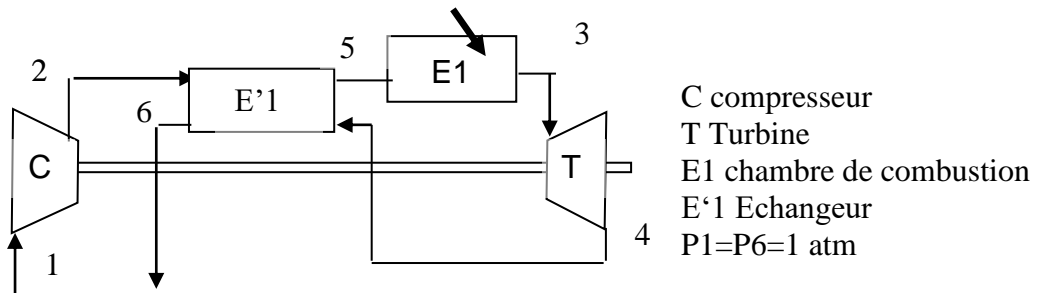


Etude d'une turbine à gaz avec régénération

Le schéma ci-dessous donne les éléments d'une turbine à gaz (TAG) utilisée pour produire du travail (recueilli sur l'axe de la turbine). On suppose que la compression et la détente sont adiabatiques et réversibles. Les échanges de chaleurs se font à pression constante.

le gaz est de l'air que l'on assimile à un gaz parfait dont la capacité calorifique massique c_p et $\gamma=c_p/c_v$ sont constants .

La température à la sortie de la turbine est élevée. On veut utiliser ce gaz chaud émis à la sortie de la turbine pour préchauffer le gaz en sortie du compresseur, grâce à l'échangeur interne E'1.



Le rapport de compression est défini par $r= P2/P1= P3/P4=8$

On donne $T1=300K$ et $T3=1150K$, $\gamma=c_p/c_v =1,4$

1°-a) Le préchauffage suppose que $T4>T2$.

Est ce toujours vrai, c'est à dire existe-t-il un rapport limite de compression r_{lim} au delà duquel $T4$ est inférieure à $T2$?

Donner sa valeur numérique ainsi que la température $T2$

1°-b) On suppose que le préchauffage est possible, $r=8$

L'échangeur E'1 est parfait, $T5=T4$ et $T6=T2$.

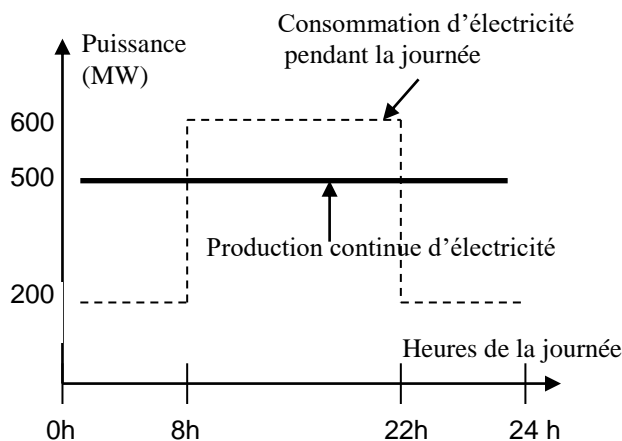
Donner l'allure du cycle sur un diagramme (T,s).

Donner la valeur du rendement $\eta_{théo}$ en fonction de $T1$, $T3$, r et γ .

Faire l'application numérique

STOCKAGE DE L'ENERGIE SOUS FORME D'AIR COMPRIMEE

On reprend l'installation ci-dessus avec un échangeur interne parfait (cas du 1°). Elle est utilisée pour produire de l'électricité. Or la demande en électricité n'est pas constante pendant la journée et elle est schématisée par le graphe suivant.



L'installation de base a une production continue d'électricité. Pour les heures de fortes consommations, on peut mettre en route une installation supplémentaire.

