

**TURBINES À GAZ**  
 TECHNOLOGIE ET FONCTIONNEMENT

I - PRÉSENTATION GÉNÉRALE .....	1
1 - Description de la turbine à gaz .....	1
2 - Conditions opératoires .....	2
II - CLASSEMENT DES TURBINES À GAZ .....	3
1 - Turbines industrielles .....	3
2 - Turbines type "Aviation" .....	4
3 - Technologie des turbines à gaz .....	5
III - PERFORMANCES DES TURBINES À GAZ .....	6
1 - Bilan énergétique de la turbine à gaz .....	6
2 - Performances en conditions standard "Iso" .....	6
3 - Performances en conditions réelles .....	8
4 - Turbine à cycle régénératif .....	10
IV - RÉGULATION ET CONTRÔLE DES TURBINES À GAZ .....	12
V - AMÉLIORATION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE PAR CYCLE COMBINÉ .....	13
1 - Génération de vapeur .....	13
2 - Génération de vapeur avec post-combustion .....	14

Planches

- Planche n°1 : TURBINE À GAZ
- Planche n°2 : TURBINE À GAZ - Ruston
- Planche n°3 : TURBINE À GAZ INDUSTRIELLE
- Planche n°4 : STATION DE COMPRESSION GAZ DE HASSI R'MEL - Schéma d'implantation
- Planche n°5 : STATION DE COMPRESSION GAZ DE HASSI R'MEL - Schéma de principe

## I - PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La turbine à gaz est une machine motrice permettant d'entraîner des alternateurs pour la génération d'électricité, ou des pompes et compresseurs, en général de forte puissance, de façon **autonome**.

Ses **principales qualités** sont :

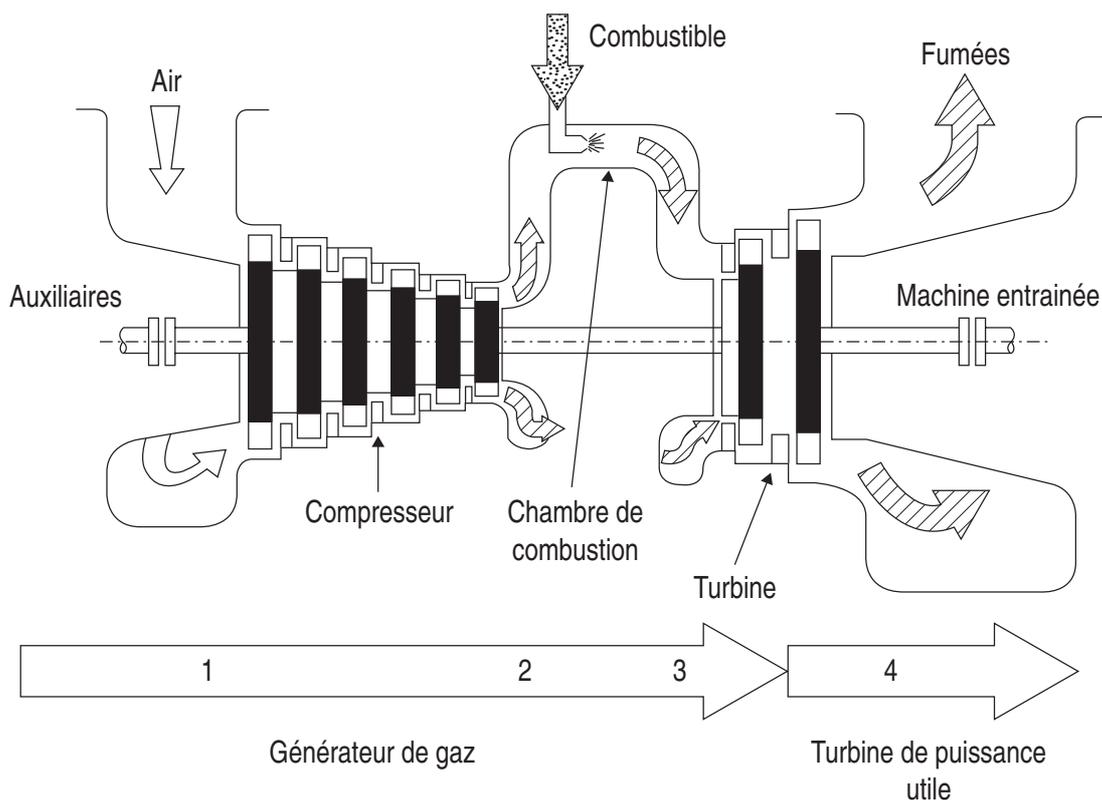
- puissance spécifique élevée (kW/kg)
- installation simple (la principale servitude est la qualité et le volume de l'air aspiré)
- disponibilité élevée (> 95 %)
- polycombustible (gaz, fioul, ...)
- exige peu de fluide de refroidissement (eau ou air)
- accepte les conditions climatiques extrêmes (moyennant des adaptations sur l'aspiration d'air et les auxiliaires combustible et lubrification)
- fonctionnement sous conduite et surveillance automatisée
- mise en régime rapide (quelques dizaines de minutes)

Son principal défaut est son assez faible **rendement thermique intrinsèque** ( $\approx 30\%$  à  $35\%$ ), mais qui peut être compensé souvent par la possibilité d'utiliser un combustible à faible valeur commerciale. Toutefois des progrès technologiques récents améliorent ce rendement (on atteint 38 à 42 %).

### 1 - DESCRIPTION DE LA TURBINE À GAZ

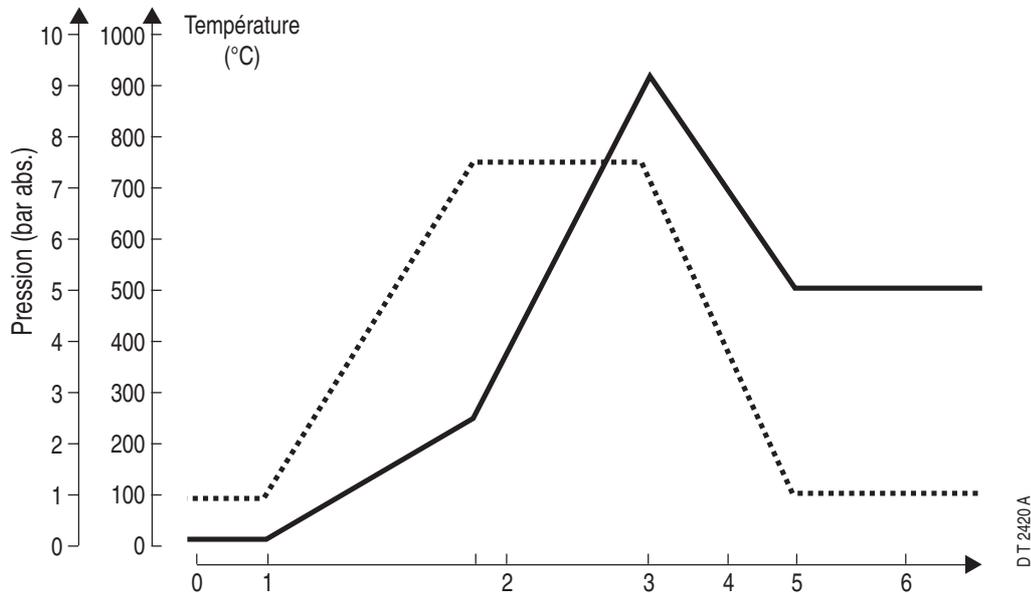
La turbine à gaz est constituée :

- d'un **générateur de gaz** comprenant un compresseur d'air, une chambre de combustion et une turbine de détente fournissant l'énergie mécanique nécessaire à l'entraînement du compresseur d'air
- d'une **turbine de puissance** accouplée à l'alternateur



## 2 - CONDITIONS OPÉRATOIRES

L'évolution des pression et température des gaz dans la turbine à gaz est représentée sur le schéma suivant.



Ces évolutions sont les suivantes :

- de 0 à 1 C'est le parcours de l'air dans l'ensemble de filtration et la gaine d'aspiration. Il y a une faible perte de pression à cause des filtres et du **silencieux**.
- de 1 à 2 C'est le parcours dans le compresseur. Il y a élévation de la pression (jusqu'à 7,5 bar environ). L'air en se comprimant s'échauffe, la température monte aux environs de 250°C.
- de 2 à 3 C'est le parcours dans la chambre de combustion. Par combustion de la totalité de combustible, il y a **élévation de la température**. Pour la bonne tenue des matériaux au contact des gaz chauds, la température au point 3 est limitée à 950°C par l'utilisation d'un **grand excès d'air** de combustion (de l'ordre de 300 %).
- de 3 à 4 C'est la **détente** dans la turbine HP, qui se traduit par une baisse de pression et de température. L'énergie mécanique recueillie permet d'assurer **l'entraînement du compresseur**.
- de 4 à 5 C'est la **détente** dans la turbine BP, qui se traduit par une baisse de la pression et de la température. L'énergie mécanique recueillie permet d'assurer **l'entraînement de l'alternateur**. Si la pression à la sortie de la turbine BP est sensiblement égale à la pression atmosphérique, la température des gaz d'échappement est encore aux environs de 530°C. Compte tenu de l'excès d'air de combustion, la teneur en oxygène des gaz d'échappement est de l'ordre de 15 %.

