

# Thermodynamique appliquée

## Séance d'exercices 7 - Combustion

### A. A. 2011-2012

1. (Meca357\_co30) (Examen) On considère une chambre de combustion isolée thermiquement dans laquelle on brûle un débit de 0,3 kg/s de méthane avec un coefficient d'air théorique de 2,5 à une pression de 1 000 kPa. L'air est considéré comme un mélange d'oxygène et d'azote avec 3,76 moles d'azote pour une mole d'oxygène. Les réactifs entrent dans la chambre de combustion à la température standard (25° C). Calculer :
- (a) la composition des produits en titres molaires en écrivant l'équation de combustion. En déduire la chaleur molaire du mélange des produits (en kJ/kmole K) [ $y_{CH_4}=0,040$ ,  $y_{H_2O}=0,081$ ,  $y_{O_2}=0,121$ ,  $y_{N_2}=0,758$ ;  $\bar{c}_{p\text{produits}} = 29,60$  kJ/kmol/K] ;
  - (b) la température des produits de combustion (en K) [ $T_2=1\ 391,3$  K] ;

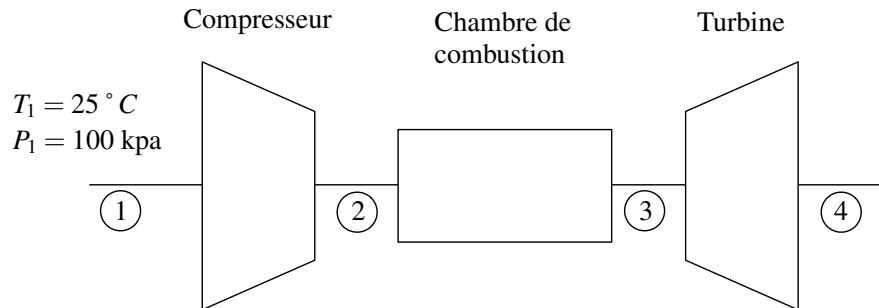
en considérant toutes les espèces présentes dans les réactifs et les produits comme des gaz (caloriquement et thermiquement) parfaits avec les propriétés suivantes.

	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\bar{h}_f^0$ (kJ/kmole)	-74 873	0	0	-393 522	-241 826
$\bar{s}_f^0$ (kJ/kmole K)	186,251	205,148	191,609	213,794	188,835
$\bar{c}_p$ (kJ/kmole K)	35,648	28,915	28,871	37,13	33,656
$M$ (kg/kmole)	16,04	32	28	44,01	18,02

2. Suite de l'exercice précédent.

- (a) Calculer le pouvoir calorifique isobare inférieur du méthane (kJ/kg) [ $\bar{P}\bar{C}I_{\text{méthane}} = 802\ 301$  kJ/kmol CH<sub>4</sub>].
- (b) Vérifier ensuite les résultats obtenus avec TESTCENTER.
- (c) Refaire l'exercice avec TESTCENTER mais en utilisant cette fois le module de calcul des gaz idéaux à la place du module de calcul des gaz parfaits. Commenter.
- (d) Calculer la production d'entropie ainsi que l'irréversibilité dans la chambre de combustion décrite précédemment [ $\bar{\sigma} = 1\ 153,5$  kJ/kmol CH<sub>4</sub>/K,  $\bar{i} = 343\ 905,8$  kJ/kmol CH<sub>4</sub>].

3. On considère un cycle moteur dans lequel est aspiré un mélange d'air et d'hydrogène ( $H_2$ ) aux conditions standards ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100\text{ kPa}$ ). Le cycle est représenté à la figure suivante. Le compresseur, supposé adiabatique, comprime les réactifs avec un rendement isentropique de  $0,9$  et un taux de compression de  $8$ . La combustion est complète et le mélange des réactifs possède un coefficient d'air théorique de  $1,25$ . La turbine, supposée adiabatique, détend les réactifs de manière réversible jusqu'à une pression de  $100\text{ kPa}$ .



On considère les réactifs et les produits comme étant des gaz thermiquement et caloriquement parfaits.

Calculer :

- les fractions molaires des réactifs et des produits. (Réactifs :  $y_{H_2} = 0.2515$ ,  $y_{O_2} = 0.1572$ ,  $y_{N_2} = 0.5913$ . Produits :  $y_{H_2O} = 0.2877$ ,  $y_{N_2} = 0.6764$ ,  $y_{O_2} = 0.036$ .)
- $\bar{C}_p$  en  $\text{kJ/kmol K}$  et le rapport des chaleurs massiques  $k$  du mélange des réactifs et des produits. (Réactifs :  $\bar{C}_p = 36\text{ kJ/kmolK}$ ,  $k = 1.3$ . Produits :  $\bar{C}_p = 37.726\text{ kJ/kmolK}$ ,  $k = 1.283$ .)
- pression et température après compression ainsi que le travail par unité de masse de combustible requis. ( $P_2 = 8\text{ bar}$ ,  $T_2 = 502.4\text{ K}$ ,  $w_{12} = 14.617\text{ MJ/kgH}_2$ .)
- pression et température après combustion en supposant la combustion adiabatique et isobare. ( $P_3 = P_2$ ,  $T_3 = 2365\text{ K}$ .)
- pression et température après la détente ainsi que le travail par unité de masse de combustible fourni. ( $P_4 = 1\text{ bar}$ ,  $T_4 = 1495.6\text{ K}$ ,  $w_{34} = -57\text{ MJ/kgH}_2$ .)
- le rendement thermique du moteur avec comme référence le PCI. ( $\eta_{th} = 0.35$ )
- le rendement exergetique du moteur en considérant la source gratuite comme étant l'ambiance et que l'exergie des gaz d'échappement est perdue (ils sont ramenés à la température ambiante de manière irréversible). ( $\eta_{ex} = 0.38$ ).
- l'efficacité et le rendement exergetique du cycle idéal ayant les mêmes températures maximum et minimum en considérant un gaz actif de rapport de chaleurs massiques  $k = 1,4$ . Comparer avec le résultat du point précédent. ( $\eta_{Joule} = 0.45$ ,  $\eta_{ex,Joule} = 0.51$ )
- le débit massique d'hydrogène nécessaire pour obtenir une puissance de  $60\text{ kW}$ . ( $\dot{m}_{H_2} = 1.415\text{ g/s}$ ).

