



ROYAUME DU MAROC  
UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAÂDI  
Ecole Nationale des Sciences Appliquées  
Tanger

المملكة المغربية  
جامعة عبد الملك السعدي  
المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية  
طنجة



# TD - Machines Thermiques II

Séries 2 (suite) et 3

Pr. A. EL Fadar

16/03/2020

# **Série 2**

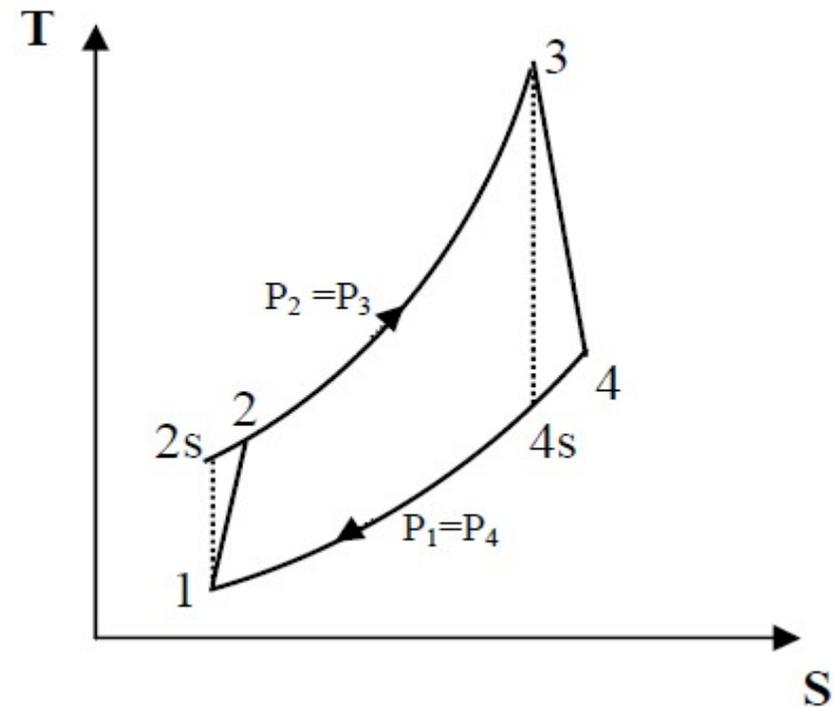
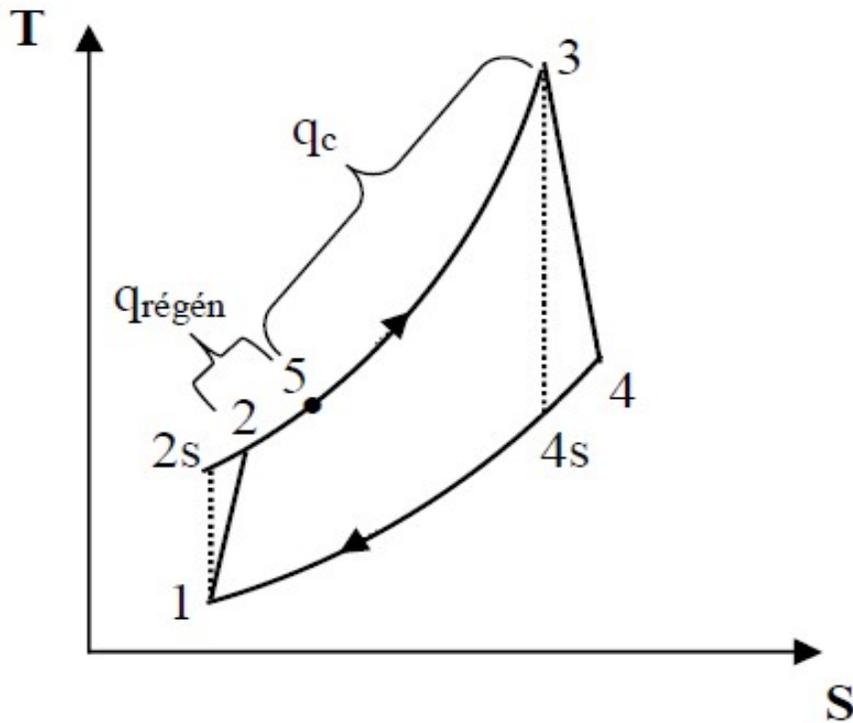
## **(Suite)**