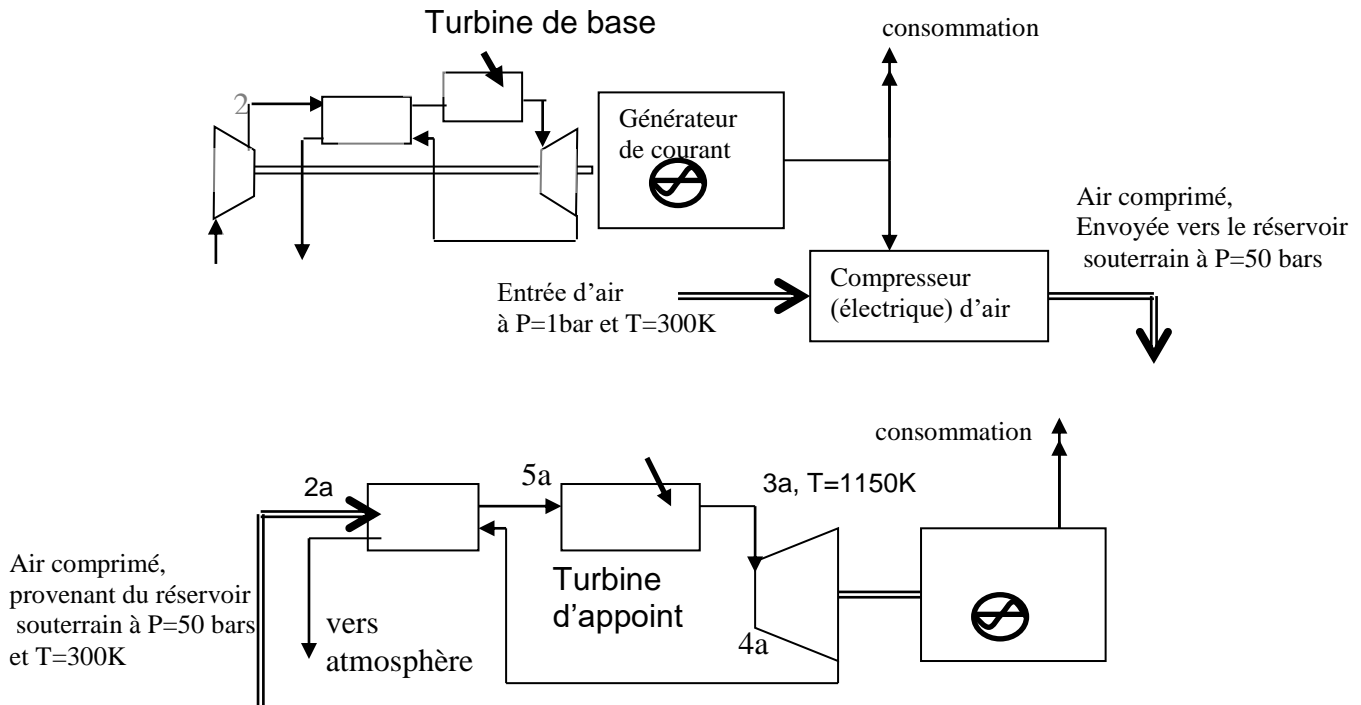
Mais on peut aussi imaginer de stocker l'énergie produite en trop pendant les heures creuses et de la restituer pendant les heures de pleine consommation.

Une solution consiste à comprimer de l'air dans un grand réservoir souterrain pendant les heures creuses et ensuite de restituer cet air pendant les heures de pointe.

La production d'électricité par l'installation de base sert donc

- à la consommation pendant les heures de pointe,
- à la consommation et à la compression de l'air pendant les heures creuses

Pendant les heures de pointe, l'appoint d'électricité est fournie par une installation supplémentaire, que nous appellerons 'turbine d'appoint'.



Les générateurs de courant sont parfaits, toutes les puissances mécaniques délivrées par les turbines sont transformées en puissance électrique.

Rappel : $1\text{ bar}=10^5\text{ Pa}$,

Dans le système SI : $c_p=1004$, $R=8,32$ (cst des gaz parfaits) et $M_{\text{air}}=0,029$ (masse molaire).

2°-a) A partir des valeurs de puissance reportées sur la figure de consommation/production d'électricité, *montrer que la solution de stockage de l'énergie pendant les heures creuses peut être théoriquement envisagée.*

2°-b) *Calculer le débit massique d'air m_{app} dans la turbine d'appoint et m_{base} dans la turbine de base pour que, pendant les heures de pleine consommation, la production d'électricité soit suffisante. On rappelle que les détentes dans les turbines sont isentropes.*

2°-c) *Calcul de l'énergie et du temps nécessaire à la compression de l'air stocké.*

Quelle est la masse totale d'air comprimée utilisée par la turbine d'appoint.

Quelle est l'énergie électrique utilisée par le compresseur pour comprimer cette masse totale, sachant que le compresseur est adiabatique avec une efficacité égale à 0,8 ?

En déduire le temps de fonctionnement, pendant les heures creuses, de la turbine de base pour comprimer cet air.

2°-d) *Calculer l'énergie dépensée pendant les heures creuses dans la chambre de combustion E1 de la turbine de base pour comprimer l'air (qui sera utilisé ensuite pendant les heures pleines).*

Rappel : les caractéristiques de la turbine de base ont été données ou calculées au 1°)

2°-e) *Définir le rendement énergétique global de l'installation de production d'électricité pour l'ensemble de la journée (heures pleines et heures creuses).*

En vous aidant des réponses aux questions 4°-b-c-d, *donner sa valeur numérique.*

2°-f) *Comparer cette valeur à celle obtenue si la production d'électricité est faite par les deux turbines basse pression, c'est à dire que l'on ne réalise pas le stockage d'air comprimé et que la turbine d'appoint est alimentée avec de l'air à la pression atmosphérique.*

Conclusion : *quel argument ferait qu'il soit intéressant de stocker de l'air pendant les heures creuses ?*

