

## Evaluation de fin de semestre de Thermodynamique

16 Juin 2021

Durée : 3h

**La valorisation énergétique des déchets !**

*Toutes les réponses doivent être justifiées, les expressions littérales indiquées et les calculs numériques posés explicitement.*

*L'usage de tout document est interdit. Toutes calculatrices non connectées au réseau autorisées.*

*Chaque partie peut être traitée indépendamment des autres.*

*Toutes les données utiles sont fournies page 5*

Afin de valoriser énergétiquement la part non recyclable des ordures ménagères, celles-ci peuvent être incinérées. Cette méthode a pour avantage de diminuer leur volume et leur masse tout en permettant la production d'énergie. Afin d'augmenter le rendement de production d'énergie, il est avantageux d'utiliser un système de cogénération. Il est possible d'obtenir ainsi de l'énergie de haute qualité (haute température) sous forme de travail, et de l'énergie de plus faible qualité (basse température) permettant de produire de la chaleur.

**Partie I. Etude de la combustion des déchets (~6 points/20)**

Dans cette première partie, nous allons étudier la combustion d'une bouteille de PET opaque, utilisée pour l'emballage du lait. Le PET (PolyEthylene Terephthalate en anglais) n'est pas recyclable et se retrouve donc mélangé aux déchets incinérés dans les usines d'incinération. C'est un matériau plastique (polymère), c'est-à-dire qu'il peut être moulé et façonné pour produire des objets grâce à la succession et à l'enchevêtrement de molécules organiques. Pour simplifier, nous assimilerons la bouteille de PET à  $n$  moles de  $C_{10}H_8O_4$ .

1. Sachant que tous les produits de combustion sont gazeux, écrire la réaction de combustion du PET.
2. Calculer l'enthalpie standard molaire de formation à 298 K du PET solide. A quelle réaction cette enthalpie correspond-elle ?

Lorsqu'une bouteille de PET est admise dans le four d'incinération, sa température augmente rapidement. Le PET subit alors diverses transformations : sous une pression de 1 bar, il fond à 528 K, puis brûle à une température estimée constante de 723 K, température au-dessus de laquelle, le PET a totalement disparu.

3. A partir d'un schéma de transformations à reporter sur votre copie, calculer l'enthalpie standard de combustion du PET à 723 K et montrer que cette valeur diffère de moins de 1 % de la valeur prise à 298 K. Par la suite, on utilisera la valeur standard à 298 K.

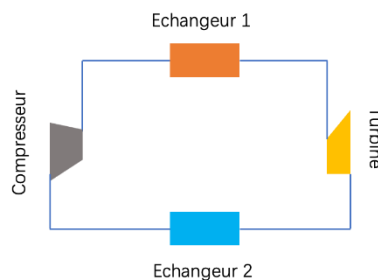
Pour limiter fortement les impacts environnementaux et sanitaires liés à l'incinération des déchets, il est indispensable de maintenir une température minimale dans le four, ce qui conduit à une température de flamme de 1400 °C. Il faut de plus avoir une combustion la plus complète possible, à savoir un ratio oxygène/PET bien plus élevé que le ratio stœchiométrique.

4. Si tous les déchets reçus par l'usine étaient du PET, en considérant qu'ils sont introduits dans le four à 25 °C en présence d'air, et que le processus est adiabatique, quel rapport stœchiométrique (présenté sous la forme  $n_{O_2}/n_{PET}$ ) faudrait-il assurer pour obtenir une température de flamme de 1400 °C dans le four ? Il pourra être utile de réaliser un tableau d'avancement.
5. Le pouvoir calorifique des déchets est en fait de 8 MJ.kg<sup>-1</sup>. L'usine de Gerland (Lyon Sud) a une capacité de 270000 tonnes de déchets par an. Sachant que le rendement d'incinération est estimé à 80 % et que des arrêts techniques de 8 semaines sont réalisés chaque année, quelle est la puissance de cette usine ? On considérera qu'il y a 365 jours par an.

