

Durée : 2 h - Documents autorisés : notes personnelles manuscrites, documents remis pendant les cours et les 2 "Aide-mémoire ..."

Recommandations :

- Pour la clarté de vos copies, identifier les questions et encadrer les résultats.
- Ecrire les formules avant l'application numérique.
- Donner les résultats avec 4 chiffres significatifs maximum.
- Numéroté les feuilles (1 feuille = 4 pages) en indiquant le nombre total de feuilles (Exemple : 1/3, 2/3, 3/3).

1. Déroulement d'un projet de centrale électrique (3 points)

Remplir le QCM remis séparément et le rendre avec votre copie.

2. Turbine à Gaz (5 points)

- 2.1. Quels sont actuellement les enjeux majeurs pour les concepteurs de turbines à gaz ?

L'objectif des questions suivantes est de calculer un cycle thermodynamique d'une turbine à gaz en cycle simple ; les questions sont donc liées.

Données :

- Chaleur massique du fluide (air, gaz ou mélange) : $c_p = 1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
 - Rapport des chaleurs spécifiques du fluide : $\gamma = 1,4$
 - Point de référence ISO pour les fluides à l'entrée de la turbine : 15°C et 1 bar
- 2.2. Quel est le taux de compression d'un compresseur si la température en fin de compression est de 320°C avec un rendement polytropique de 89 %.
- 2.3. Quelle est la puissance reçue par l'air qui traverse ce compresseur avec un débit de 170 kg/s ?
Quelle est alors la puissance que le compresseur absorbe ?
- 2.4. L'air comprimé pénètre dans une chambre de combustion et est mélangé avec 3 kg/s d'un gaz dont le PCI est 49500 kJ/kg .
Quelle est la puissance calorifique introduite dans le cycle par cet apport de gaz ?
Quel est le débit massique à la sortie de la chambre ?
Quelle est la température du mélange final, dans la chambre de combustion, après combustion ?
- 2.5. Ce mélange gazeux traverse maintenant une turbine de détente.
La température à l'échappement est de 520°C .
Quel est le rendement isentropique de la turbine ?
Quelle est la puissance délivrée par la turbine de détente ?
- 2.6. Quelle est la puissance globale de cette turbine à gaz (turbine de détente + compresseur) ?
Quel est son Heat Rate ?
Que proposez-vous pour améliorer ces performances ?

3. Turbine à Gaz - Systèmes (5 points)

- 3.1. Une turbine à gaz est prévue pour fonctionner avec du gaz naturel à 200°C (PCI = 36820 kJ/ Nm³, d = 0,575).
Calculer l'indice de Wobbe modifié.
10% en volume d'hydrogène (PCI = 10775 kJ/Nm³, d = 0,07) est ajouté au gaz naturel.
Calculer le nouvel indice de Wobbe.
Est-ce que l'ajout d'hydrogène est acceptable pour le bon fonctionnement de la machine (sans changer le matériel de la combustion) ?
- 3.2. Soit une enceinte autour d'un système dégageant de la chaleur.
La puissance de dimensionnement du ventilateur est de 60 kW, calculée pour de l'air à l'intérieur de l'enceinte à 60°C.
La puissance maximale annoncée par le fabricant est 70 kW.
En fait, la température dans l'enceinte varie de 45°C à 75°C.
Déterminer les puissances nécessaires pour ces températures extrêmes.
Est-ce que le ventilateur est correctement dimensionné ?
- 3.3. Dans un réservoir, on souhaite augmenter le niveau de liquide de 35 m à 40 m.
Le système et sa régulation simple ouverte ont un gain de 0,8.
Quelle est la valeur finale atteinte par le niveau de liquide ?
Quelle est le niveau atteint après un temps correspond à la constante de temps ?
- 3.4. Le niveau de pression acoustique L_p d'une source sonore ponctuelle en champ libre à 1 m vaut 76 dB.
Quel est le niveau de puissance acoustique L_w de cette source ?
En déduire le niveau de pression acoustique à 1 m de la même source posée sur le sol ainsi que posée sur le sol, mais dans un coin d'une pièce parallélépipédique ?

