

# COMBUSTION MASTER

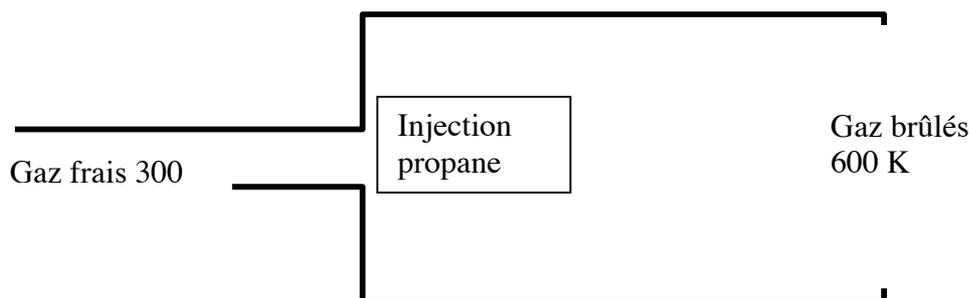
## CONTROLE 2006/07

T. Poinso, R. Bazile

Contrôle noté sur 22 points. Parties indépendantes. Lire tout l'énoncé avant de commencer chaque exercice.

### 1. COWPER DE HAUT FOURNEAU 6 pts

Un cowper de haut fourneau a pour objectif de réchauffer de l'air à  $T_1=300$  K avant de l'injecter dans le haut fourneau à  $T_2=600$  K.



Pour cela, on peut utiliser des brûleurs à gaz. On considère ici un cowper où  $M_1=40$  kg/s d'air entrent à 300 K et doivent sortir à 600 K. On utilise du propane :  $C_3H_8$  injecté à 300 K.

1/ Equilibrer la réaction  $C_3H_8$  / air stoechiométrique et calculer le rapport stoechiométrique s.  
 2/ Calculer la chaleur de réaction  $Q_r$  molaire puis massique. Calculer la température de fin de combustion  $T_{ad}$  au stoechiométrique pour un cas prémélangé où les gaz frais sont à  $T_1=300$  K. On travaillera en molaire avec les données suivantes (on suppose les  $C_p$  constants). Attention aux unités... Les  $C_p$  sont donnés en molaires.

$H_2O$  :  $C_p = 54$  uSI et  $\Delta H_{f0} = -57.8$  kcal/mole

$C_3H_8$  :  $C_p = 45$  uSI et  $\Delta H_{f0} = -24,82$  kcal/mole

$O_2$  :  $C_p = 38$  uSI et  $\Delta H_{f0} = 0$

$N_2$  :  $C_p = 34$  uSI et  $\Delta H_{f0} = 0$

$CO_2$  :  $C_p = 60$  uSI et  $\Delta H_{f0} = -94.05$  kcal/mole

3/ En travaillant maintenant sur des grandeurs massiques et en supposant que le  $C_p$  massique de tous les gaz utilisés est  $1300$  J/kg/K, calculer le débit de propane  $M_f$  qu'il faudra brûler pour que la température de sortie de l'air atteigne les 600 K demandés. Quelle sera la richesse globale du brûleur.

4/ Vous êtes chargés de concevoir le système de combustion. Pouvez vous utiliser une combustion prémélangée ? Si la limite de flammabilité est une richesse de 0.55, quelle est la température minimum  $T_2$  qui permettrait d'employer une flamme prémélangée ? Faire un croquis du système et expliquer les avantages et inconvénients. Quelle serait la température  $T_{max1}$  maximum atteinte dans le cowper ?

5/ Même question avec des flammes de diffusion : comment réaliser un système utilisant des flammes de diffusion (faire un croquis) ? Quelle sera la température maximum  $T_{max2}$  atteinte dans le cowper ?

On rappelle :  $T_0 = 298.15$  K, température de référence pour les données thermodynamiques. On néglige les dissociations.

