modéré et encombrement réduit.
- Mise en état de service très rapidement et passage de l'état froid à l'état pleine charge en un temps très court, pour démarrer il faut ramener le groupe à une vitesse voisine de 30 % de la vitesse nominale, de manière à alimenter la chambre de combustion en air à une pression suffisante pour pouvoir allumer. Le moteur de démarrage est dimensionné pour une puissance égale environ au vingtième à celle du groupe. Le temps nécessaire pour amener l'arbre à la vitesse et la prise de charge est de dix à vingt minutes suivant la puissance du groupe.
- Consommation d'eau nulle ou modérée (refroidissement des paliers).
- Simplicité de manœuvre d'où personnel réduit ou moins qualifié que pour la conduite d'une installation à vapeur.
- Révisions rapides et faciles, dépenses d'entretien réduites. L'entretien périodique dont la fréquence dépend de la teneur en cendres du combustible utilisé se réduit à un lavage de la turbine sans démontage et d'un dépôt des brûleurs pour nettoyage.
- L'absence de système de condensation qui fait que cet appareil peut fonctionner pratiquement sans eau, ce qui est très intéressant dans les régions arides.

Le principal inconvénient est constitué par nécessité d'utiliser un combustible onéreux, il devient toutefois secondaire dans le cas d'une durée de fonctionnement réduite.

APPLICATION ET DEVELOPPEMENT DES TURBINES A GAZ

Le principe de fonctionnement de la turbine à combustion interne est connu depuis 1872, mais son développement était lent faute de matériaux supportant la température élevée et du faible rendement des premières constructions des compresseurs et des turbines.

A partir de la deuxième guerre mondiale, la turbine à combustion interne a trouvé l'application très large dans le cas de propulsion aéronautique. Aujourd'hui, presque tous les avions sont équipés de turbines à gaz, qui forment les parties principales des turboalternateurs.

Les turbines à combustion interne sont appliquées également pour :

- La propulsion des bateaux et des véhicules ;
- L'entraînement mécanique des machines réceptrices (pompes ou compresseurs) ;
- L'entraînement des alternateurs destinés à l'alimentation des réseaux électriques ;
- Suralimentation des moteurs à piston et à combustion interne et des chaudières (en introduisant plus d'air comprimé à l'entrée de l'installation, pour brûler plus de combustibles afin d'obtenir plus de puissance).

TURBOREACTEURS

Un turboréacteur comprend un diffuseur, un compresseur, une chambre de combustion, une turbine à gaz et une tuyère propulsive (figure 4) .

La turbine à gaz n'utilise qu'une partie de la chute de potentiel calorifique, celle qui est nécessaire pour entraîner le turbocompresseur. Les gaz d'échappement de la turbine sortent ainsi à un potentiel assez élevé ; pour pouvoir subir une détente ultérieure dans la tuyère et provoquer une poussée. Cette dernière, pour un turboréacteur se déplaçant à la vitesse V_∞ en absorbant un débit d'air I et rejetant vers l'arrière un débit $I(d'air)+I_C(\text{combustible})$ avec une vitesse V_1 , s'écrit :

$$F = I (V_1 - V_\infty) + I_C V_1$$

Le débit de combustion pouvant, en première approximation, être négligé, l'énergie transmise par le réacteur est :

$$P = I (V_1^2 - V_\infty^2) / 2$$

La puissance de propulsion : $P_P = F V_\infty = I V_\infty (V_1 - V_\infty)$

Le rendement de propulsion : $\eta_P = P_P / P = 2 V_\infty / (V_1 + V_\infty)$

le rendement thermique : $\eta_{\text{ther}} = P / q I$

le rendement global : $\eta_g = P_P / q I = \eta_P \eta_{\text{ther}}$

q est l'énergie dépensée dans la chambre de combustion par kg d'air.

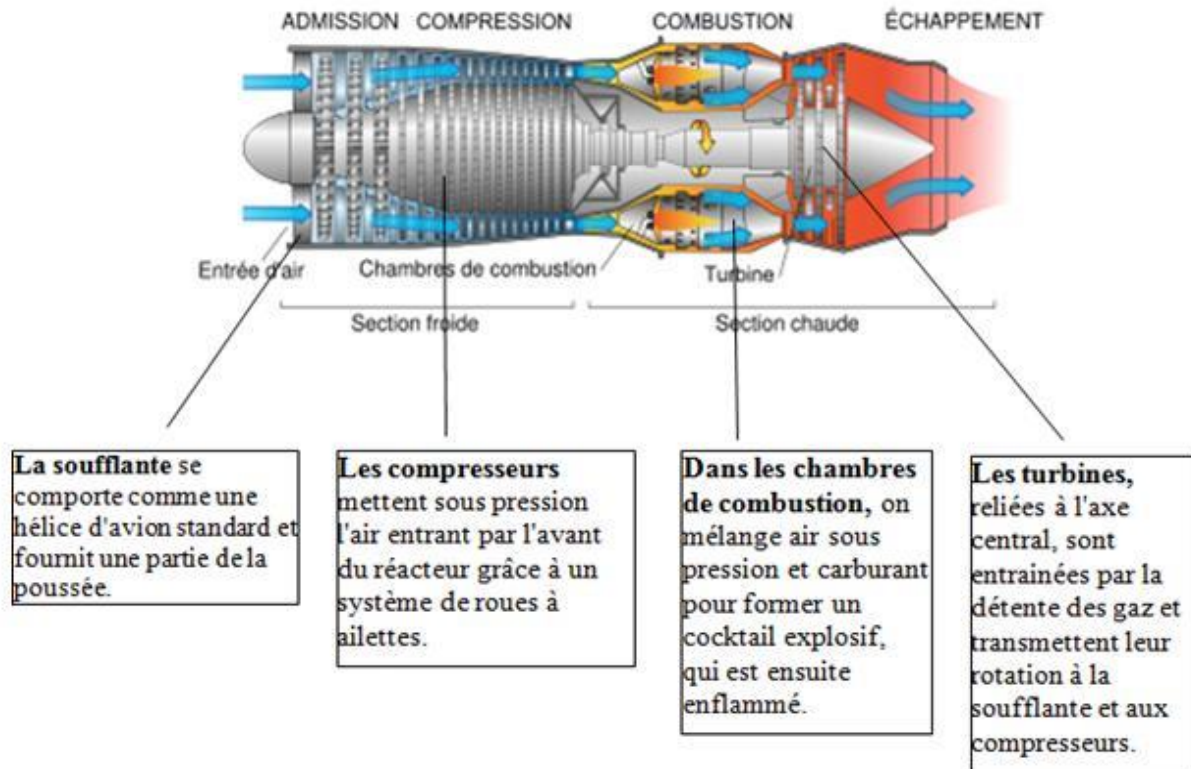


Fig.4. principe d'un turboréacteur.