## II - CLASSEMENT DES TURBINES À GAZ

On peut classer les turbines à gaz en deux grandes familles :

- les turbines industrielles pouvant être du type 1 arbre ou 2 arbres
- les turbines type aviation à 2 arbres

Ces deux familles se différencient essentiellement par leur conception mécanique et la technologie utilisée.

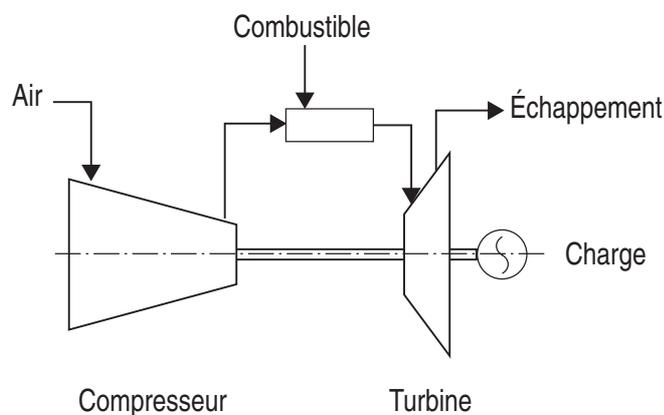
### 1 - TURBINES INDUSTRIELLES

Les turbines industrielles ou "**heavy duty**" sont des machines lourdes et assez rustiques dont l'objectif principal est la **longévité**. Ce critère de longévité conduit à l'utilisation de paramètres de fonctionnement peu sévères :

- taux de compression en général compris entre 6 et 8
- température entrée turbine limitée à 950°C environ (évite des problèmes de corrosion) donc à des rendements moyens de l'ordre de 25 à 30 %

En contrepartie, les révisions n'ont lieu que toutes les 20 000 ou 30 000 heures ; il y a lieu de noter que la durée de l'arrêt, lors de la révision, varie de 3 semaines à 1 mois. Cette révision se fait sur site.

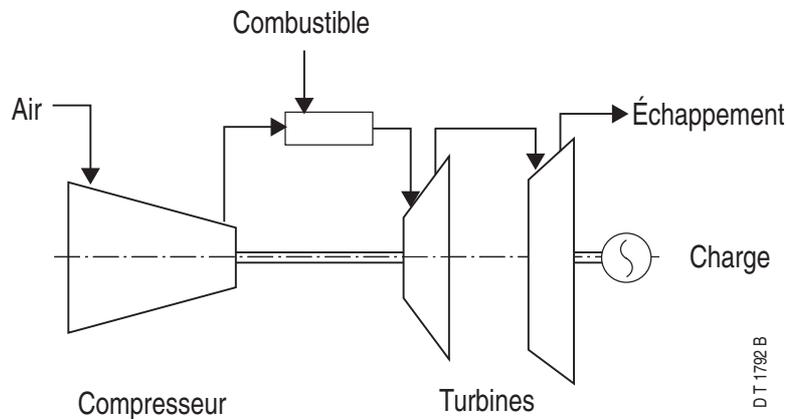
#### a - Turbine à un arbre



Dans ce type de turbine à gaz, le compresseur d'air, les turbines de détente et la machine entraînée sont sur le même arbre. Cette solution a l'avantage d'une grande simplicité mais conduit à une plage d'utilisation de vitesse limitée, à un moins bon rendement à charge partielle qu'une turbine à deux arbres. De plus, le moteur de lancement doit entraîner l'ensemble de la ligne d'arbre.

La turbine à un arbre est le plus souvent utilisée pour l'entraînement d'alternateur dont la vitesse de rotation est constante et qui, de plus, ne se charge pas lors de la montée en vitesse.

### b - Turbine à deux arbres



La turbine de détente est décomposée en deux parties :

- la turbine HP entraîne le compresseur d'air et lui seul par l'intermédiaire d'un arbre
- la turbine BP assure la fourniture d'énergie à la machine entraînée

La première ligne d'arbre constitue la génération de gaz chaud utilisé dans la deuxième ligne d'arbre pour la production d'énergie mécanique.

La turbine à deux arbres est sur le plan mécanique plus complexe que la turbine à un arbre. Par contre, elle permet d'obtenir un meilleur rendement à charge partielle, elle s'adapte particulièrement bien à l'entraînement d'un compresseur dont la prise en charge s'effectue lors de la montée en vitesse et permet de travailler sur une large plage de vitesse. A noter également la puissance réduite du moteur de démarrage qui n'entraîne que le premier arbre.

## 2 - TURBINES TYPE "AVIATION" ("Aéro-dérivée")

Les turbines type aviation également appelées turbines "jet" sont constituées d'un réacteur générateur de gaz chaud suivi d'une turbine de détente (en place de la tuyère) permettant de produire l'énergie mécanique. Il s'agit donc d'une turbine à deux arbres utilisant les techniques aéronautiques très répandues. La conception est évidemment bien différente des turbines industrielles puisque les critères de poids et d'efficacité sont primordiaux.

Le générateur de gaz ne peut plus être réparé sur site, il doit être remplacé par un générateur neuf ou rénové. La réparation se fait chez le constructeur, en atelier spécialisé.

### 3 - TECHNOLOGIE DES TURBINES À GAZ

Les particularités technologiques de la turbine à gaz sont essentiellement liées aux très hautes températures atteintes au niveau des turbines de détente (de 800 à plus de 1300°C selon les types).

Cela pose des problèmes de tenue au fluage, à la fatigue, à la corrosion des aubages en particulier. Un éventuel filtrage insuffisant de l'air aspiré par le compresseur ajouterait de l'érosion à ce qui précède.

Aussi, les matériaux utilisés sont de haute qualité : matériaux réfractaire à base de nickel ou cobalt additionné de chrome, ailettes obtenues par coulage à solidification orientée ou à coulage monocristal.

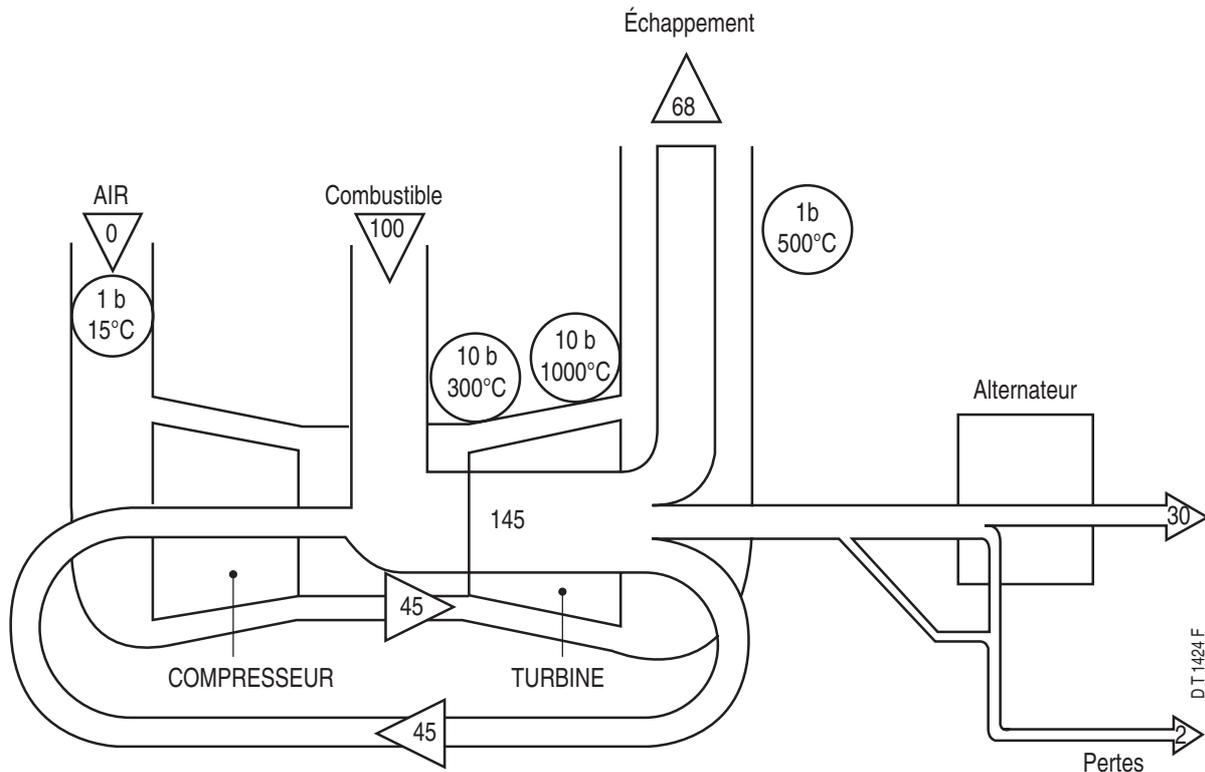
De plus, une partie du débit d'air (10 à 15 %) sortant du compresseur est dévié pour refroidir les ailettes par l'intérieur et pour obtenir un mince film d'air "frais" entre l'ailette et les gaz chauds de façon à limiter autour de 800°C la température de peau du métal.

