

Contrôle noté sur 24 points : ne cherchez pas à tout faire. Parties indépendantes : choisissez celles qui vous conviennet. Lire les énoncés en entier avant de commencer.

1. QUESTION DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUEL CARBURANT ? 6 pts

La question est de savoir quel carburant est le plus efficace en terme de production d'énergie par rapport à la production de CO₂. En d'autres termes, quel carburant mettre dans une voiture par exemple pour minimiser notre production de CO₂. On définit un index

$$I = \text{Energie dégagée (en J)} / \text{kg de CO}_2 \text{ créé.}$$

On considère d'abord deux carburants de type hydrocarbures: CH₄ (méthane) et C₈H₁₈ (essence). L'oxydant est de l'air (O₂+3.76 N₂ en moles).

1. Equilibrez les réactions de combustion de chacun de ces carburants.
2. Calculez la chaleur de réaction par mole de carburant puis le dégagement d'énergie par kg de carburant consommé. Calculez I pour chaque carburant. Conclusion: pour générer le moins possible de CO₂, classer les carburants du plus au moins écologiquement correct (le plus correct étant celui produisant le moins de CO₂ possible à puissance dégagée égale ?).
3. En France, une voiture est dite non polluante quand elle produit moins de 120 g de CO₂ par km. Pour une voiture fonctionnant à l'essence C₈H₁₈, à combien de grammes de C₈H₁₈ consommés par km correspond cette limite ? Quelle énergie est donc dégagée par le moteur pour faire avancer la voiture d'un km ? Quelle est la consommation du moteur à ce régime en litres par 100 km ?
4. Que dire du cas de H₂ ? H₂O est il un gaz à effet de serre (question hors barème...) ?
5. En termes de poids maintenant, calculer la masse de chacun de ces carburants pour dégager 100 MJ. Pour remplacer 100 kg d'essence dans une voiture par du méthane (CH₄), combien de CH₄ faudra t il emmener pour obtenir la même énergie totale dégagée ? Même question avec l'hydrogène. En supposant que le CH₄ et l'H₂ puissent être stockés sous forme gazeuse à 100 bar et 300 K, et que le C₈H₁₈ sera stocké sous forme liquide, quels volumes de carburant sont nécessaires pour fournir ces 100 MJ ? Conclusion: que recommanderiez vous pour les moteurs de voiture du futur ? et pour un avion ?

Données : ΔHf0(H₂O)= - 240 kJ/mole ΔHf0(CH₄)= -75 kJ/mole ΔHf0(CO₂)= - 395 kJ/mole
 ΔHf0(C₃H₈)= - 104 kJ/mole ΔHf0(C₈H₁₈)= - 208 kJ/mole. Densité de l'essence liquide= 0.8 kg/l.

2. QUESTION D'EQUATIONS...ET DE COURS 4 pts

QUESTION		OUI	NON
1	Le taux de dégagement de chaleur d'une flamme de diffusion laminaire augmente quand cette flamme est étirée tant que l'étirement est modéré		
2	La température maximum atteinte dans une chambre non prémélangée pauvre est plus grande que si on avait prémélangé les gaz auparavant		
3	La vitesse de flamme laminaire des flammes prémélangées hydrocarbure / air à 300 K et 1 bar varie de 5 à 10 m/s		
4	Dans un milieu réactif, la température est un scalaire passif		

3. QUESTION DE COURS 5pts

Donner les équations et construire les droites correspondant à la structure de flamme de diffusion allumée dans le diagramme en z pour une flamme utilisant un écoulement de C₃H₈ dilué avec de l'azote d'un côté (en proportion molaire égale : une mole de C₃H₈ pour une mole de N₂, température 300 K) et un écoulement d'air chauffé à 600 K de l'autre (une mole d'oxygène pour 3,76 moles de N₂). On travaillera en massique et on supposera un Cp massique constant et égal à 1300 J/Kkg. Il faudra calculer la chaleur de réaction Q (massique) pour construire ces courbes. On donnera en particulier la température maximum atteinte et la valeur de z au stoechiométrique.