## Partie II. Utilisation de l'énergie produite par l'incinérateur

### A) Production d'électricité en utilisant l'énergie de haute qualité (~6 points/20)

Afin de produire de l'électricité, un alternateur est entraîné par une turbine à gaz (TAG) qui fonctionne suivant le cycle de Brayton. Un cycle de Brayton contient essentiellement quatre transformations considérées comme réversibles, subies par un gaz :



1 -> 2 Compression adiabatique : Le gaz est comprimé de manière adiabatique par un compresseur.

2 -> 3 Transfert de chaleur isobare : Dans cette phase, il y a un transfert de chaleur vers le gaz depuis une source externe (échangeur 1 qui est considéré comme un thermostat). Il s'agit d'un processus à pression constante, car la chambre est ouverte pour l'entrée et la sortie du gaz. La source externe est ici fournie par les gaz à haute température émanant de la combustion des déchets (cf partie I).

3 -> 4 Détente adiabatique : Le gaz comprimé et chauffé se détend de manière adiabatique dans une turbine. Le travail ainsi généré est transmis à un alternateur produisant de l'électricité.

4 -> 1 Transfert de chaleur isobare : Le cycle se termine par un processus à pression constante dans lequel la chaleur est transférée du gaz vers une source externe (échangeur 2 qui est considéré comme un thermostat).

Pour une mole de gaz de travail circulant dans cette TAG, la température minimale est de 290 K à l'état 1 et la température maximale atteint 1200 K à l'état 3. La pression minimale est de 95 kPa et la pression maximale est de 380 kPa. Dans tout l'exercice, le gaz subissant les différentes transformations sera assimilé à un gaz parfait diatomique, de coefficient adiabatique  $\gamma = 1,4$ .

On donne de plus pour ce gaz :  $\bar{C}_p = 29,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $\bar{C}_v = 20,8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Cette TAG fournit 20000 kW d'énergie à l'alternateur.

1. A partir de la description du fonctionnement de la TAG, identifier les états 1, 2, 3 et 4 sur la figure 1 en annexe.
2. Déterminer les températures à la sortie du compresseur et à la sortie de la turbine. Remplir le tableau 1 en annexe.
3. Déterminer en les justifiant les expressions du travail  $W_i$ , de la chaleur  $Q_i$  et la variation d'entropie  $\Delta S_i$  pour toutes les transformations du gaz de travail dans cette TAG. Remplir ensuite le tableau 2 récapitulatif en annexe.
4. Représenter schématiquement les quatre transformations 1 -> 2, 2 -> 3, 3 -> 4 et 4 -> 1 dans un diagramme de Clapeyron ( $P - V$ ) et entropique ( $T - S$ ). Justifier que ce cycle est moteur.
5. Démontrer que le coefficient de performance ( $CoP$ ) de cette TAG peut être exprimé selon :

$$CoP = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

**B) Chauffage urbain : évaporateur (utilisation de l'énergie de basse qualité)** (~2 points/20)

Afin d'augmenter le taux d'utilisation de l'énergie produite sous forme de chaleur, l'échangeur 2 peut être mis en contact avec un tuyau secondaire d'eau pour créer de la vapeur. Cette vapeur sera utilisée à des fins de chauffage urbain. L'eau entrant dans ce tuyau secondaire à 12 °C est à une pression constante de 2 atm. On supposera que tout l'air contenu initialement dans le tuyau est éliminé avant cette première étape, et que seule l'eau liquide est présente.

1. Dans la gamme de température étudiée, nous considérerons que l'enthalpie standard de vaporisation de l'eau (ou chaleur latente) est une constante. Déterminer la température de vaporisation de l'eau dans le tuyau ( $T_{éb\ tuyau}$ ), sachant que, dans ces conditions, pour tout corps pur :

$$\ln(P_{vs}) = -\frac{\Delta_{vap}\overline{H}}{R} \cdot \frac{1}{T} + \text{constante}$$

2. A la sortie du tuyau, de la vapeur d'eau sèche (sans phase liquide) est obtenue à une température  $T_{vap} = 150\text{ °C}$ . Quelle quantité de chaleur est reçue par une mole d'eau dans le tuyau ?
3. Dans l'échangeur 2, la chaleur est transférée à l'eau avec un rendement de 85 %. Quel est le débit de gaz (en mol/s) nécessaire pour amener 100 litres d'eau du tuyau à 150 °C en une minute ?