Au niveau de la chambre de combustion, le débit d'air est divisé en plusieurs flux : environ 20 % du débit sert de comburant, 70 % sert d'air de dilution et le reste sert à refroidir les parois de la chambre et réduire la température des gaz atteignant la turbine haute pression.

### III - PERFORMANCES DES TURBINES À GAZ

#### 1 - BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA TURBINE À GAZ

Le schéma ci-dessous décrit la circulation d'énergie dans une turbine à gaz.



L'apport énergétique est réalisé sous forme de combustible dans les chambres de combustion. Pour 100 unités d'énergie ou de puissance ainsi introduites, 45 sont nécessaires à la compression de l'air correspondant. Cette énergie est prélevée par la turbine d'entraînement du compresseur.

L'énergie résiduelle est :

- pour une partie récupérée dans la turbine de puissance : 30 se retrouvent transmises à l'alternateur et 2 sont consommées sous forme de pertes mécaniques et entraînement d'auxiliaires
- pour le reste (68) évacuées avec les gaz d'échappement

Le rendement de la turbine à gaz est donc de 30 %.

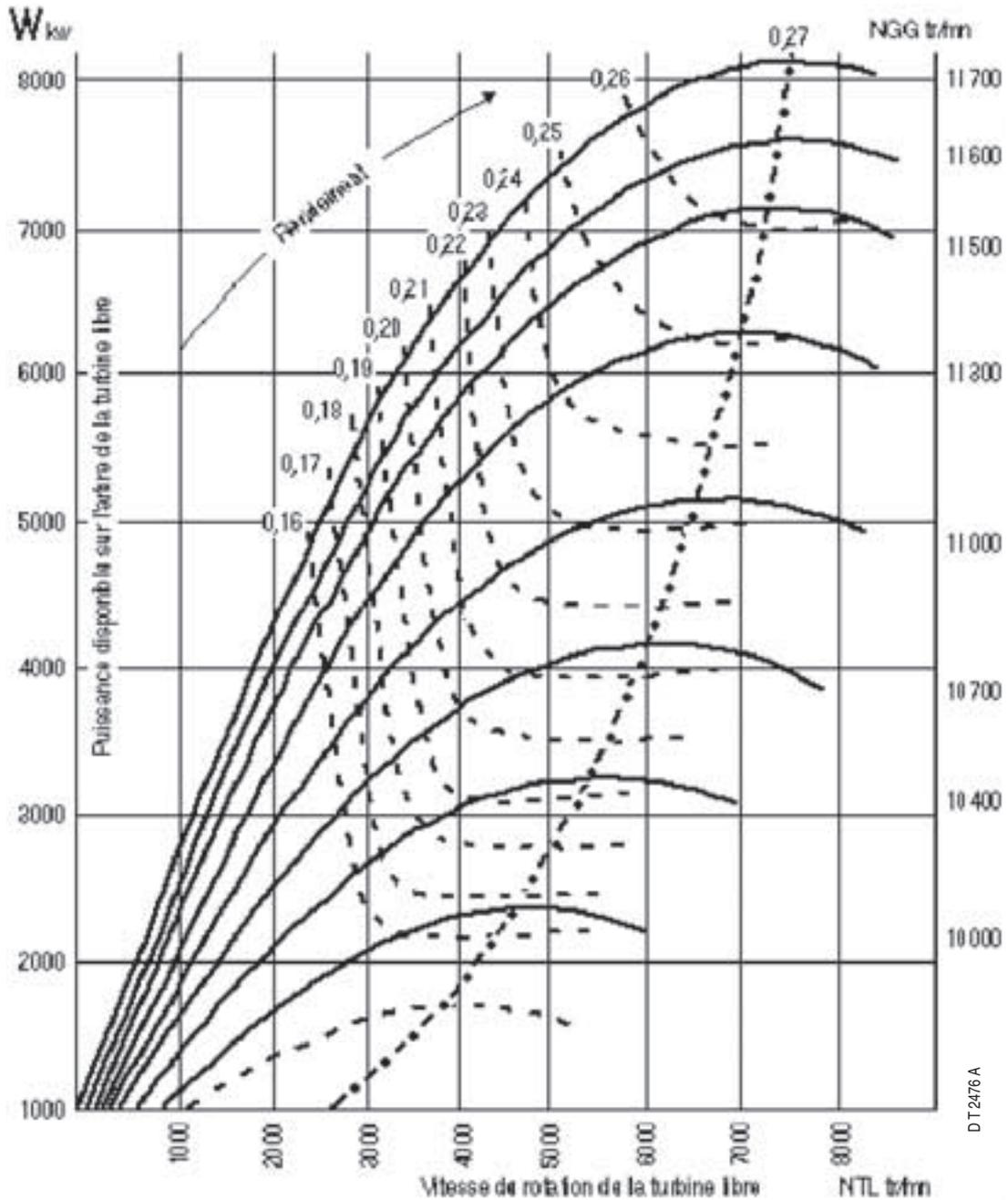
#### 2 - PERFORMANCES EN CONDITION STANDARD "ISO"

Les caractéristiques donnant la **puissance disponible** à l'arbre de la turbine en fonction de la **vitesse de rotation** étant très influencées par les conditions atmosphériques et par les pertes de charge amont et aval, il est d'usage de se rapporter à des conditions de référence qui sont :

- la pression de l'air aspiré est 1013 mb
- la température de l'air aspiré est 15°C
- les pertes de charge sont nulles à l'admission et à l'échappement

Ce sont les conditions ISO.

Un exemple de telles caractéristiques est donné ci-après :



P1 = 1013 mb  
t1 = 15°C

NB : Ces performances sont valables si les pertes de charge à l'admission et à l'échappement sont nulles

VAP = Vannes anti-pompage du compresseur  
GG = Générateur de gaz  
TL = Turbine libre (turbine secondaire)

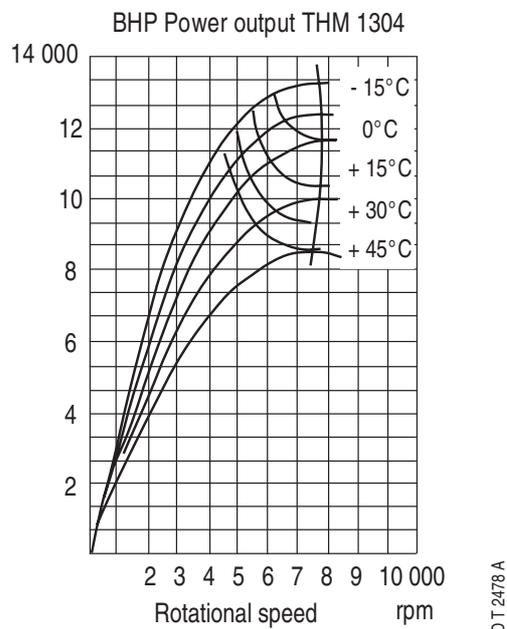
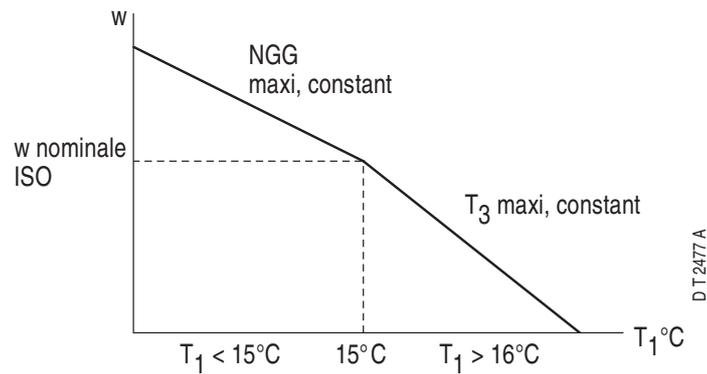
HISPANO-SUIZA  
TURBINE À GAZ THM 1304 - PUISSANCE DE LA TURBINE LIBRE

### 3 - PERFORMANCES EN CONDITIONS RÉELLES

Les caractéristiques sont modifiées par les conditions réelles sur site selon des coefficients ou des abaques fournis par le constructeur.