16/03/2020

## Exercice 2

### Partie II : Cycle de Brayton avec régénération

Déterminer le rendement thermique de la turbine à gaz traitée dans la « **Partie I** » lorsque celle-ci est munie d'un régénérateur dont le rendement est de 80 %.  
Conclure.



## Solution Ex 2, Partie II

$$\eta_{\text{régén}} = \frac{|w_{\text{net}}|}{q_c} \quad \text{avec } |w_{\text{net}}| = 210,41 \text{ kJ/kg}$$

La chaleur fournie :  $q_c = h_3 - h_5$

$$\text{avec } h_3 = 1395,97$$

Or, l'efficacité du régénérateur :

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{régén}}^{\text{réel}}}{q_{\text{régén}}^{\text{max}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}$$

$$\Rightarrow h_5 = h_2 + \varepsilon (h_4 - h_2) = 605,39 + 0,8 \cdot (880,36 - 605,39) = 825,37 \text{ kJ/kg}$$

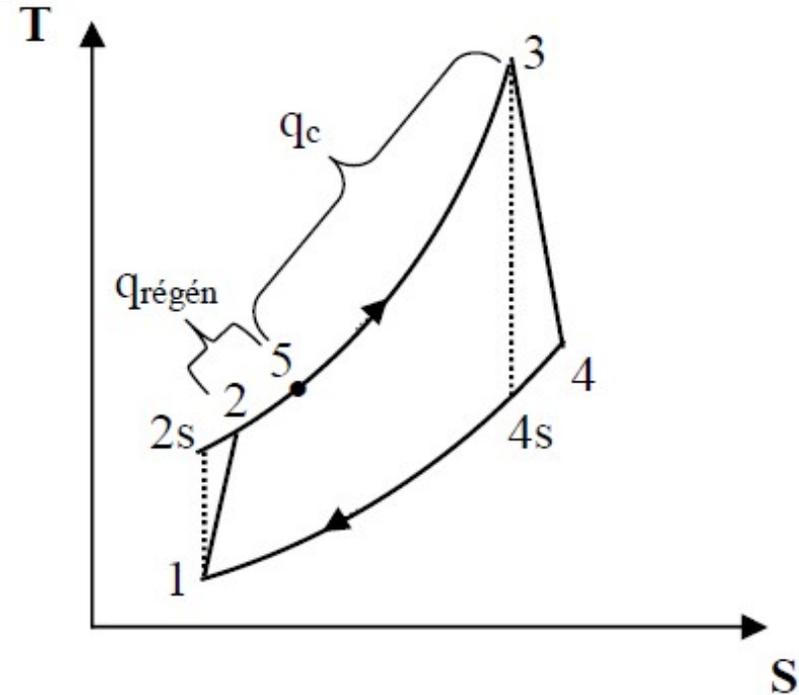
Soit  $q_c = h_3 - h_5 = 1395,97 - 825,37 = 570,6 \text{ kJ/kg}$ .

La chaleur épargnée est :  $h_5 - h_2 = 219,98 \text{ kJ/kg}$ .

Le rendement thermique de la turbine à gaz équipée d'un régénérateur vaut donc :

$$\eta_{\text{régén}} = \frac{210,41}{570,6} = 36,87 \%$$

La régénération permet ici d'augmenter le rendement thermique de 26,6 à 36,87 % soit de : 38,61 %.