Données : ΔHf0(C₃H₈)= -104 kJ/mole, ΔHf0(H₂O)= - 240 kJ/mole ΔHf0(CO₂)= - 395 kJ/mole

4. SECURITE ELECTRIQUE (ET UN PEU DE THERMODYNAMIQUE) 9 pts

On considère un hangar dans lequel un employé maladroit aidé d'un bulldozer a fait un trou dans une conduite de gaz contenant du CH₄. La température dans le local T₁ est 25 degrés. A cette température, les limites de flammabilité du méthane dans l'air sont (en richesse) 0.55 et 2.6. Il faut éviter qu'en cas d'étincelle dans le hangar, celui ci n'explose. Les seules informations dont vous disposez sont le diamètre du trou fait dans la conduite de gaz (D= 2 cm), la pression et la température d'arrêt dans la conduite de gaz (P_i=6 bars et T_i=300K, supposées constantes) et les dimensions du hangar (10m par 50 m par 5 m).

- 1/ Equilibrer la réaction chimique CH₄/air et calculer le rapport stoichiométrique s.
- 2/ Calculer le débit de méthane injecté dans le hangar. Pour cela on considérera le trou comme une tuyère et on appliquera les formules d'écoulement compressible amorcé dans cette tuyère dont la section au col A* est celle du trou (voir annexe 1). On considère que le γ du méthane vaut 1.31. Au passage, rappelez pourquoi cet écoulement serait sonique au col ...
- 3/ Si on suppose que le méthane injecté et l'air sont parfaitement prémélangés, calculez la richesse moyenne du mélange CH₄/air dans le hangar et indiquez les périodes pendant lesquelles aucune combustion ne pourra se produire dans le hangar. L'instant initial t=0 correspond au début de la fuite.
- 4/ On n'a pas de chance et un pompier fumeur invétéré entre et allume une cigarette alors que la richesse moyenne vaut 1 dans le hangar. A quel instant cela se produit il ? Après combustion, calculer la température finale T₂. On rappelle que dans le cas de la combustion à volume constant, c'est l'énergie totale (et pas l'enthalpie totale) qui est conservée. Cette énergie s'écrit ici (en molaire) Ek=Cvk (T-To) + Δhf_{o,k} où on a supposé que les chaleurs massiques à volume constant de chaque espèce (les Cvk) sont indépendants de la température et donnés ci-dessous. La température de référence est To=298.15 K. La pression initiale de 1 bar. On suppose que le hangar n'a pas le temps de fuir pendant la combustion : la masse y est constante. Son volume aussi reste constant.
- 5/ En déduire la pression maximum atteinte après combustion (on supposera les gaz parfaits et on négligera les variations de la constante r des gaz parfaits dans p=rho r T).
- 6/ Calculer les fractions massiques des constituants dans les gaz avant et après combustion puis calculer la masse atomique moyenne dans les gaz frais W1 et dans les gaz brûlés W2: vérifier alors que la constante r supposée constante au 4 est en effet quasiment constante en calculant sa valeur dans les gaz frais (r1) puis brûlés (r2).
- 7/ Une hypothèse importante dans les réponses ci dessus est que le mélange entre le jet de méthane et l'air ambiant est immédiat et parfait. Comment pourrait on vérifier cette hypothèse (pensez à comparer des temps caractéristiques de trajet dans le hangar) ? Que se passerait il si ce mélange n'est pas parfait ?

Données :

Chaleurs molaires : Cv(H₂O)= 30 usi Cv(CO₂)=35 usi Cv(N₂)= 29 usi. Cv(CH₄)=30 usi Cv(O₂)=27 usi
 Chaleurs de formation : Δhf₀(H₂O)= - 240 kJ /mole Δhf₀(CH₄)= -75 kJ/mole Δhf₀(CO₂)= - 395 kJ/mole

Annexe1 :

FORMULE POUR CALCULER LE DEBIT D'UN COL SONIQUE (extrait de S. Candel 'Cours de mécanique des fluides' Ecole Centrale de Paris):

Si l'écoulement passe par les conditions soniques, il s'agit obligatoirement d'un col, et la section critique s'identifie alors à la section du col : A* = A_c. Le débit correspondant à la section critique a pour expression :

$$\dot{m}_* = \frac{p_i A_*}{(\gamma r T_i)^{1/2}} \psi_* \quad \text{avec } r \approx \frac{R}{W} \rightarrow \begin{matrix} 8.32 \\ \text{Masse atomique} \\ \text{en kg} \end{matrix}$$

où :

$$\psi_* = \gamma \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{-(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)}$$