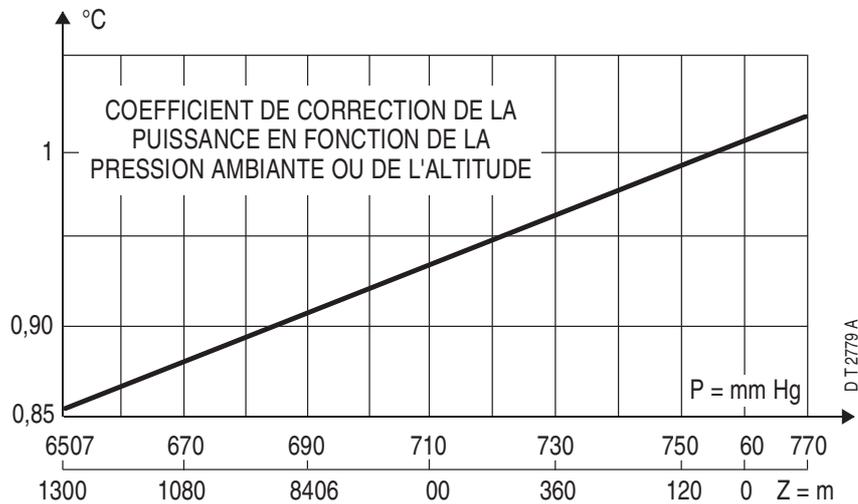
#### a - Influence de la température ambiante

La puissance disponible à l'arbre diminue quand la température de l'air augmente.



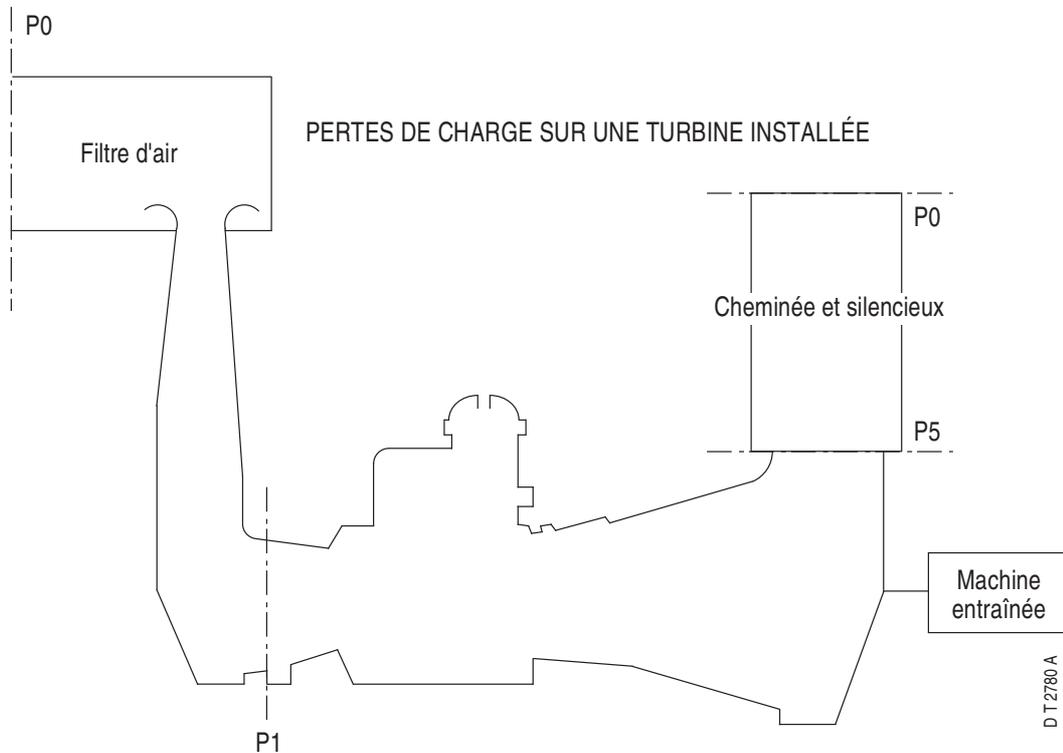
### b - Influence de la pression atmosphérique

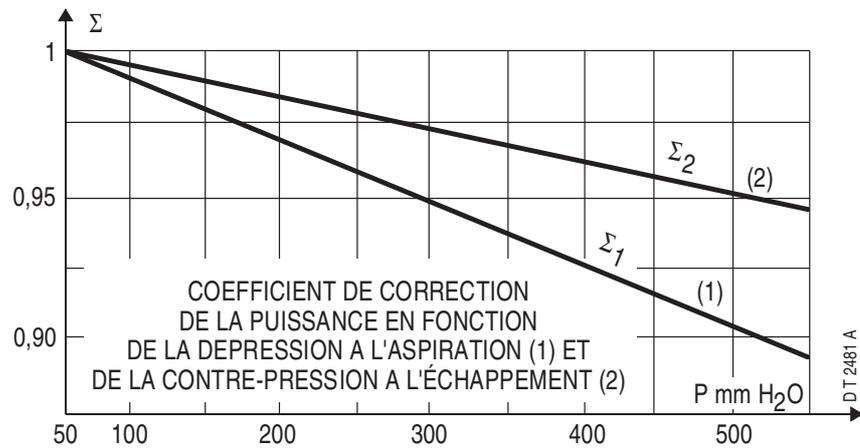
La puissance disponible diminue lorsque la pression atmosphérique diminue (ou quand l'altitude augmente).



### c - Influence des pertes de charge amont et aval

La puissance diminue avec les pertes de charge. L'influence est plus sensible à l'aspiration (diminution de la masse volumique de l'air) qu'à l'échappement.

