

Durée : 2 h - Documents autorisés : notes personnelles manuscrites, documents remis pendant les cours et les 2 photocopiés de l'UV.

Recommandations :

- Pour la clarté des copies, merci d'identifier les questions et d'encadrer les résultats.
- Ecrire les formules avant l'application numérique.
- Donner les résultats numériques 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. Turbines à Gaz (4 points)

- 2.1. Quels sont les paramètres essentiels dans les performances des turbines à gaz ?
Quels sont les facteurs limitants ?
- 2.2. Dans les conditions ISO (15°C, 1 bar) le rendement polytropique d'un compresseur de turbine à gaz est de 92%.
Quelle est la température à la sortie du compresseur si le rapport de compression est de 15 ?
On prendra le rapport des chaleurs massiques de l'air constant et égal à 1,4.
- 2.3. Quelle est la puissance du compresseur de la question 2.2 si le débit d'air absorbé est de 185 kg/s, en considérant qu'il n'y a pas d'extraction d'air de refroidissement ?
On considère un C_p constant de 1kJ/kg.K tout le long de la transformation.
- 2.4. La puissance d'une turbine de détente est de 104 MW.
Quelle est approximativement la puissance du compresseur associé au point nominal (ce compresseur n'a rien à voir avec celui des questions précédentes).
Quelle est alors la puissance sur l'arbre de la machine ?
- 2.5. Au point de fonctionnement nominal, on injecte, dans la chambre de combustion de cette turbine, 2,5 kg/s d'un gaz dont le PCI est de 48950 kJ/kg.
Quelle est la puissance thermique de la chambre ?
En reprenant le résultat de la question 2.4, quel est le Heat Rate de la turbine à gaz, (en kJ/kW.h) ?

3. Turbines à Gaz - Systèmes (4 points)

- 3.1. Par quel moyen s'effectue le démarrage d'une turbine à gaz (de 0% à 20% de la vitesse de rotation nominale) ?
Ecrivez l'équation générale de l'augmentation de la vitesse de rotation en fonction de l'inertie du rotor, du couple moteur fourni par le système de démarrage et du couple résistant.
- 3.2. Soit un ventilateur dimensionné pour aspirer de l'air à l'intérieur d'une enceinte à une température de 60°C.
La puissance calculée du ventilateur est 60 kW.
La puissance maximale du moteur électrique annoncée par le fabricant est 65 kW.
La température dans l'enceinte varie entre 45°C et 75°C.
Déterminez les puissances nécessaires pour assurer la ventilation avec ces 2 températures extrêmes.
Le ventilateur est-il correctement dimensionné pour toutes les conditions de température de cette plage ?
- 3.3. Imaginez un circuit du premier ordre en boucle ouverte.
La constante de temps vaut 1 seconde.
Si on rajoute 1,5 seconde de retard, au bout de combien de temps atteint-on 63,2% de la réponse à un échelon unitaire ?
Une augmentation du gain va-t-elle changer la constante de temps ?
- 3.4. La mesure de pression acoustique à 1 m d'une source sonore ponctuelle en champ libre est de 95 dB.
Calculer la puissance acoustique de cette source sonore.
A quelle distance de la source sonore la pression acoustique pondérée sera-t-elle égale à 85 dBA, si sa fréquence est de 500 Hz ?

4. Cycles combinés (4 points)

On considère un cycle combiné à 1 niveau de pression constitué d'une turbine à gaz associée à une chaudière de récupération et d'une turbine à vapeur (Fig. 1).

La Fig. 2 indique les données connues au niveau de la chaudière de récupération.

Hypothèses : - Capacité calorifique des fumées : $C_{PF} = 1,1 \text{ kJ/kg.K}$
- Rendement des échangeurs : 0,99

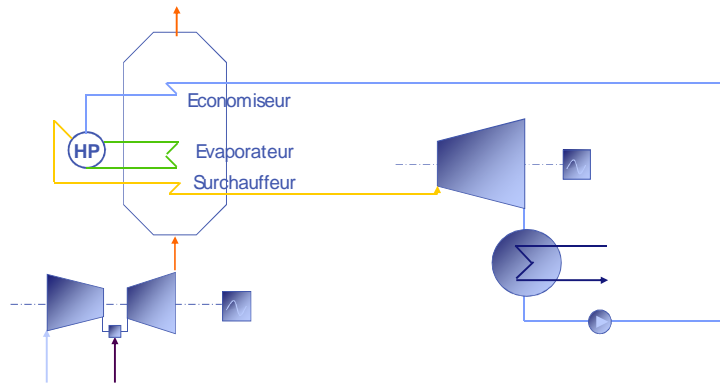


Fig. 1 : Schéma du cycle combiné.