**2. QUESTION D'EQUATIONS... 2 pts.** Ne pas tenter si vous n'avez pas cherché avant....

On considère un mélange binaire (N=2) de deux gaz 1 et 2 (fractions massiques locales Y1 et Y2, molaires X1 et X2, masses atomiques W1 et W2) . En partant de l'équation donnant les vitesses de diffusion de chaque espèce V1 et V2 :

$$\nabla X_p = \sum_{k=1}^N \frac{X_p X_k}{D_{kp}} (V_k - V_p)$$

retrouver la loi de Fick c'est à dire :  $V_1 Y_1 = -D_{12} \nabla Y_1$

**3. QUESTIONS DE COURS... 2 pts**

	OUI	NON
1 La température maximum atteinte dans une chambre parfaitement prémélangée est toujours la température stoechiométrique		
2 La température maximum atteinte dans une chambre non prémélangée est toujours la température stoechiométrique		
3 Plus la température est élevée, plus on fait de Nox		
4 La vitesse de flamme laminaire prémélangée dépend du coefficient de diffusion de la chaleur		
5 La théorie de la fraction de mélange nécessite que les espèces et la chaleur diffusent de la même façon (Lewis = 1 pour chaque espèce)		

**4. STRUCTURE DE FLAMMES DE DIFFUSION 5 pts**

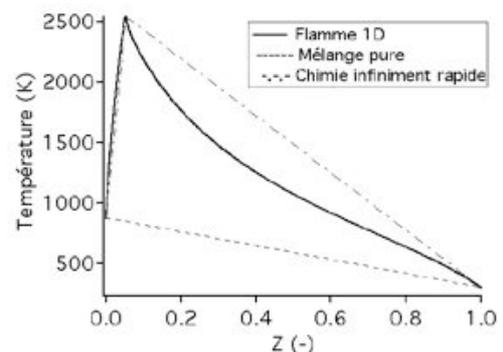
Pour un sous marin, on considère un brûleur consommant du méthane pur et de l'oxygène pur dans un mode de diffusion : méthane et oxygène sont injectés séparément. On travaillera en massique.

1/ Le méthane et l'oxygène sont injectés tous deux purs et à 300 K. Calculer la chaleur Qr dégagée par la combustion d'un kg de CH4. Calculer la fraction de mélange stoechiométrique Zst. Calculer la composition des gaz brûlés pour une combustion stoechiométrique et en déduire la valeur du Cp (massique) de ces gaz brûlés en utilisant les valeurs molaires de Cp(CO2)=60 J/K mole et Cp(H2O)=54 J/K mole. On utilisera cette valeur de Cp dans le reste de l'exercice. Données : CH4 : ΔHf0= -17,89 kcal/mole (voir le reste dans l'exercice 1).

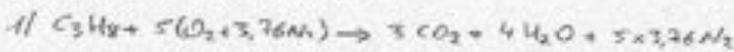
2/ Calculer la température maximum atteinte dans la flamme. Construire les courbes donnant la structure de flamme : T(z), Y H2 (z), Y O2 (z). Atteindrait on vraiment cette température en pratique ? Pourquoi ?

3/ On considère maintenant le cas d'une combustion méthane / air. L'air contient de l'oxygène dans les proportions normales (1 mole de O2 pour 3.76 moles de N2). Les deux gaz sont à 300 K. Recalculer le Cp massique des gaz brûlés au stoechiométrique (on prendra Cp(N2) = 34 J/mole K). Construire les courbes T(z), Y H2 (z), Y O2 (z).

4/ On continue sur le cas d'une combustion méthane / air. L'air est maintenant préchauffé à 870 K. La courbe ci-contre montre les droites de combustion en chimie infiniment rapide (pointillé tiret), en mélange pur (pointillé) ainsi que la courbe (trait continu) correspondant à une véritable flamme de diffusion mono dimensionnelle. Quels commentaires cette courbe vous inspire t elle ? Pourquoi la flamme réelle ne suit elle pas la chimie infiniment rapide partout ?