4. Electricité et turboalternateurs (3 points).

- 4.1. Une source électrique diphasée équilibrée crée, à une extrémité de 2 conducteurs, les tensions périodiques définies, par rapport à un neutre commun (situé à l'autre extrémité des 2 conducteurs), par :
- $$v_a(t) = V \sqrt{2} \cos(\omega t) \text{ et } v_b(t) = V \sqrt{2} \sin(\omega t)$$
- Ces 2 conducteurs traversant des circuits RLC identiques, les intensités périodiques des courants qui s'y établissent sont déphasées du même angle φ par rapport aux tensions.
Calculer la puissance totale instantanée dissipée dans l'ensemble de ces 2 circuits.
Comment varie-t-elle en fonction du temps ?
- 4.2. La ligne d'arbres de l'EPR de Flamanville 3 est constituée d'un alternateur et d'une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 1760 MW.
La vitesse de rotation nominale du groupe est de 1500 tr/min.
En cas de court-circuit entre 2 bornes, le couple accidentel transmis au stator de l'alternateur est de 9 fois le couple nominal.
L'alternateur complet possède une masse de 700 t et les appuis latéraux du stator sur le massif, considérés comme linéaires (parallèlement à l'axe du rotor), sont distants de 4,5 m.
Quels sont les efforts extrémaux exercés sur chacun de ces 2 appuis au cours de ce fonctionnement accidentel ?
Donner leur intensité, leur direction et préciser s'ils sont statiques ou dynamiques.

- 4.3. Dans le diagramme puissance active - puissance réactive d'un turboalternateur, quels sont les 3 phénomènes physiques qui imposent les limites de fonctionnement ? Quel est le paramètre qui permet d'agir sur la production ou la consommation d'énergie réactive ? Quelle est l'action qui permet d'augmenter l'énergie réactive fournie au réseau ?

5. Cycles combinés (3 points)

On considère un cycle combiné constitué d'un bloc 109E à une pression. Les données connues au niveau de la chaudière de récupération sont indiquées sur le schéma de la Fig. 1 ci-dessous.

