

**PARTIE MÉCANIQUE, THERMODYNAMIQUE ET CHIMIE (durée conseillée 1 h 15 min)**

**ÉTUDE D'UNE COGÉNÉRATION (6 points)**

**Le sujet comporte 2 parties complètement indépendantes.**  
**La machine à calculer est autorisée.**

Un cogénérateur est un moteur thermique permettant la production simultanée de chaleur (pour le chauffage d'un ensemble de bâtiments) et d'électricité (pour l'éclairage et l'alimentation d'appareils électriques dans cet ensemble de bâtiments ; l'excédent éventuel peut être revendu à EDF).

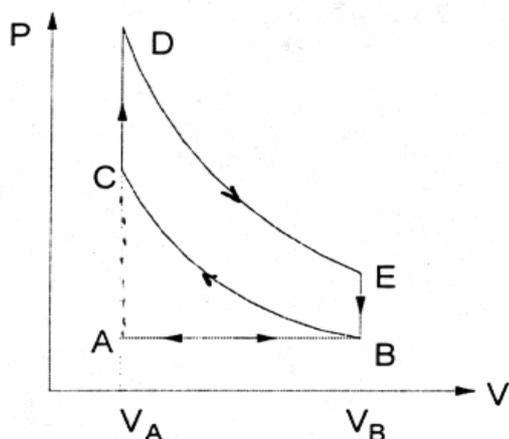
Il est constitué :

- d'un moteur à pistons à allumage commandé alimenté en gaz naturel qui sera considéré comme du méthane (de formule chimique  $\text{CH}_4$ , masse molaire  $M(\text{CH}_4) = 16,0 \text{ g.mol}^{-1}$ ). Ce moteur est couplé à un alternateur pour la fourniture du courant de fréquence 50 Hz ;
- de deux échangeurs thermiques (haute et basse températures) pour récupérer la chaleur dégagée par le moteur et les gaz d'échappement et produire l'eau chaude destinée au chauffage.

**Partie 1 : Etude du moteur thermique**

Le moteur est d'un type analogue à ceux des automobiles à essence.

Il fonctionne suivant le cycle Beau de Rochas qui est schématisé ci-dessous en coordonnées de Clapeyron.



- Admission de A à B du mélange air + gaz naturel
- Compression adiabatique réversible de B à C
- Combustion interne du mélange de C à D
- Détente adiabatique réversible de D à E
- Refroidissement de E à B grâce aux échangeurs
- Echappement de B à A.

Ce cycle correspond à deux tours de l'arbre moteur.

Le moteur est constitué de 16 cylindres représentant une cylindrée totale  $V_B - V_A = 71,0 \text{ L}$ . En régime nominal, la vitesse de rotation de son arbre est de  $1500 \text{ tr.min}^{-1}$ .

Pour simplifier, tous les mélanges gazeux avant et après combustion seront assimilés à un gaz parfait pour lequel le rapport des capacités thermiques massiques à pression et volume constants vaut  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,32$ . La constante des gaz parfaits vaut  $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

**1.1** - Vérifier que la durée d'un cycle est de  $0,080 \text{ s}$ .

**1.2** - Déterminer la masse d'air, assimilé à un gaz parfait de masse molaire  $M = 29,0 \text{ g.mol}^{-1}$ , admise dans les cylindres à chaque cycle. Pour faire ce calcul et uniquement pour cette question, on néglige la masse de gaz naturel introduite.

On donne : la température d'admission  $T_B = 300 \text{ K}$   
la pression d'admission  $P_A = P_B = 2,00 \text{ bar}$ .

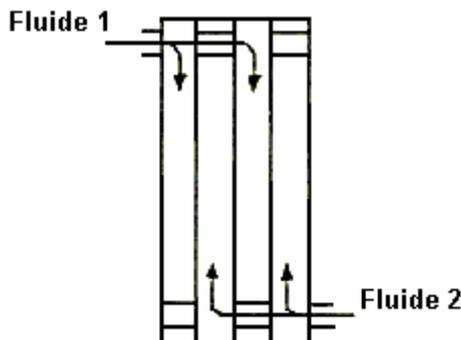
En déduire le débit massique d'air à l'admission.

- 1.3** - Le débit massique de gaz naturel à l'admission est de  $7,80 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  et le débit massique des gaz d'échappement est de  $2,140 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . En effectuant un bilan de masse, retrouver le débit massique d'air à l'admission obtenu en question **1.2**.
- 1.4** - Le rapport de compression volumétrique  $r_{cv} = \frac{V_B}{V_A}$  est égal à 11,7.
- 1.4.1** - Donner la relation (de Laplace) liant la température  $T$  et le volume  $V$  au cours d'une transformation adiabatique réversible.
- 1.4.2** - Calculer la température  $T_C$  du mélange {air + gaz naturel} en fin de compression.
- 1.5** - Calculer les nombres de moles de gaz naturel et d'air admises dans les cylindres à chaque cycle. En déduire le travail  $W_{BC}$  reçu par le mélange (supposé idéal) au cours de la compression pour un cycle. Les soupapes des cylindres maintiennent le système fermé lors de cette compression.
- 1.6** - La combustion du mélange (phase CD) libère une puissance thermique de 3470 kW. Le travail  $W_{DE}$  cédé par les gaz d'échappement au cours de la détente pour un cycle est  $W_{DE} = -155,1 \text{ kJ}$ .
- 1.6.1** - Calculer le rendement thermodynamique du moteur.
- 1.6.2** - Sachant que l'alternateur produit 1200 kW de puissance électrique, calculer le rendement de la conversion énergie chimique de combustion  $\rightarrow$  énergie électrique.

## Partie 2 : Etude des échangeurs thermiques

Dans cette partie, la capacité thermique massique de l'eau sera considérée comme constante et égale à  $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

- 2.1** - L'échangeur haute température refroidit directement le moteur grâce à une circulation d'eau sous pression qui rentre dans le moteur à  $82^\circ\text{C}$  et en sort à  $92^\circ\text{C}$ . On souhaite récupérer une puissance thermique de 656 kW grâce à l'échangeur.
- On donne la masse volumique de l'eau à la température moyenne d'échange  $\rho = 968 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Déterminer le débit volumique de l'eau dans l'échangeur pour obtenir cette puissance.
- 2.2** - L'échangeur basse température est un échangeur à plaques où les gaz d'échappement (fluide 1) et l'eau (fluide 2) circulent à contre - courant (voir schéma ci-dessous). Il permet de récupérer une puissance thermique de 967 kW.



Expliquer qualitativement pourquoi la circulation des fluides à contre-courant augmente l'efficacité de l'échangeur par rapport à une circulation à co-courant. On tracera l'allure des graphes donnant l'évolution de la température le long de l'échangeur pour chaque fluide.

- 2.3** - Calculer le rendement de la conversion énergie chimique de combustion  $\rightarrow$  énergie thermique pour les deux échangeurs. On rappelle que la puissance thermique libérée lors de la combustion est de 3470 kW.