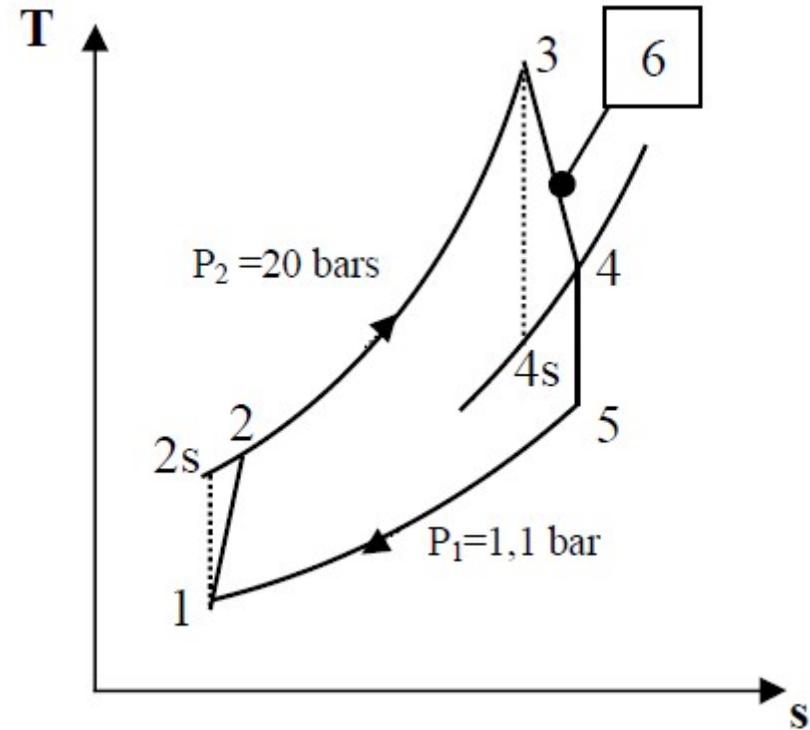
# Série 3

16/03/2020

## Solution Ex1

$p_1 = 1,1 \text{ bar}$  ;  $T_1 = 10^\circ\text{C} = 283,15\text{K}$  ;  $p_2 = 20 \text{ bars}$  ;  $T_3 = 1100^\circ\text{C} = 1373,15\text{K}$

1) Représentation du cycle



2) ( $1 \rightarrow 2s$ : détente isentropique):  $T_{2s} = T_1 \cdot (P_2 / P_1)^{\gamma-1/\gamma} = 283,15 \cdot \left(\frac{20}{1,1}\right)^{0,4/1,4} = 648,5 \text{ K}$

$$\eta_{is}^C = \frac{w_{is}^C}{w_{réel}^C} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{is}^C} = 283,15 + \frac{648,5 - 283,15}{0,8} = 739,84 \text{ K}$$

$$3) |w_{turbine}| = w_{compresseur} \Rightarrow h_3 - h_4 = h_2 - h_1 \Rightarrow cp_g (T_3 - T_4) = cp_a (T_2 - T_1)$$

$$\Rightarrow T_4 = T_3 - \frac{cp_a}{cp_g} (T_2 - T_1) = 1373,15 - \frac{1005}{1150} (739,84 - 283,15) = 974 \text{ K}$$

$$4) \eta_{is}^T = \frac{w_{réel}^T}{w_{is}^T} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \Rightarrow T_{4s} = T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\eta_{is}^T} = 1373,15 - \frac{1373,15 - 974}{0,9} = 929,65 \text{ K}$$

(3 → 4s : détente isentropique) :