**C) Chauffage urbain : moteur à combustion externe et pompe à chaleur (utilisation de l'énergie de haute qualité) (~6 points/20)**

Une alternative à l'utilisation de l'évaporateur de la partie B) pour le chauffage est d'utiliser une partie ( $\dot{Q}_{comb}$ ) de la puissance thermique fournie par la combustion des déchets pour maintenir la température des locaux de l'usine à la température  $T_{locaux} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ce qui représente un besoin énergétique  $\dot{Q}_{besoin}$  égal à 100 kW.

Pour cela, les gaz de combustion, après des pertes thermiques dans la tuyauterie, arrivent à la température de  $T_{fumée} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans l'installation et sont utilisés comme source chaude pour alimenter un moteur à combustion externe. Le rendement thermodynamique  $\eta_{th\ mot}$  de ce moteur est égal à 35 % et sa puissance mécanique  $\dot{W}_M$  permet de faire fonctionner une pompe à chaleur. La température moyenne de l'air extérieur ( $T_{ext}$ ) qui sert de source froide pour le moteur et pour la pompe à chaleur, est égale à  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en hiver.

L'architecture du système, ainsi que les paramètres principaux de fonctionnement, sont représentés sur la figure 2 en annexe.

1. Complétez la figure 2 en y faisant apparaître les températures et tous les échanges énergétiques affectés de leur signe.

On souhaite vérifier si une telle architecture peut être rentable par rapport à la simple utilisation directe d'une chaudière à gaz.

2. Quelle aurait été la puissance thermique de combustion requise ( $\dot{Q}_{comb1}$ ) si on utilisait directement une chaudière pour chauffer l'eau, en supposant son rendement égal à 100 % ?
3. Etablir, en justifiant toutes les étapes du raisonnement, l'expression du coefficient de performance idéal ( $CoP_{idéal}$ ) du moteur en fonction de  $T_{ext}$  et  $T_{fumée}$ . En déduire la valeur du coefficient de performance réel ( $CoP_{réel}$ ) et expliquer l'origine des différences.
4. Déterminer également le  $CoP$  idéal de la pompe à chaleur ( $CoP_{PAC\ idéal}$ ) en fonction de  $T_{locaux}$  et  $T_{ext}$ .
5. En supposant toujours le fonctionnement de la pompe à chaleur idéal, déterminer finalement le  $CoP$  global de l'installation ( $CoP_{global}$ ). En déduire la valeur  $\dot{Q}_{comb2}$  nécessaire pour satisfaire au besoin de chauffage des locaux et conclure.
6. L'été, cette pompe à chaleur peut être inversée pour refroidir les locaux avec les conditions suivantes :  $T_{ext} = 35^{\circ}\text{C}$  et  $T_{locaux} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Après avoir proposé un schéma de fonctionnement, calculer le  $CoP$  global de cette installation (en fonctionnement totalement réversible).

NOM : ..... Prénom : .....Groupe : .....

## ANNEXE – A RENDRE AVEC LA COPIE

### Données :

Les capacités calorifiques sont indépendantes de la température.

Masse molaire : H = 1 g.mol<sup>-1</sup> ; C = 12 g.mol<sup>-1</sup> ; N = 14 g.mol<sup>-1</sup> ; O = 16 g.mol<sup>-1</sup>

Constante des gaz parfaits : R = 8,31 J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>

Composition de l'air : 20 % O<sub>2</sub>, 80 % N<sub>2</sub>.

Enthalpie standard de fusion du PET :  $\Delta_{fus}H_{528}^0(PET) = 117,6 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$

Température de fusion du PET sous une pression de 1 bar :  $T_{fus}(PET) = 528 \text{ K}$

Enthalpie standard de combustion du PET (avec formation d'eau vapeur) :  $\Delta_{comb}H_{298}^0(PET) = -5,58 \text{ MJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

Corps purs	Etat physique	Formule	$\Delta_f H_{298}^0$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$\bar{C}$ pour sol. ou liq. $\bar{C}_p$ pour gaz (J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )
PET	Solide	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>		211,2
PET	Liquide	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>		259,2
Oxygène	Gaz	O <sub>2</sub>	0	29,1
Azote	Gaz	N <sub>2</sub>	0	29,1
Eau	Gaz	H <sub>2</sub> O	-241,8	33,6
Eau	Liquide	H <sub>2</sub> O	-285,8	75,3
Dioxyde de carbone	Gaz	CO <sub>2</sub>	-393,5	37,1