Réponses

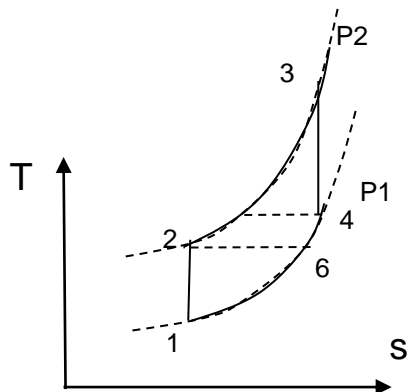
1°-a) Pour une transformation adiabatique réversible $P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{cst}$

$$\implies T_2/T_1 = r^{(\gamma-1)/\gamma} \text{ et } T_3/T_4 = r^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Si on veut faire de la régénération, il faut $T_2 < T_4$

$$\implies r < (T_3/T_1)^{(\gamma-1)/2\gamma} = 10,5, T_2 = 588,5 \text{ K}$$

1°-b)



$$W_{\text{net}} = - [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)], Q_1 = h_3 - h_5 \text{ et } h_5 = h_4$$

$$\eta_{\text{théo}} = 1 - (T_2 - T_1)/(T_3 - T_4)$$

$$\eta_{\text{théo}} = 1 - T_1/T_3 \cdot r^{(\gamma-1)/\gamma} = 0,527$$

2°-a) Energie produite pendant 24h : $500 \times 24 = 12\,000 \text{ MWh}$

Energie consommée pendant 24h : $200 \times 10 + 600 \times 14 = 10\,400 \text{ MWh}$, < Energie produite

On peut envisager de stocker de l'énergie

2°-b) $100 \text{ MW} = m_{\text{app}} c_p (T_{3a} - T_{4a})$, $T_{4a} = T_{3a} 50^{(1-\gamma)/\gamma} \implies m_{\text{app}} = 128 \text{ kg/s}$

$$500 \text{ MW} = m_{\text{base}} c_p (T_3 - T_5) \eta_{\text{théo}}, T_5 = T_4, T_4 = T_3 50^{(1-\gamma)/\gamma} \implies m_{\text{app}} = 1834 \text{ kg/s}$$

2°-c) La turbine d'appoint fonctionne pendant 14h, soit une masse totale utilisée de $6,45 \cdot 10^6 \text{ kg}$

L'efficacité du compresseur est définie par $\varepsilon = W^{\text{comp}}_{\text{isen}}/W^{\text{comp}}$, $\varepsilon = 0,8$

$$W^{\text{comp}} = W^{\text{comp}}_{\text{isen}}/0,8 = m_{\text{comp}} c_p (T_{f,\text{isen}} - T_1)/0,8, \text{ avec } T_{f,\text{isen}} = T_1 50^{(\gamma-1)/\gamma} = 917,4 \text{ K}$$

Energie totale utilisée par le compresseur pendant 14h = $4,998 \cdot 10^{12} \text{ J}$

Temps de fonctionnement, pendant les heures creuses, pour la compression d'air de stockage = $4,998 \cdot 10^{12} \text{ J} / 300 \text{ MW} = 4,62 \text{ heures}$.

2°-d) $Q_c^{\text{comp}} = W^{\text{comp}} / \eta_{\text{théo}} = 9,484 \cdot 10^{12} \text{ J}$

2°-e) rendement global sur une journée :

$$\eta_{24\text{h}} = [\text{Energie électriques fournies}] / [\text{Energies consommées par la chambre de combustion}]$$

Energie électriques fournies = $200 \text{ MW} \cdot 10\text{h} + 600 \text{ MW} \cdot 14\text{h}$

Energies consommées = $m_{\text{base}} 200/500 c_p (T_3 - T_5)(10 - 4,62)$ pour l'électricité heures creuses

+ $m_{\text{base}} c_p (T_3 - T_5)(4,62)$ pour la compression de l'air

+ $m_{\text{base}} c_p (T_3 - T_5)(14)$ pour l'électricité heures pleines

+ $m_{\text{app}} c_p (T_{3a} - T_{5a})(14)$ pour l'électricité heures pleines

(rappel m_{base} est ce qui permet de fournir 500 MW électrique)

On a $m_{\text{base}} c_p (T_3 - T_5) = 500 \text{ MW} / \eta_{\text{théo}}$ et $m_{\text{app}} c_p (T_{3a} - T_{5a}) = 100 \text{ MW}$

Energies consommées = $(2/5 \cdot 5,38 + 4,62) / \eta_{\text{théo}} + 14 \cdot 500 \text{ MW} / \eta_{\text{théo}} + 14 \cdot 100 \text{ MW}$

$$\implies \eta_{24\text{h}} = 0,493$$

2°-f) le rendement sans compression d'air est : $10\,400 \text{ MWh} / [200 \text{ MW} / \eta_{\text{théo}} \cdot 10 + 500 \text{ MW} / \eta_{\text{théo}} \cdot 14]$

$$= 0,527$$

Cette valeur est meilleur que avec le circuit de stockage d'air car le compression a un rendement inférieur à un.

Par contre, avec un stockage d'air, on utilise une puissance de base plus faible.