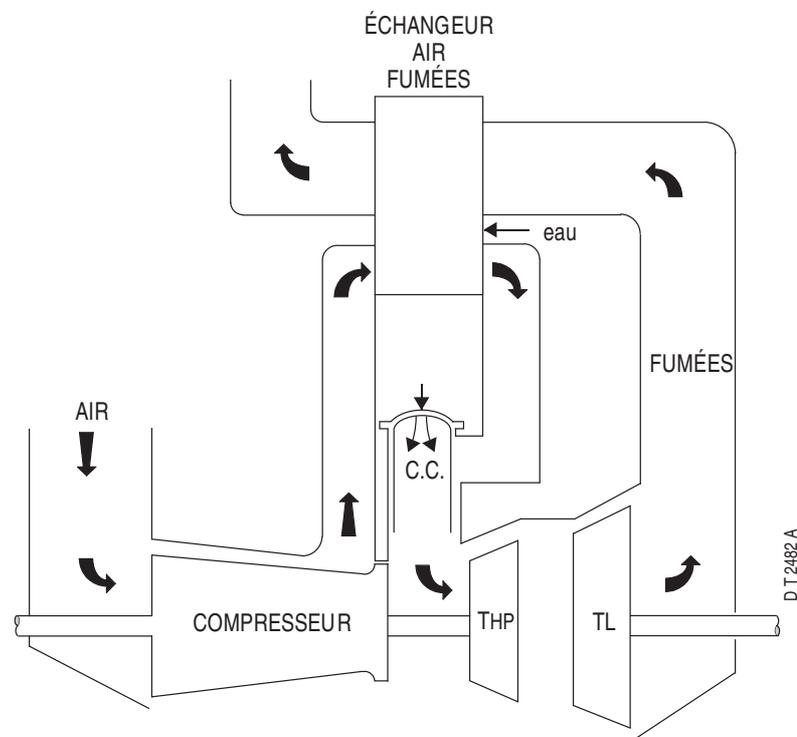


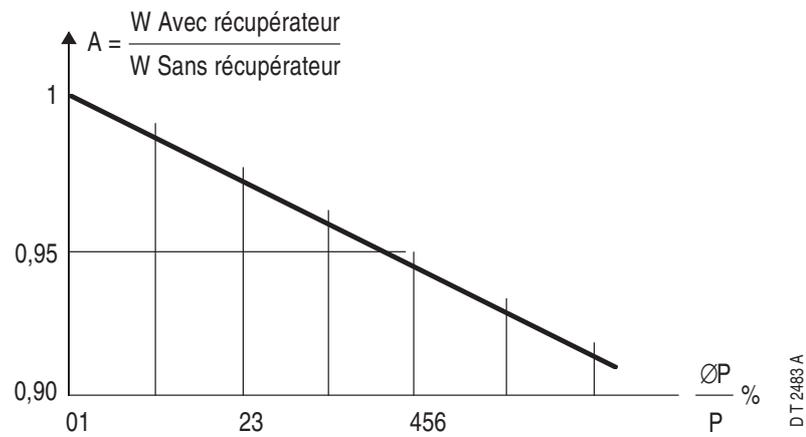


#### 4 - TURBINE À CYCLE RÉGÉNÉRATIF

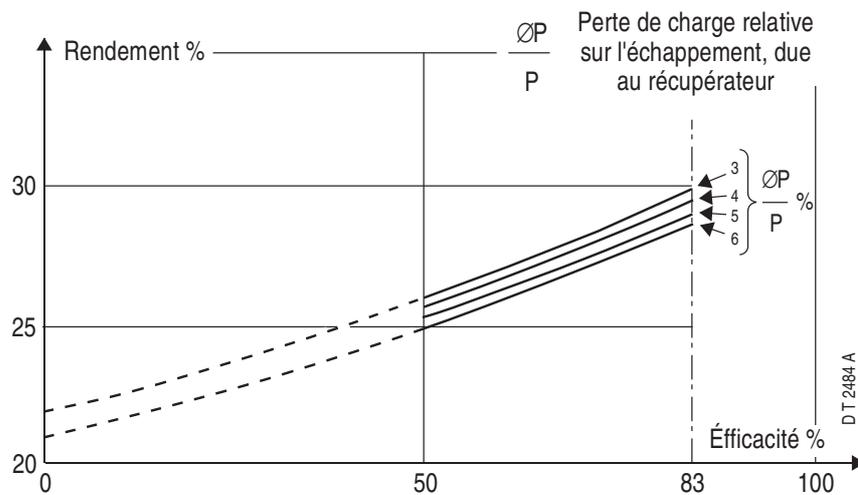
Une partie de la chaleur évacuée par les fumées peut être récupérée, dans un échangeur, pour surchauffer l'air avant son entrée dans la chambre de combustion.

Il y a alors économie de carburant et donc amélioration du rendement thermique intrinsèque, mais la petite perte de charge dans l'échangeur crée une légère contrepression à l'échappement de la turbine, ce qui altère la puissance disponible à l'arbre.





**Diminution de la puissance en fonction de la perte de charge introduite par le récupérateur**



**Augmentation du rendement thermique en fonction de l'efficacité du récupérateur de chaleur**

Le problème majeur du récupérateur est qu'il doit être très volumineux pour être efficace et pour éviter trop de pertes de charges sur l'échappement de la turbine

#### IV - RÉGULATION ET CONTRÔLE DES TURBINES À GAZ

La turbine à gaz se prête très bien à une conduite automatisée.

Le type de régulation dépend de l'utilisation de la turbine : turbocompresseur, turbopompe ou turbo-alternateur.

Dans tous les cas, la commande agit sur le **débit de combustible**, tout en surveillant qu'aucun seuil dangereux n'est atteint, parmi lesquels :

- vitesse de rotation maxi (2 seuils de vitesses différents si c'est une turbine à 2 arbres)
- température des gaz maxi, à l'entrée de la turbine BP
- seuil de pompage du compresseur d'air
- seuils liés aux auxiliaires ainsi que vibrations
- seuils liés aux paramètres du procédé ou de l'alternateur

Au **démarrage**, n'ayant pas d'air comburant, la turbine à gaz doit être démarrée par une machine auxiliaire (moteur électrique, pneumatique, hydraulique ou thermique) jusqu'à une vitesse suffisante, environ moitié de la vitesse nominale, pour que le compresseur soit opérationnel.

L'injection et l'allumage du combustible ont lieu à ce moment, puis la turbine s'auto-entretient, le démarreur est désaccouplé. La montée en puissance, rapide par rapport à une installation à vapeur, suit une rampe donnée par le constructeur.

## V - AMÉLIORATION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE PAR CYCLE COMBINÉ

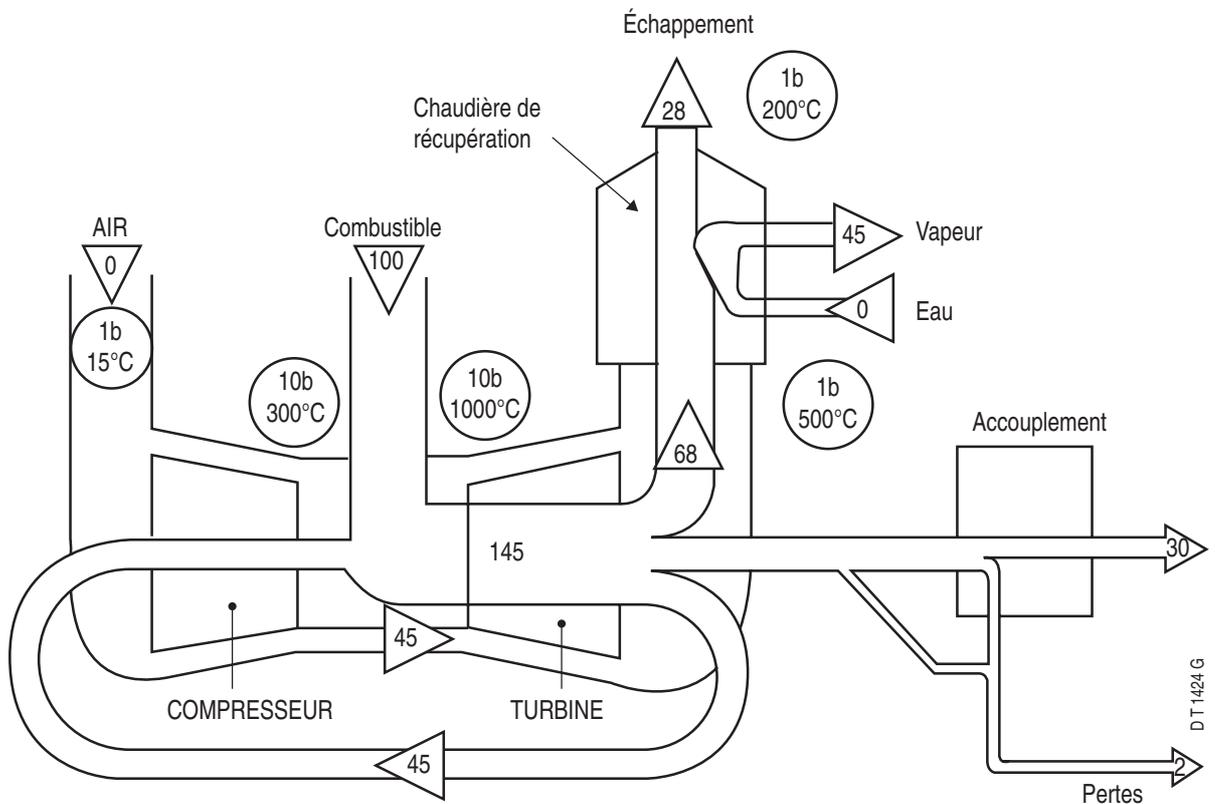
En dehors des évolutions tendant à améliorer le rendement thermique intrinsèque de la turbine à gaz (essentiellement par augmentation du taux de compression d'air et de la température des gaz chauds à l'entrée de la turbine haute pression), il est possible d'améliorer le rendement global d'une installation en utilisant l'énergie thermique contenue dans les fumées d'échappement.

Selon les besoins, plusieurs niveaux de récupération peuvent être proposés.

### 1 - GÉNÉRATION DE VAPEUR

La génération de vapeur peut être réalisée par simple échange de chaleur dans une chaudière de récupération.

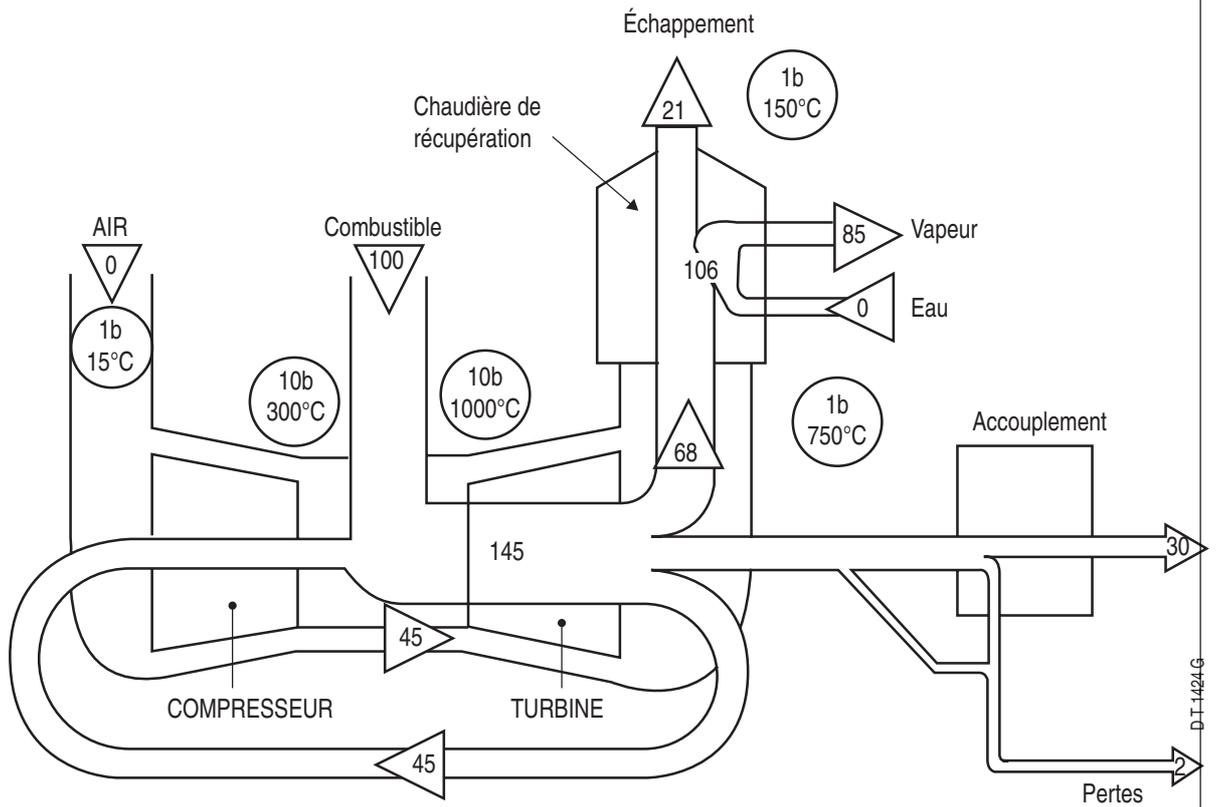
Un bilan énergétique peut être le suivant :