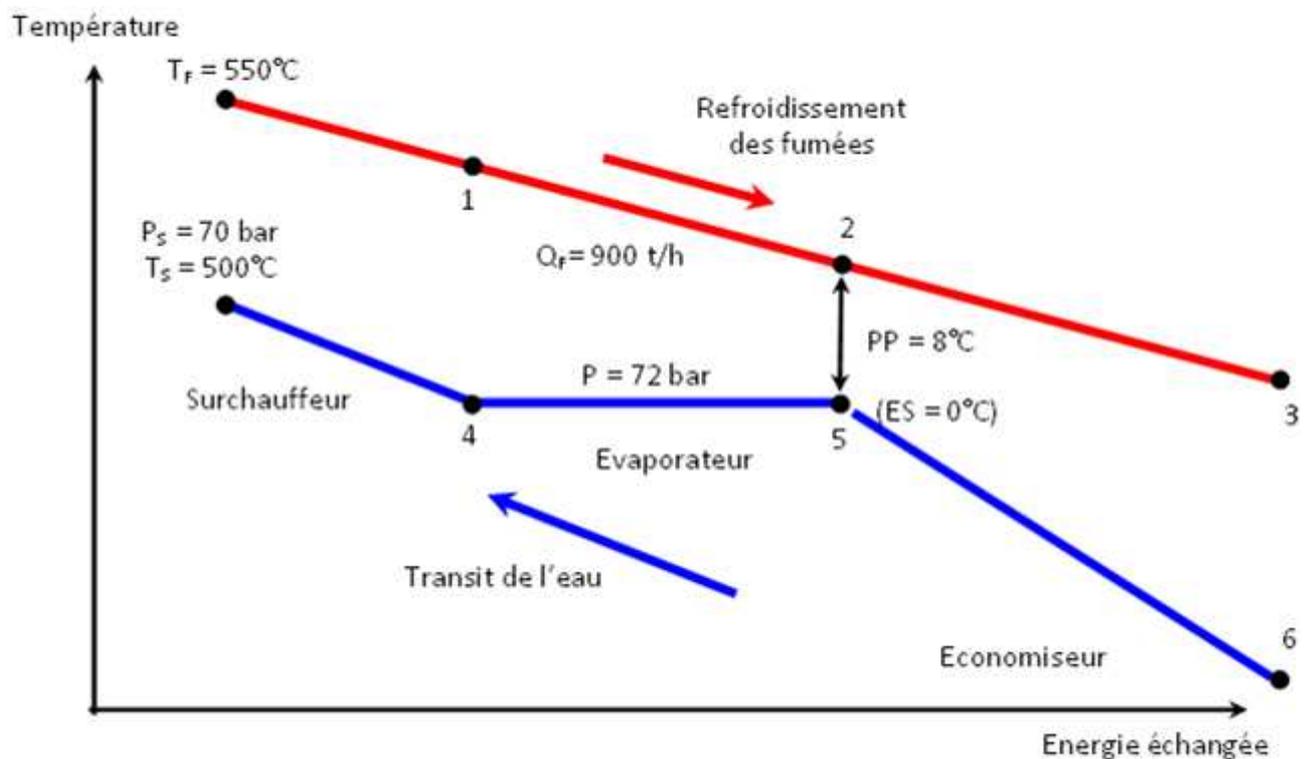


Fig. 1 : Données relatives à une chaudière de récupération

Hypothèses :

- Capacité calorifique des fumées : $C_{PF} = 1.1 \text{ kJ/kg.K}$
- Rendement des échangeurs : 0.99

- 5.1. Combien y a-t-il de turbine(s) à gaz et combien de turbine(s) à vapeur ?
- 5.2. Quelle est l'enthalpie de la vapeur surchauffée à la sortie de la chaudière ?
- 5.3. Quelle est l'enthalpie de la vapeur saturée au point 4 ?
- 5.4. Quelle est l'enthalpie de l'eau saturée au point 5 ?
- 5.5. Quelle est la température des fumées au point 2 ?
- 5.6. Quel est le débit de vapeur envoyé à la turbine à vapeur ?

6. Capture du CO₂ (5 points)

1^{ère} partie : Emissions sans capture

Une centrale thermique ultra-supercritique, sans capture de CO₂, à charbon pulvérisé, a les caractéristiques électriques suivantes :

- Puissance brute : 910 MWe (MW électriques)
- Consommation électrique des auxiliaires : 73 MWe

Elle consomme 72,7 kg/s de charbon bitumineux avec un PCI de 24,9 MJ/kg contenant :

- 65,32% de carbone,
- 9,6% de cendres.

6.1. Performances sans capture.

- a. Donner sa puissance nette.
- b. Exprimer sa consommation thermique, en MWth (MW thermiques).
- c. Calculer son rendement thermique net, en %.

6.2. Emissions de CO₂ venant du charbon.

- a. Calculer, en kg/s, son rejet de CO₂ dans l'atmosphère venant du charbon brûlé (on admet un rendement de combustion de 100%).
- b. Exprimer cette émission en Mt/an en considérant 7500 h/an de fonctionnement de la centrale.
- c. Les émissions mondiales totales annuelles de CO₂ dues au charbon utilisé pour la production d'électricité sont de 8,5 Gt/an (valeur 2009).
A combien de centrales de ce type correspondraient ces émissions ?

Rappel des masses atomiques : C = 12, O = 16

6.3. CO₂ des fumées venant de l'air.

Le débit total des fumées après combustion et dépoussiérage est de 802,1 kg/s.

Ce débit massique inclut l'air de combustion dans la chaudière et les entrées d'air parasites, ainsi que le charbon hors cendres.

- a. Calculer le débit total d'air ayant participé à la production des fumées dépoussiérées, en kg/s.
- b. La concentration actuelle de CO₂ dans l'atmosphère étant de 380 ppmv (parties par million en volume - valeur de 2005) et compte tenu d'une masse molaire de l'air de 29 g/mol, évaluer l'apport de CO₂ atmosphérique dans les fumées, en kg/s.
- c. En déduire la quantité totale de CO₂ émis à l'atmosphère par les fumées, en kg/s.