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\bar{h}_f^0$ (kJ/kmole)	0	0	0	-241 826
$\bar{s}_f^0$ (kJ/kmole K)	205,148	191,609	129,48	188,835
$\bar{C}_p$ (kJ/kmole K)	36	36	36	42
$M$ (kg/kmole)	16	28	2	18

4. (Meca357\_co40) Etude d'un moteur volumétrique à combustion interne à allumage commandé. On considère un moteur volumétrique à combustion interne à allumage commandé dans lequel on aspire un mélange d'air et de méthane aux conditions standard (25 °C, 100 kPa). Le rapport volumétrique de compression est égal à 9, et l'on suppose que la combustion (complète) a lieu (à volume constant) lorsque le piston est au point mort haut. En supposant un coefficient d'air théorique de 1,1, calculer :
- pression et température après compression en supposant la compression adiabatique et réversible, ainsi que le travail par unité de masse requis [ $p_2=2\ 006,5$  kPa,  $T_2=664,7$  K,  $w_{12}=302,8$  kJ/kg mélange] ;
  - pression et température après combustion, en supposant la combustion adiabatique [ $p_3=8\ 818,6$  kPa,  $T_3=2\ 909,0$  K] ;
  - l'irréversibilité lors de la combustion (en supposant la source gratuite à la température standard) [ $i=483,0$  kJ/kg mélange] ;
  - pression et température après l'expansion supposée adiabatique et réversible, ainsi que le travail par unité de masse du mélange fourni [ $p_4=562,7$  kPa,  $T_4=1\ 670,5$  K,  $w_{34}^*=1\ 477,8$  kJ/kg mélange] ;
  - le rendement thermique du moteur avec comme référence le PCI [ $\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{mel} \cdot (w_{34}^* - w_{12})}{\dot{m}_{carb} \cdot PCI} = 46,57\%$ ] ;
  - le rendement exergetique du moteur en supposant que l'exergie des gaz d'échappement est perdue (c.-à-d. qu'ils sont ramenés à l'équilibre de pression et de température avec l'ambiance de manière irréversible) [ $\eta_{ex} = 46,52\%$ ] ;
  - l'efficacité thermique et le rendement exergetique du cycle idéal (Otto) ayant les mêmes températures maximum et minimum, en supposant un gaz actif de rapport de chaleurs massiques  $k = 1,3$ . Comparer avec le résultat du point précédent et commenter [ $\epsilon_{Otto} = 48,27\%$ ,  $\eta_{exOtto} = 53,78\%$ ].

Remarques :

- On demande de tenir compte des variations des chaleurs massiques des constituants du mélange avec la température, de sorte que la détermination des états après compression, après combustion et après détente nécessite la résolution d'une équation algébrique non-linéaire pour la température. Cette équation pourra être résolue soit numériquement par approximations successives en utilisant les tables informatisées de TESTCENTER, soit en utilisant le solveur d'équations algébriques de MATLAB et les expressions analytiques des propriétés thermodynamiques des constituants déterminées à partir des expressions des chaleurs molaires ci-dessous.
- Données thermodynamiques

	$M$	$(\bar{h}_f^0)$	$\bar{c}_p$
	kg/kmole	(kJ/kmole)	(kJ/kmole K, $\theta = T/100$ )
CH <sub>4</sub>	16,043	-74 873	$-672,87 + 439,74\theta^{1/4} - 24,875\theta^{3/4} + 323,88\theta^{-1/2}$
CO <sub>2</sub>	44,01	-393 522	$-3,7357 + 30,529\theta^{1/2} - 4,1034\theta + 0,024 198\theta^2$
H <sub>2</sub> O	18,015	-241 826	$143,05 - 183,54\theta^{1/4} + 82,751\theta^{1/2} - 3,6989\theta$
O <sub>2</sub>	31,999	0	$37,432 + 0,020 102\theta^{3/2} - 178,57\theta^{-3/2} + 236,88\theta^{-2}$
N <sub>2</sub>	28,013	0	$39,060 - 512,79\theta^{-3/2} + 1072,7\theta^{-2} - 820,4\theta^{-3}$