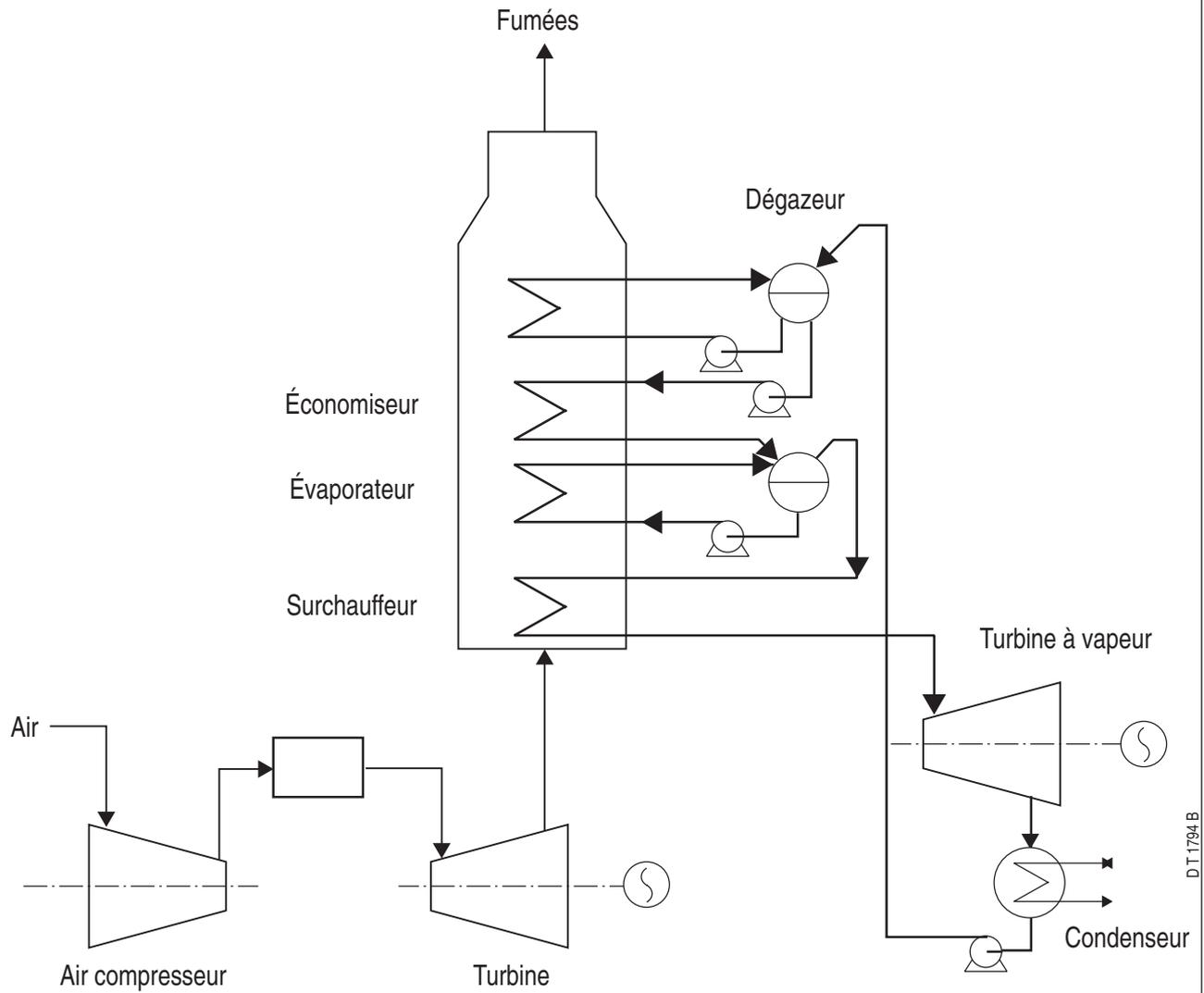


## 2 - GÉNÉRATION DE VAPEUR AVEC POST-COMBUSTION

L'excès d'air important contenu dans les fumées d'échappement autorise une combustion complémentaire dans une chaudière à brûleurs.

Le bilan peut être alors le suivant :





Exemple de cycle combiné gaz-vapeur – Rendement 47,8 %

(Document SULZER)

**Légende :**

- 1 = Turbine à gaz
- 2 = Chaudière de récupération
- 3 = Turbine à vapeur à condensation
- 4 = Déaérateur
- 5 = Condenseur

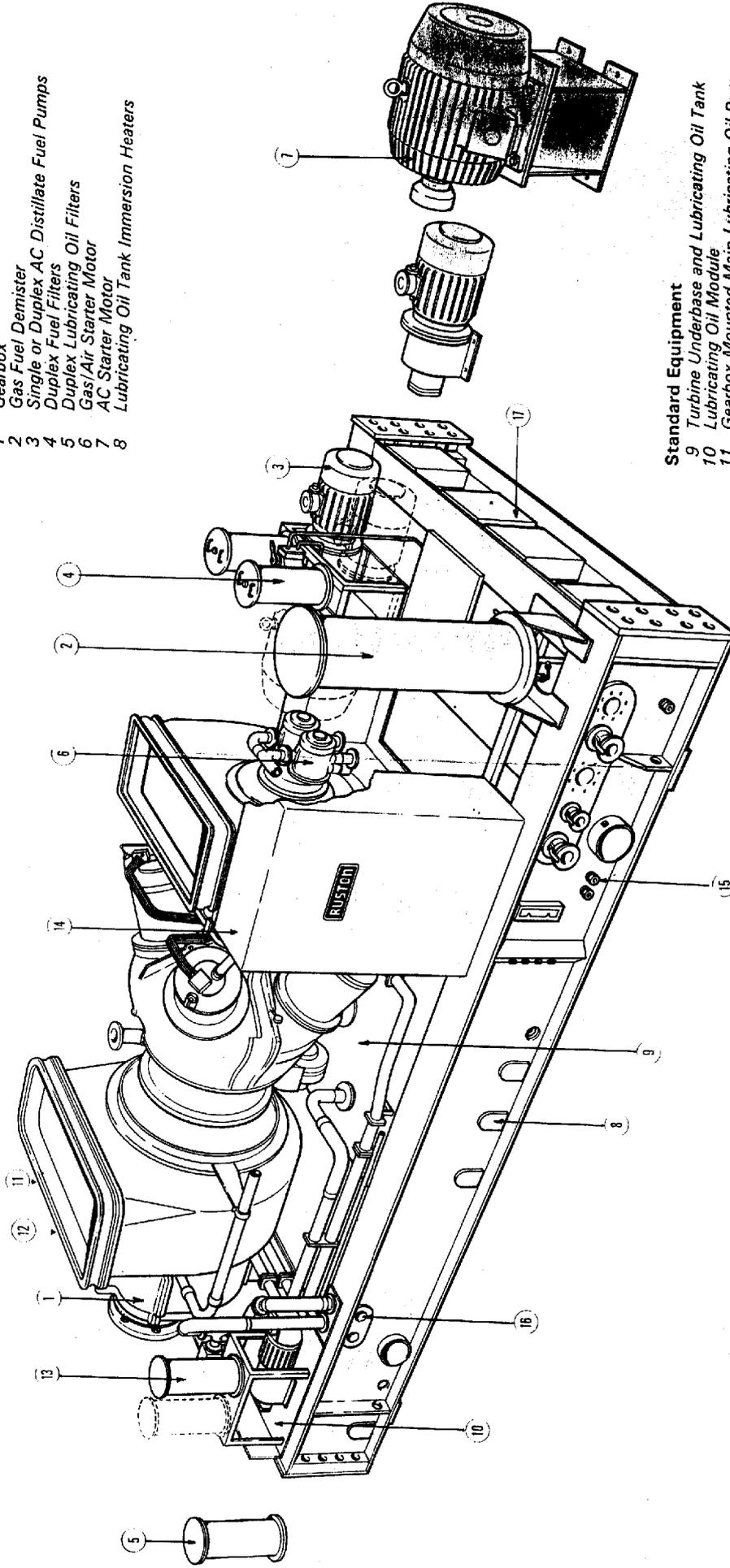
TURBINE À GAZ

— Planche n°1 —

D5-5

**Optional Standard Equipment**

- 1 Gearbox
- 2 Gas Fuel Demister
- 3 Single or Duplex AC Distillate Fuel Pumps
- 4 Duplex Fuel Filters
- 5 Gas/Air Starter Motor
- 6 AC Starter Motor
- 7 Lubricating Oil Tank Immersion Heaters
- 8