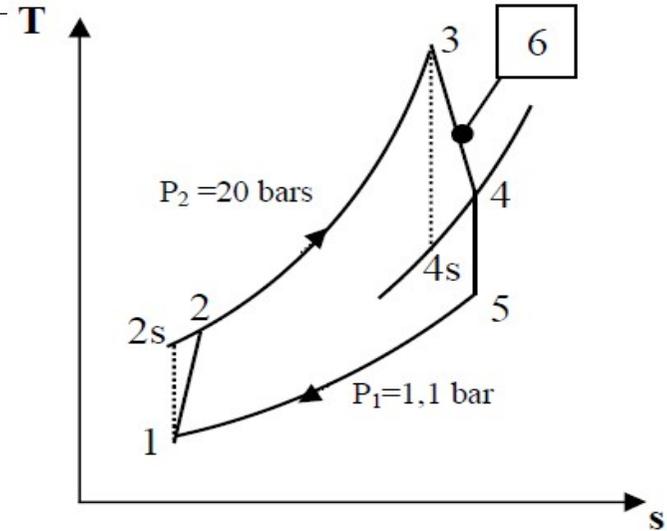
$$p_4 = p_{4s} = p_3 (T_{4s} / T_3)^{\gamma/\gamma-1} = 20 \cdot (929,65 / 1373,15)^{1,333/0,333} = 4,2 \text{ bars}$$

5) (4 → 5 : détente isentropique) :

$$T_5 = T_4 \cdot (P_5 / P_4)^{\gamma-1/\gamma} = 974 \cdot \left( \frac{1,1}{4,2} \right)^{0,333/1,333} = 696,95 \text{ K}$$

$$\left( h_5 + \frac{1}{2} v_5^2 \right) - \left( h_4 + \frac{1}{2} v_4^2 \right) = q + w = 0 ; (v_4 \ll v_5) \Rightarrow v_5 = \left[ 2 c_{pg} (T_4 - T_5) \right]^{1/2}$$

$$A.N : v_5 = \left[ 2 \cdot 1150 \cdot (974 - 696,95) \right]^{1/2} = 798,25 \text{ m / s} = 2873,73 \text{ km / h}$$



6) Puissance originelle = Puissance avec prélèvement

$$\underbrace{q c_{pg} (T_4 - T_3)}_{\text{puissance originelle}} = \underbrace{(q + x) c_{pg} (T_6 - T_3) + (q + x - 0,1) c_{pg} (T_4 - T_6)}_{\text{puissance avec prélèvement}}$$

avec  $q = 3 \text{ kg/s}$

$$x = \frac{3 (T_4 - T_3) - [3 (T_6 - T_3) + 2,9 (T_4 - T_6)]}{(T_4 - T_3)} = \frac{0,1 (T_4 - T_6)}{(T_4 - T_3)}$$

$$A.N: x = \frac{0,1(974 - 1173,15)}{(974 - 1373,15)} = 0,0499 \text{ kg/s}$$

16/03/2020

## Solution Ex 2

$$T_3 = ?$$

1. Le rendement mécanique du groupe compresseur-turbine s'écrit :  $\eta_m = \frac{W_c}{W_t}$   
où  $W_c$  est le travail absorbé par le compresseur et  $W_t$  est le travail fourni par la turbine 1.

$$\text{soit } h_3 = h_2 - \frac{(h_1 - h_0)}{\eta_m} \Rightarrow T_3 = T_2 - \frac{(T_1 - T_0)}{\eta_m} = 1073 - \frac{(500 - 288)}{0,98} = 856,6 \text{ K}$$

$T_{3'} = ?$  La température isentropique de détente de la 1<sup>ère</sup> turbine se déduit du rendement isentropique.

$$\eta_{is\_t_1} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_{3'})} = \frac{(T_2 - T_3)}{(T_2 - T_{3'})} \Rightarrow T_{3'} = T_2 - \frac{(T_2 - T_3)}{\eta_{is\_t_1}} = 1073 - \frac{(1073 - 856,6)}{0,8} = 802,5 \text{ K}$$

$$T_{4'} = ? \quad P_3 = P_2 \cdot (T_{3'} / T_2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 5 \cdot (802,5 / 1073)^{\frac{1,4}{0,4}} = 1,8 \text{ bars}$$

$$\text{et } T_{4'} = T_3 \cdot (P_4 / P_3)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 856,6 \cdot (1 / 1,8)^{\frac{0,4}{1,4}} = 724 \text{ K}$$