Température de vaporisation de l'eau sous une pression de 1 atm :  $T_{éb} = 100 \text{ °C}$

Enthalpie standard de vaporisation de l'eau :  $\Delta_{vap}H_{298}^0(H_2O) = 44,0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  (supposée constante)

Pour un gaz parfait diatomique :  $\gamma = 1,4$  ;  $\bar{C}_p = 29,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $\bar{C}_v = 20,8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### A compléter : partie II-A

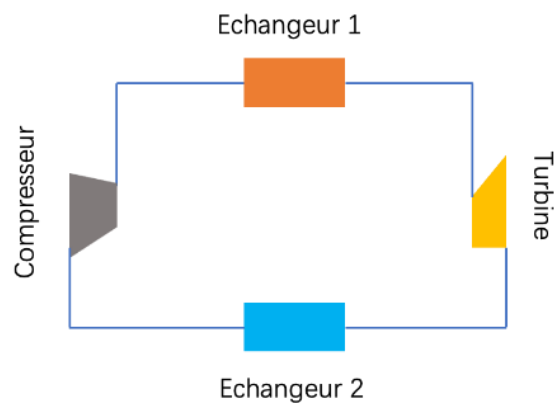


Figure 1 : Schéma de la TAG

Tableau 1 :

	1	2	3	4
P (kPa)				
T (K)	290		1200	

Tableau 2 :

1->2		2->3		3->4		4->1	
Expression littérale	A.N.	Expression littérale	A.N.	Expression littérale	A.N.	Expression littérale	A.N.

**A compléter : partie II-C**

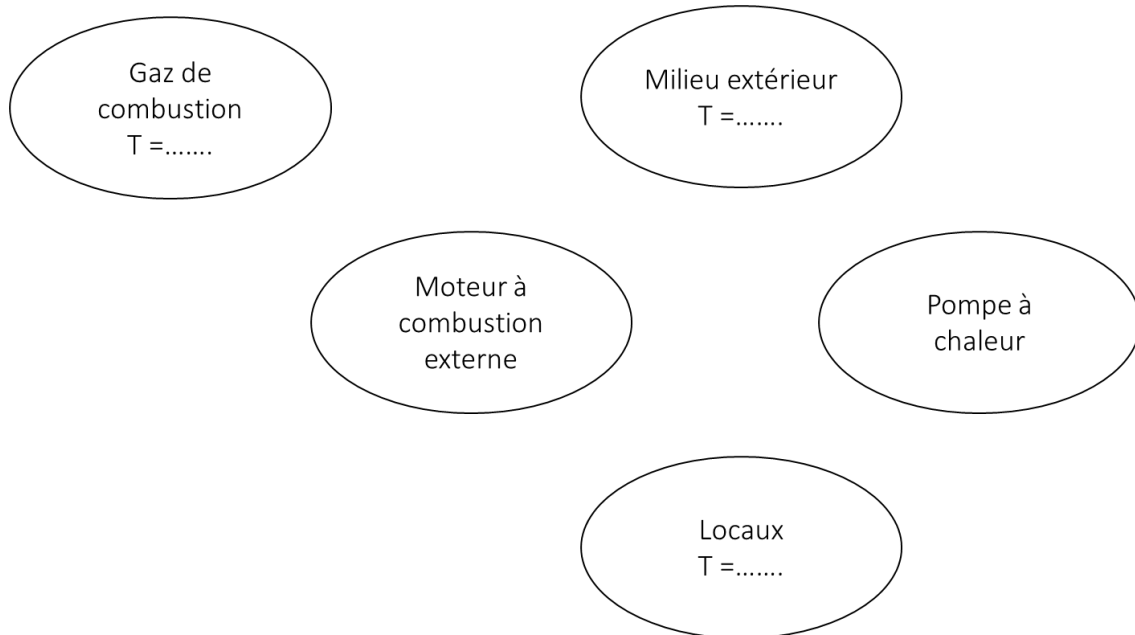


Figure 2 : Architecture du système de chauffage envisagé