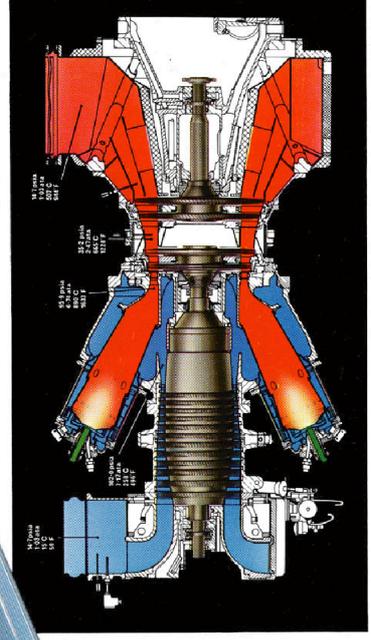
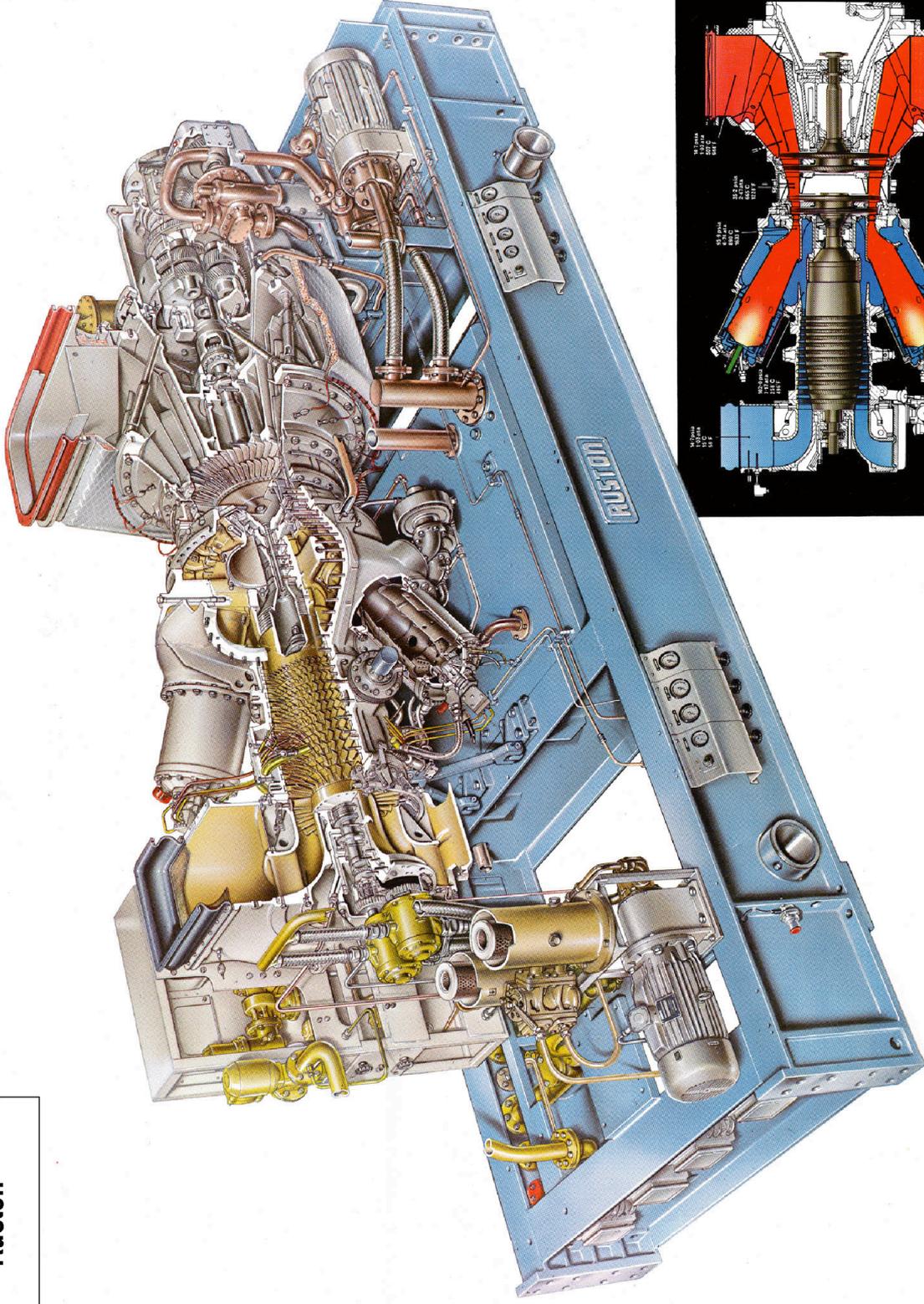
**Standard Equipment**

- 9 Turbine Underbase and Lubricating Oil Tank
- 10 Lubricating Oil Module
- 11 Gearbox Mounted Main Lubricating Oil Pump
- 12 AC Auxiliary and DC Emergency Lubricating Oil Pump
- 13 Single Lubricating Oil Filter
- 14 Fuel Valve Module
- 15 Fuel and Drain Connections
- 16 Lubricating Oil Cooler Connections
- 17 Electrical Connections

**TURBINE À GAZ**  
— Ruston —

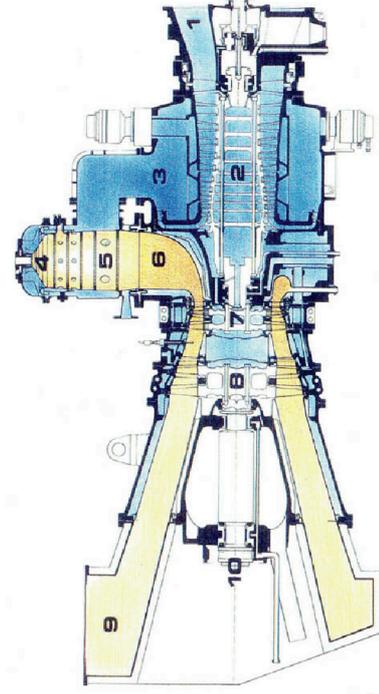
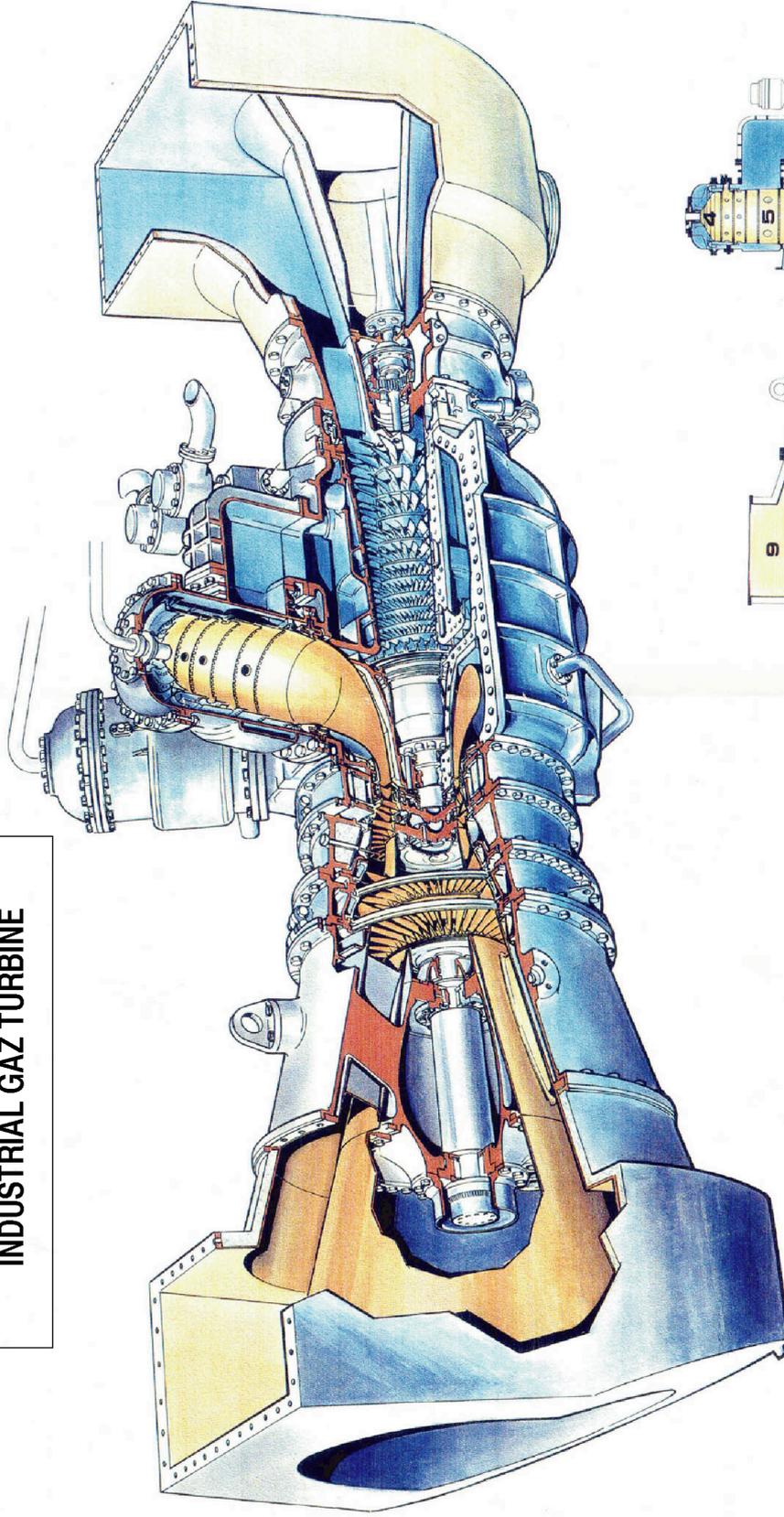
— Planche n°2 —