CORRIGE CONTROLE



et 2/

$$Q^m = \Delta H_f(CO_2) + 2 \Delta H_f(H_2O) - \Delta H_f(CH_4) = -395 - 2(240) + 75 = -800 \text{ kJ/mole}$$

$$Q = \frac{1Q^m}{0.016} = 50 \text{ MJ/kg de } CH_4 \quad I = \frac{1Q^m}{0.044} = 18.2 \text{ MJ/kg de } CO_2 \text{ crée}$$

2



$$Q^m = 8 \Delta H_f(CO_2) + 9 \Delta H_f(H_2O) - \Delta H_f(C_8H_{18}) = -5110 \text{ kJ/mole}$$

$$Q = \frac{1Q^m}{0.114} = 44.8 \text{ MJ/kg de } C_8H_{18} \quad I = \frac{1Q^m}{8.0044} = 14.5 \text{ MJ/kg de } CO_2 \text{ crée}$$

→ le CH_4 est meilleur en terme de CO_2 .

3/ Règle de 3 : une mole de C_8H_{18} (114g) génère $8 \times 0.044 = 352$ g de CO_2

1

Donc 120 g de CO_2 correspondent à $\frac{114}{352} \cdot 120 = 39$ g de C_8H_{18}

L'énergie dégagée est $0.039 \times Q = 0.039 \times 44.8 \cdot 10^6 = 1.75$ MJ par litre

La consommation aux moteurs est $39 \text{ g} \times 100 = 3.9 \text{ kg/100}$

ou encore $\frac{3.9}{0.8} = 4.8 \text{ l/100}$

1

4/ L'hydrogène dégage de l'eau mais pas de CO_2 . Cependant H_2O est aussi un gaz à effet de serre. De plus, pour produire du H_2 à partir d'hydrocarbures, on dégage aussi du CO_2 .

5/ Pour le CH_4 , $Q = 50 \text{ MJ/kg}$ → Pour 100 MJ il faut emmener 2 kg de CH_4

" C_8H_{18} , $Q = 44.8 \text{ MJ/kg}$ → " " " 2.3 kg de C_8H_{18}

1

" H_2 , $Q = 120 \text{ MJ/kg}$ → " " " 0.8 kg de H_2

car $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O \rightarrow Q^m = -\Delta H_f(H_2O) = 240 \text{ kJ/mole} \Rightarrow Q = 120 \text{ MJ/kg}$

Il faut beaucoup moins d'hydrogène ! en masse.

En volume, le réservoir devra contenir :

- Pour CH_4 (gaz), $\rho = \frac{P}{RT} W = \frac{100 \cdot 10^5 \cdot 0.016}{8.32 \cdot 300} = 64 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow V = \frac{2}{64} = 3.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 = 3.1 \text{ litres}$

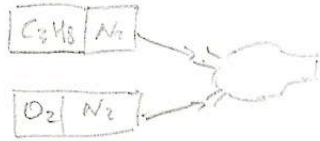
- Pour C_8H_{18} (liquide), $\rho = 800 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow V = \frac{2.3}{800} = 2.87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2.87 \text{ litres}$

- Pour H_2 (gaz) $\rho = \frac{100 \cdot 10^5 \cdot 0.002}{8.32 \cdot 300} = 8 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow V = \frac{0.8}{8} = 0.1 \text{ m}^3 = 100 \text{ litres}$

L  , c'est l'énergie la meilleure. L' H_2 nécessite des très gros réservoirs.

2. 1 → OVI - 2 → OVI - 3 → NON - 4 → NON

3.

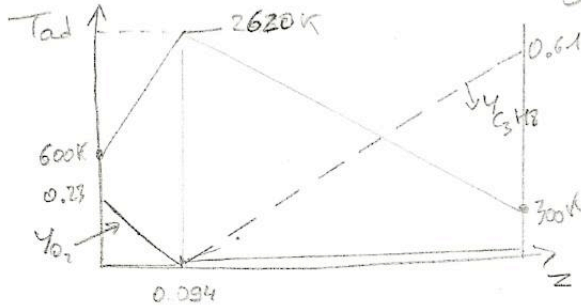


On calcule d'abord la composition des 2 cotes:

Fuel: $C_3H_8 + N_2$ en proportion molaire égale

$$\Rightarrow Y_{C_3H_8} = \frac{44}{44+28} = 0.61 \quad Y_{N_2} = 0.39$$

Oxydant: $O_2 + N_2$ $Y_{O_2} = 0.23 \quad Y_{N_2} = 0.77$



$$z = \frac{s Y_F - Y_0 + Y_0^0}{s Y_F^0 + Y_0^0} \quad z_{st} = \frac{Y_0^0}{s Y_F^0 + Y_0^0} = \frac{0.23}{3.64 \cdot 0.61 + 0.23} = 0.094$$

car $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$

$$\Rightarrow s = 5.32/44 = 3.64$$

$$T_{ad} = z_{st} T_F + (1-z_{st}) T_0 + \frac{Q^* Y_F z_{st}}{C_p} = 0.094 \cdot 300 + 0.906 \cdot 600 + \frac{46.4 \cdot 10^3 \cdot 0.094 \cdot 0.61}{1300} = 2618K$$

car $Q^* = \frac{3 \Delta H_c(CO_2) + 4 \Delta H_c(H_2O) - \Delta H_c(C_3H_8)}{0.044} = 46.4 \text{ MJ/kg}$

1

4. 1. $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ et $s = 4$

2

2. $\dot{m} = \frac{p_i A \sqrt{\gamma}}{\sqrt{\pi R T_i}} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 0.002^2 \cdot 0.766}{\sqrt{1.321 \cdot \frac{8.314 \cdot 300}{0.016}}} \text{ car } \psi^* = 0.766 \text{ et } \delta = 1.31$

$\dot{m} = 0.31 \text{ kg/s}$

L'écoulement est sonique car le rapport de pression est $6 >$ rapport critique (≈ 2).

1

3. La richesse moyenne est $\phi = s \frac{m_F}{m_{O_2}} = s \cdot \frac{\dot{m}_F \cdot t}{m_{O_2}}$

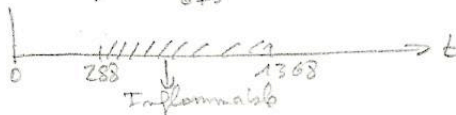
car $m_{O_2} = p_{O_2} V = Y_{O_2} p_{air} V = 0.23 \cdot 1.47 \cdot 2500 = 673 \text{ kg}$

$p_{air} = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{10^5}{\frac{\pi \cdot 0.029^2}{4}} = 1.17 \text{ kg/m}^3$

1

$\phi = 4 \cdot \frac{0.31}{673} \cdot t = 1.9 \cdot 10^{-3} t$

ϕ atteint 0.55 à $t = 288 \text{ s} = 4'48''$
" " 3.6 à $t = 1368 \text{ s} = 23'$



4. $\phi = 1$ pour $t = 1/1.9 \cdot 10^{-3} = 526 \text{ s} = 8'46''$

2



$[C_v(CO_2) + 2 C_v(H_2O) + 7.52 C_v(N_2)] (T_2 - T_0) - [C_v(CH_4) + 2 C_v(O_2) + 7.52 C_v(N_2)] \left(\frac{T_2 - T_0}{0} \right) = Q^m$

$Q^m = \Delta H_c(CO_2) + 2 \Delta H_c(H_2O) - \Delta H_c(CH_4) = -800 \text{ kJ/mole}$

$\rightarrow (35 + 60 + 7.52 \cdot 29) (T_2 - T_0) = 800 \cdot 10^3 \rightarrow T_2 = 2850 \text{ K}$

1

5. \rightarrow D'air $\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_1}{T_1}$ (more constante) $\rightarrow P_2 = \frac{2850}{293} = 9.6 \text{ bars}$

1

6. \rightarrow FRAIS $Y_{CH_4} = \frac{16}{16 + 2(32 + 3.76 \cdot 28)} = 0.055 \quad Y_{O_2} = 0.17 \quad Y_{N_2} = 0.725$

$\rightarrow \frac{1}{W} = \sum \frac{Y_i}{W_i} = \frac{0.055}{16} + \frac{0.22}{32} + \frac{0.725}{28} \Rightarrow W_1 = 27.62 \text{ g/mole}$

1

BRULES $\rightarrow Y_{CO_2} = \frac{44}{16} = 0.15 \quad Y_{H_2O} = 0.124 \quad Y_{N_2} = 0.726 \Rightarrow W_2 = 27.63 \text{ g/mole}$