$T_4 = ?$  Le rendement isentropique de la 2<sup>ème</sup> turbine s'écrit :

$$\eta_{is\_t_2} = \frac{(T_3 - T_4)}{(T_3 - T_{4'})} \quad (c_p = cste)$$

donc  $T_4 = T_3 - \eta_{is\_t_2} (T_3 - T_{4'}) = 856,6 - 0,8.(856,6 - 724) = 750,5 K$

2. Débit de carburant:

$$\eta_c = \frac{(h_2 - h_1) \cdot q_a}{q_c \cdot P_{ci}} \Rightarrow q_c = \frac{(h_2 - h_1)}{P_{ci} \cdot \eta_c} \cdot q_a = \frac{c_p (T_2 - T_1)}{P_{ci} \cdot \eta_c} \cdot q_a$$
$$\Rightarrow q_c = \frac{1,0045 \cdot (1073 - 500)}{10^4 \cdot 4,18 \cdot 0,97} \cdot 35,3 = 0,5 \text{ kg / s}$$

3. Rendement de l'installation :

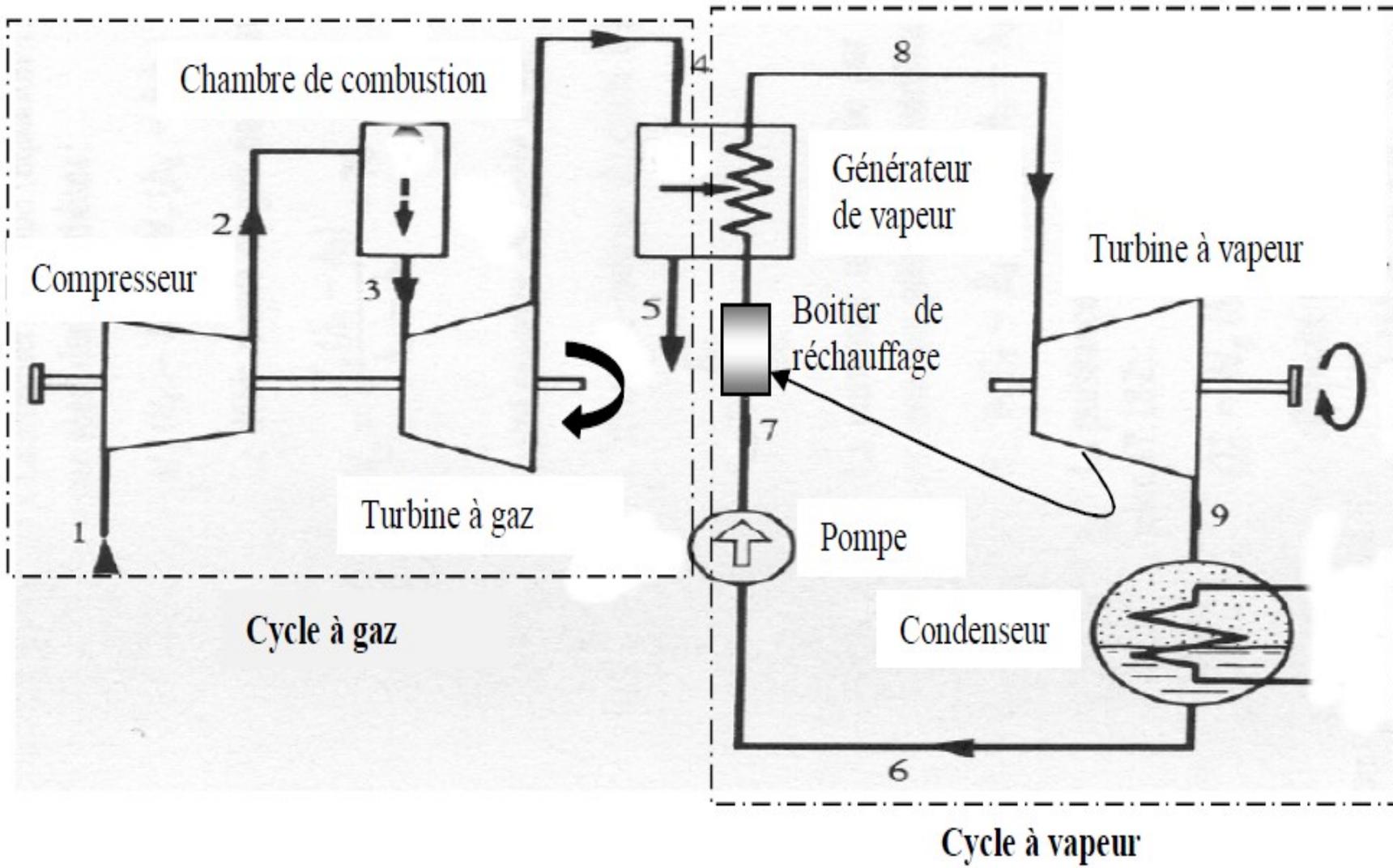
Puissance de l'alternateur :  $P_{alt} = 5000 \text{ kW}$