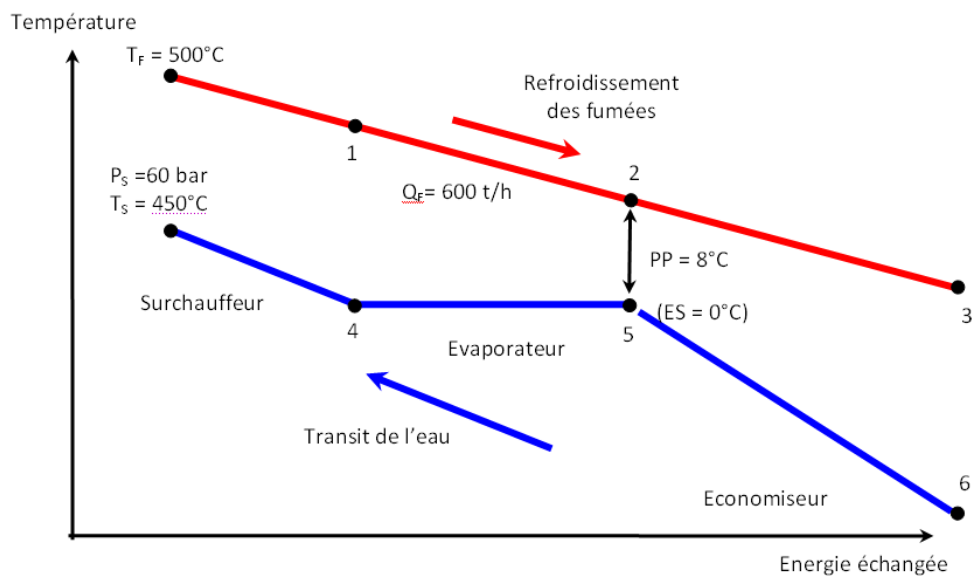


Fig. 2 : Données connues.

- 4.1. La perte de charge dans le surchauffeur étant de 2 bar, quelle est la pression dans le ballon HP ?
- 4.2. Quelle est la température de l'eau à l'entrée du ballon HP ?
- 4.3. Quelle est la quantité de chaleur perdue par les fumées entre leur entrée dans la chaudière et leur sortie de l'évaporateur (point 2 de la Fig. 2) ?
- 4.4. Quel est le débit de vapeur envoyé à la turbine à vapeur ?
- 4.5. Si on considère une perte de charge nulle dans les tuyauteries entre la chaudière et la turbine à vapeur, la vapeur à l'entrée turbine est à 60 bar et 450°C. La pression à l'échappement (ou vide au condenseur) est de 50 mbar. La détente est isentropique (rendement isentropique = 1). A l'aide du diagramme de Mollier, déterminer le titre x en vapeur à l'échappement de la turbine à vapeur.