**D5-5**



**TURBINE À GAZ INDUSTRIELLE**

**INDUSTRIAL GAZ TURBINE**



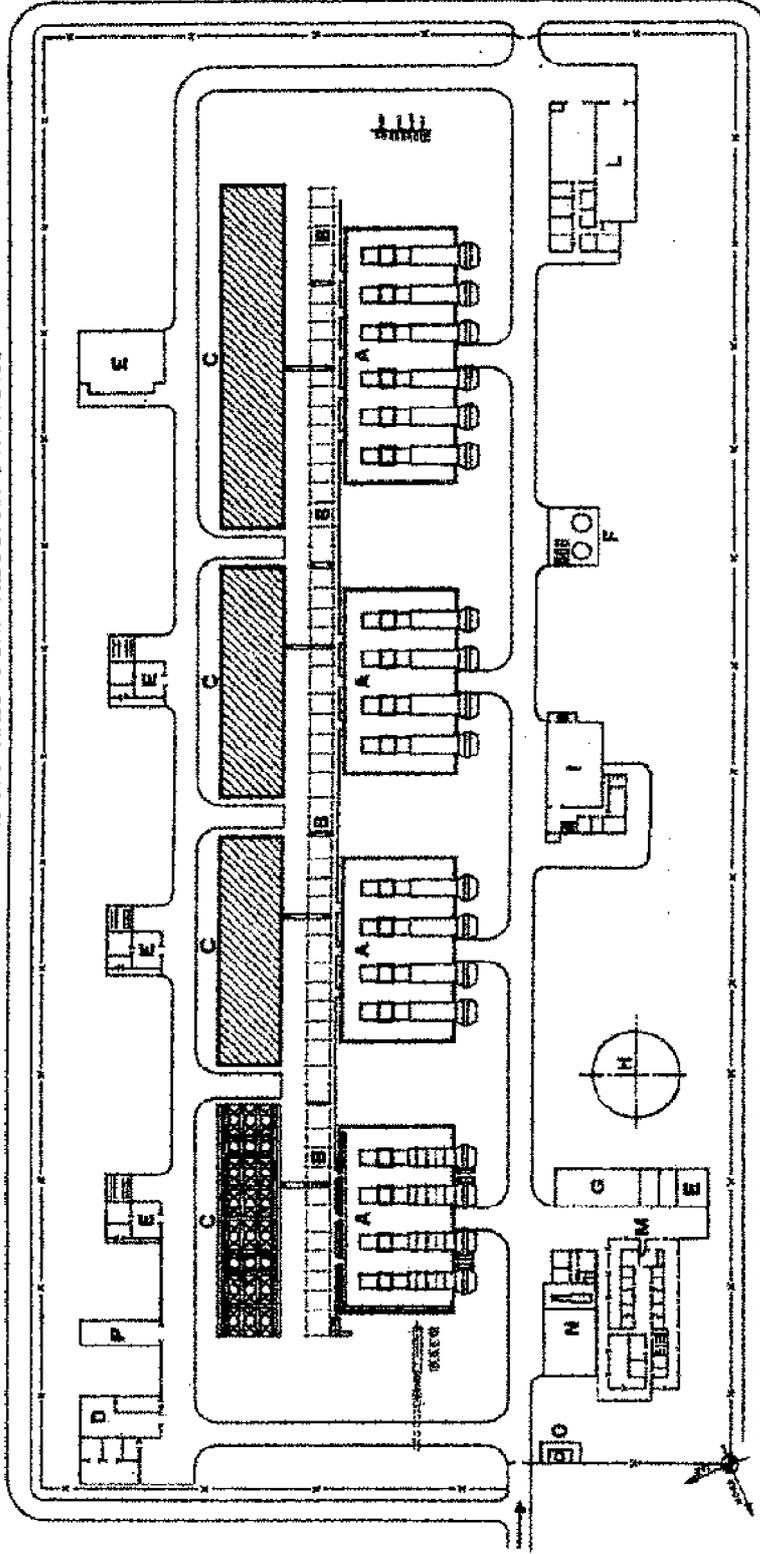
- |                                     |  |  |
|-------------------------------------|--|--|
| <b>1</b> - CARTER D'ENTRÉE D'AIR    | <b>6</b> - MANCHE A GAZ                    | <b>9</b> - CULOTTE D'ÉCHAPPEMENT           |
| <b>2</b> - COMPRESSEUR              | <b>7</b> - TURBINE HP                      | <b>10</b> - ACCOUPLEMENT MACHINE ENTRAÎNÉE |
| <b>3</b> - ALIMENTATION D'AIR       | <b>8</b> - TURBINE BP                      | <b>DRIVEN MACHINE COUPLING</b>             |
| <b>4</b> - ALIMENTATION COMBUSTIBLE | <b>9</b> - CULOTTE D'ÉCHAPPEMENT           |  |
| <b>5</b> - CHAMBRE DE COMBUSTION    | <b>10</b> - ACCOUPLEMENT MACHINE ENTRAÎNÉE |  |

- |                       |
|-----------------------|
| <b>GAS INLET DUCT</b> |
| <b>HP TURBINE</b>     |
| <b>LP TURBINE</b>     |
| <b>EXHAUST CASING</b> |

STATION DE RECOMPRESSION GAZ DE HASSI R' MEL

— Schéma d'implantation —

PIANTA DI UNA DELLE STAZIONI DI COMPRESIONE DI HASSI R'MEL  
PLANT OF ONE OF THE HASSI R'MEL COMPRESSION STATIONS



LEGENDA:

A - SALE COMPRESSORI / B - SOSTEGNI TUBAZIONI / C - REFRIGERANTI AD ARIA PER GAS E OLIO / D SOTTOSTAZIONE ELETTRICA / E - CABINE ELETTRICHE / F - SERBATOIO OLIO / G - AUSILIARI / H - APPROVVIGIONAMENTO ACQUA / I - SA- LA CONTROLLO / L - OFFICINA MANUTENZIONE / M - ALLOGGI VIGILI DEL FUOCO / N - SERVIZI VIGILI DEL FUOCO / O ALLOGGIO PORTIERE / P - TURBOALTERNATORE.

LEGEND:

A - COMPRESSOR HALLS / B - PIPERACK / C - GAS AND OIL AIR COOLERS / D - ELECTRIC POWER SUBSTATION / E - ELECTRIC CONTROL PANEL ROOM / F - OIL RESERVOIR / G - AUXILIARY SERVICES / H - WATER SUPPLY / I - STATION CONTROL ROOM / L - MAINTENANCE SHOP / M - FIREMEN'S LODGINGS / N - FIREMEN'S EQUIPMENT ROOM / O - GUARD'S HOUSING / P - TURBOGENERATOR ROOM.

**STATION DE RECOMPRESSION GAZ DE HASSI R'MEL**

— Schéma de principe —

**SCHEMA GAS DI STAZIONE  
STATION GAS DIAGRAM**