Puissance fournie :  $q_c \cdot p_{ci} = 0,5 \cdot 10^4 \cdot 4,18 = 20900 \text{ kW}$

Le rendement global est :

$$\eta_{gl} = \frac{P_{alt}}{q_c \cdot p_{ci}} = 23,9 \%$$

### Solution Ex 3



Centrale thermique à cycle combiné gaz-vapeur.

16/03/2020

## 1. Débit de gaz dans l'échangeur ?

Le bilan énergétique de l'échangeur gaz d'échappement-eau s'écrit :

$$2 q_{air} \cdot c_{p\_air} \cdot \Delta T_{air} = q_{eau} (h_{vap} - c_{eau} \cdot T_{eau})$$

avec

$h_{vap}$  est l'enthalpie de la vapeur d'eau à  $T = 400$  °C et à  $p = 30$  bars :

$h_{vap} = 3231,7$  kJ/kg (table de vapeur surchauffée).

et

$$\left. \begin{array}{l} c_{p\_air} - c_{v\_air} = r \\ c_{p\_air} / c_{v\_air} = \gamma \end{array} \right\} \Rightarrow c_{p\_air} = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} = \frac{1,4 \cdot 287}{0,4} = 1,0045 \text{ kJ / kg.K}$$

$$\text{soit } q_{air} = \frac{q_{eau} (h_{vap} - c_{eau} \cdot T_{eau})}{2 c_{p\_air} \cdot \Delta T_{air}} = \frac{103 \cdot (3231,7 - 4,18 \cdot 110)}{2 \cdot 1,0045 \cdot (457 - 200)} = 552,97 \text{ kg / s}$$

## 2. Rendement global de l'installation à gaz $\eta_g$ :

La puissance électrique fournie par les alternateurs est :

$$P_{\text{alt}} = (2.112\ 500) = 225000 \text{ kW}$$

La puissance fournie aux chambres de combustion :

$$P_{\text{comb}} = 2. q_{\text{mc}} \cdot P_{\text{ci}} = 2.8,8.42000 = 739200 \text{ kW}$$

$$\text{soit } \eta_g = P_{\text{alt}} / P_{\text{comb}} = 0,304$$

## 3. Rendement global de l'installation du cycle combiné gaz-vapeur :

C'est le rapport entre les puissances reçues sur les arbres des turbines à gaz et à vapeur et la puissance fournie aux chambres de combustion :

$$\eta_{\text{gv}} = (225000 + 90000) / 739200 = 0,426.$$

D'où l'intérêt d'un tel cycle combiné (augmentation du rendement de 40 %).