5. Turboalternateurs (3 points)

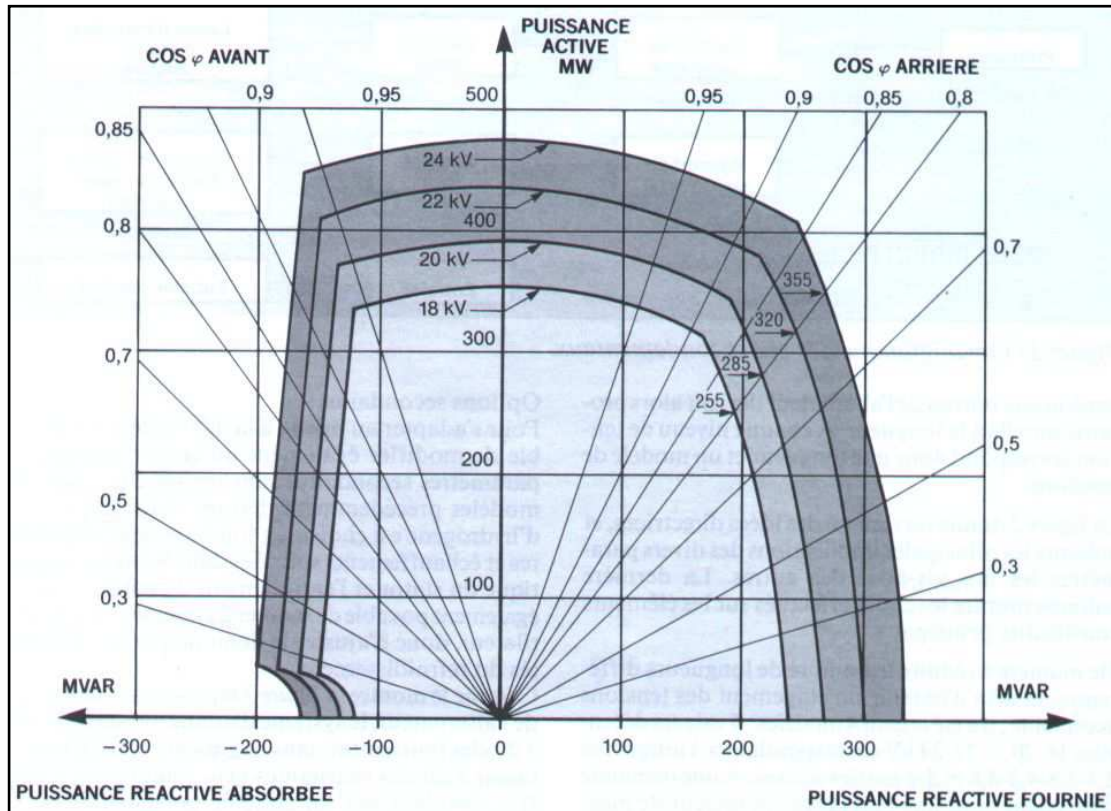


Fig. 3 : Diagramme des puissances actives et réactives d'une ancienne gamme de turboalternateurs Alstom (JM. Guillard, R. Damiron, Revue Alstom N  7 - 1987).

- 5.1. 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 de puissance réactive ? Quelle est l'action qui permet d'augmenter la puissance réactive fournie au réseau ?
- 5.2. La Fig. 3 ci-dessus donne les possibilités de 4 alternateurs semblables dont les circuits magnétiques ont des longueurs différentes, ce qui implique des tensions différentes aux bornes. Un client souhaite pouvoir fournir simultanément à son réseau une puissance active de 400 MW et une puissance réactive de 130 MVAR. Lequel des 4 alternateurs (18, 20, 22 ou 24 kV) faudra-t-il lui proposer ? Quelle sera la puissance active maximale que cet alternateur pourra fournir ?
- 5.3. Quelle sera la puissance réactive maximale que l'alternateur choisi à la question précédente pourra éventuellement absorber tout en fournissant une puissance active de 200 MW ? Quel sera le couple que devra fournir la turbine dans ce cas de fonctionnement ? Informations complémentaires : il s'agit d'un alternateur bipolaire, son rendement est de 98%, la fréquence du réseau électrique est de 50 Hz.

6. Capture du CO₂ (4 points)

1^{ère} partie : Emissions d'une centrale sans capture

Une centrale thermique ultra-supercritique à charbon pulvérisé, conçue pour la capture "oxy-combustion", a les caractéristiques électriques suivantes en mode de fonctionnement "air" sans capture de CO₂ :

- Puissance brute 428 MWe
- Consommation électrique des auxiliaires 44 MWe

Elle consomme 38,3 kg/s de charbon bitumineux avec un PCI de 23,5 MJ/kg et contenant 58,2% de carbone.

Rappel des masses atomiques : H = 1 C = 12 O = 16

6.1. Performances sans capture.

- a. Donner la puissance nette de la centrale.
- b. Déterminer sa consommation thermique, en MWth.
- c. Calculer son rendement thermique net, en %.

6.2. Emissions de CO₂.

- 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. 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.