6.4. Calculer l'émission spécifique de CO₂ de la centrale (rapport de l'émission de CO₂ à la puissance nette), en kg/MWh, à pleine charge,

- a. Venant de la combustion du charbon,
- b. Totale incluant le CO₂ atmosphérique.

2^{ème} partie : Centrale avec capture

On équipe la centrale (la même que pour la 1^{ère} partie) d'un système de capture post-combustion aux amines conçu pour capturer 90% du CO₂ des fumées.

Le débit de CO₂ total des fumées à l'entrée du système de capture considéré est de 173,7 kg/s (valeur fournie par cet énoncé, différente du résultat de la question 6.3).

- La chaleur de régénération de la solution est de 2,5 GJ/t de CO₂ capturé.
- Les auxiliaires du procédé de capture consomment 25 MWe.
- La compression finale du CO₂ à 120 bar consomme 50 MWe.

6.5. Emissions à capturer.

- a. Pourquoi ce débit de CO₂ à capturer est-il légèrement inférieur au résultat de la question 6.3 ?
- b. Partant de cette valeur (173,7 kg/s), calculer les émissions spécifiques de CO₂ (rapport du débit de CO₂ à la puissance nette de la centrale sans capture), en kg/MWh.

6.6. Donner le nom

- c. d'un autre procédé de capture post-combustion,
- d. de 2 autres solutions technologiques de capture de CO₂ applicables à la combustion du charbon.

6.7. Extraction vapeur pour la capture.

Pour régénérer la solution d'amines utilisée pour la capture, de la vapeur à 3,5 bar absolu est nécessaire au régénérateur (rebouilleur).

Cette vapeur est de la vapeur BP extraite du cycle vapeur à pleine charge.

Calculer

- a. La quantité de CO₂ capturé par le système, en kg/s,
- b. La chaleur de régénération des amines extraite sur le cycle vapeur, en MWth.

6.8. Perte de puissance brute due à l'extraction.

Le rendement brut électrique de la partie basse pression du cycle eau-vapeur est de 24%.

- a. En admettant que le rendement du cycle s'applique à la puissance thermique extraite, calculer la perte de puissance électrique brute provoquée par l'extraction de vapeur pour le procédé de capture.
- b. En déduire la puissance brute électrique avec capture.

6.9. Performances nettes et émissions de CO₂ avec capture.

Calculer :

- a. La consommation des auxiliaires (incluant la capture et la compression du CO₂, qui s'ajoutent aux autres auxiliaires nécessaires au fonctionnement de la centrale), en MWe,
- b. La puissance nette avec capture, en MWe,
- c. Le rendement net avec capture, en %.

En déduire :

- d. La pénalité d'énergie de capture, en %,
- e. Les émissions résiduelles spécifiques de CO₂ (rapport du débit de CO₂ à la puissance nette) à la sortie du système de capture, en kg/MWh.

Rappel : Pénalité de capture =
$$\frac{\text{Puissance sans capture} - \text{Puissance avec capture}}{\text{Puissance sans capture}}$$

TE53 – Automne 2011
Sujet de l'Examen FINAL
20/01/2012

6.10. Emissions et captures annuelles de CO₂.

Sur la base d'un fonctionnement à pleine charge durant 7500 h/an, calculer :

- a. La quantité annuelle (en Mt/an) de CO₂ émise par la centrale sans capture,
- b. La quantité annuelle (en Mt/an) de CO₂ capturé.

6.11. Emissions évitées et taxe CO₂ économisée.

Calculer :

- a. La quantité annuelle d'émissions de CO₂ évitées par la centrale avec capture, en Mt/an (utiliser les résultats de la question 6.5 et de la question 6.9).
- b. Les taxes CO₂ évitées annuellement par cette centrale, en M€/an, en considérant une taxe future de 45 €/t à l'horizon 2025.
- c. L'objectif moyen « réaliste » de réduction d'émissions par capture et stockage de CO₂ étant de 2 Gt/an à l'horizon 2030, combien de centrales de ce type faudrait-il installer pour réaliser cet objectif ?