2^{ème} partie : Centrale avec capture oxy-combustion

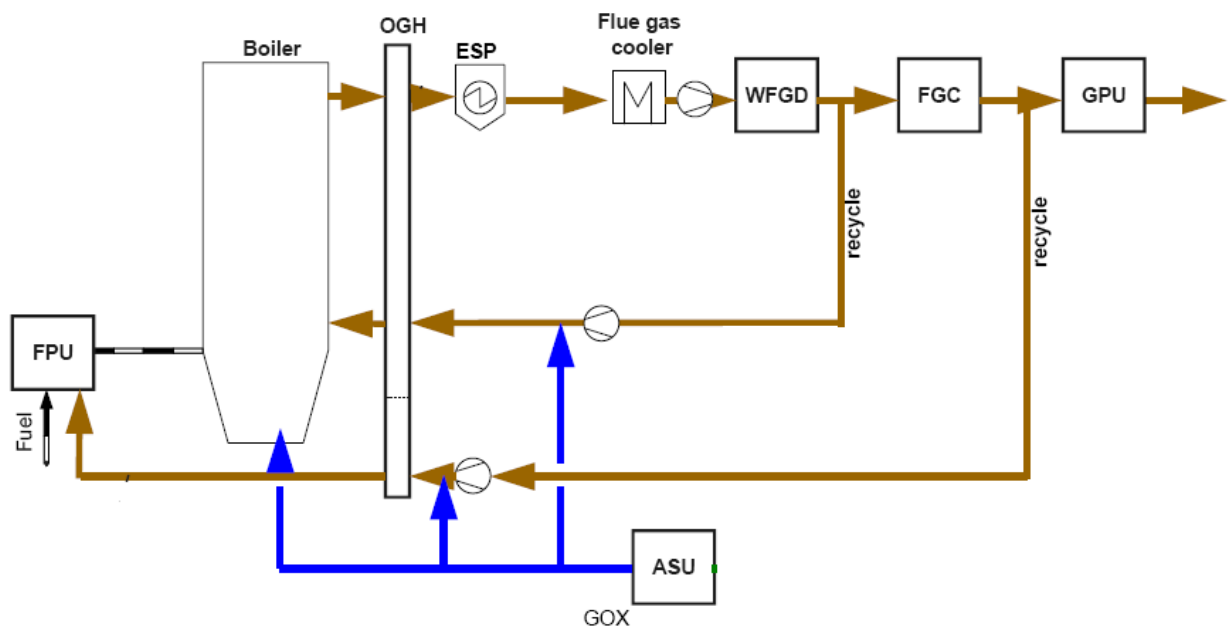


Fig. 4 : Schéma de principe.
(ASU : Air Separation Unit - GPU : Gas Processing Unit)

TE53 – Automne 2012
Sujet de l'Examen FINAL
18/01/2013

La centrale est équipée des systèmes nécessaires au fonctionnement en oxy-combustion avec capture, conçus pour capturer 90% du CO₂ des fumées (Fig. 4).

En mode oxy-combustion, le débit de CO₂ total des fumées sortie chaudière est celui qui a été calculé à la question 6.2.

Ces fumées sont nettoyées de leurs polluants puis asséchées avant envoi dans la GPU pour purification du CO₂ et compression.

La GPU a une consommation électrique spécifique de 130 kWh/t de CO₂ traité.

Pour une bonne combustion en mode oxy, un débit d'O₂ pur de 70,7 kg/s est nécessaire. Cet O₂ est fourni par une ASU dont la consommation électrique est de 200 kWh/t d'O₂ pur produit.

Le refroidissement des compresseurs de l'ASU et de la GPU fournit de la chaleur utilisable dans le cycle eau-vapeur pour réchauffer les condensats et réduire les extractions turbine vapeur basse pression, ce qui permet d'augmenter la puissance brute de l'alternateur de 6 MWe.

6.3. Puissances auxiliaires additionnelles.

- a. Calculer la consommation électrique de l'ASU.
- b. Calculer la consommation électrique de la GPU.

6.4. Performances et émissions de CO₂ avec capture.

- a. Quelle est la nouvelle puissance brute alternateur ?
- b. Calculer la consommation de l'ensemble des auxiliaires de la centrale avec capture.
- c. En déduire la puissance nette avec capture.
- d. Quel est le rendement net avec capture, en %.
- e. Quelles sont les émissions résiduelles de CO₂ à la sortie du système de capture, en kg/MWh ?
- f. Quelle est la pénalité d'énergie de capture, en % ?

Rappel de la définition de la pénalité d'énergie de capture :

$$\frac{\text{Puissance nette sans capture} - \text{Puissance nette avec capture}}{\text{Puissance nette sans capture}}$$

6.5. Emissions évitées et taxe CO₂ économisée.

Pour ces questions, on utilisera les émissions spécifiques des centrales avec et sans capture, et la puissance de la centrale avec capture.

- a. Sur la base d'un fonctionnement à pleine charge durant 7500 h/an, calculer la quantité annuelle d'émissions de CO₂ évitées par la centrale avec capture, en Mt/an.
- b. En déduire les taxes CO₂ évitées annuellement par cette centrale, en M€/an, en considérant une taxe future de 45 €/t à l'horizon 2025.
- c. En supposant un objectif moyen "réaliste" de réduction d'émissions par capture et stockage de CO₂ de 2 Gt/an à l'horizon 2030, combien de centrales de ce type faudrait-il installer pour réaliser cet objectif ?