1. COMPOS DE HAUT FOURNEAU



$\lambda = \frac{5 \cdot 32}{36 + 8} = 3,636$

2/  $Q_R = \{3 \Delta H_f(CO_2) + 4 \Delta H_f(H_2O) - \Delta H_f(C_3H_8)\} = 488 \text{ kcal/mole} = 2,04 \text{ MJ/mole}$

$Q_R = \frac{Q_R}{0,044} = 46,46 \text{ MJ/kg}$

$[\sum C_p(CO_2) + 4 C_p(H_2O) + 5 \times 3,76 C_p(N_2)](T_{ad} - T_a) = Q_R$  (On peut négliger l'enthalpie sensible des réactifs car  $T_a \approx T_a$ )

$T_{ad} = 300 + \frac{2,04 \cdot 10^6}{3 \times 60 + 4 \times 40 + 5 \times 3,76 \times 24} = 2230 \text{ K}$

3/ L'énergie dégagée par 1 kg de fuel est 46,46 MJ. Elle sert à chauffer un débit d'air  $\dot{m}_a$ . On calcule d'abord  $T_a'$ , la température du mélange avant combustion avec  $T_a = T_a = 300 \text{ K}$

$\dot{m}_a \downarrow \text{HC}(T_a)$   
 $\dot{m}_a \rightarrow \dot{m}_a + \dot{m}_f (T_a')$   
 $(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_p T_a' = \dot{m}_a C_p T_a + \dot{m}_f C_p T_f$   
 $T_a' = \frac{\dot{m}_a T_a + \dot{m}_f T_f}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)} = T_a$  car  $T_a = T_f$

Après combustion on aura une température

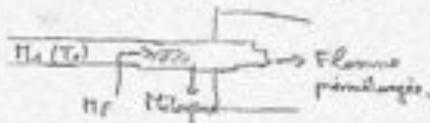
$T_2 = T_a' + \frac{Q_R Y_F}{C_p}$  avec  $Y_F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a + \dot{m}_f}$

$\Rightarrow Y_F = \frac{C_p(T_2 - T_a')}{Q_R} = \frac{1500 \cdot 300}{4646 \cdot 10^6} = 0,0095 \Rightarrow \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} = Y_F \Rightarrow \dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a Y_F}{1 - Y_F} = 0,0096 \dot{m}_a$

La richesse sera  $\phi = \frac{5 Y_F}{Y_a}$  dans les gaz mélangés OU  $\phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{O_2}} \rightarrow 0,025 \times \dot{m}_a$

$\Rightarrow \phi = 3,636 \times \frac{0,0096}{0,23 \times 40} = 0,3800$  Hors des limites de flammabilité  $\Rightarrow$  Impossible en prémélange.

4/ On ne peut pas faire le prémélange. On aurait pu se le fallait chauffer plus.

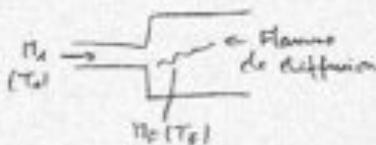


Pour pouvoir le faire, il faut travailler au moins à  $\phi = 0,55$ . On aurait alors une température des gaz brûlés de :

$T_2 = T_a' + \frac{Q_R Y_F}{C_p} = T_a' + \frac{\phi Y_a}{C_p} = 300 + \frac{4646 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 0,23}{1500 \cdot 2,02} = 1570 \text{ K}$

$T_{ad}$  est égale à  $T_2'$

5/ En diffusion, c'est possible. On explique le même débit de fuel mais on injecte directement dans la chambre.



La température maximum sera atteinte pour  $x = z_{st}$ .

$z_{st} = \frac{1}{1 + 3,636 \cdot \frac{1}{0,23}} = 0,0785$

$\Rightarrow T_{max} = z_{st} T_2 + (1 - z_{st}) T_f = 300 + \frac{4646 \cdot 10^6 \cdot 0,0785}{1500} = 3120 \text{ K}$

2. Question 2 équation: On a

$$\begin{cases} V_1 Y_1 + V_2 Y_2 = 0 \\ Y_1 + Y_2 = 1 & X_1 + X_2 = 1 \\ D X_1 = -X_1 X_2 (V_1 - V_2) & (1) \\ Y_1 = \frac{W_1 X_1}{W} \text{ avec } W = X_1 W_1 + X_2 W_2 \end{cases} \quad W_1, W_2 = \text{constantes}$$

On commence par montrer que  $DY_1$  et  $DX_1$  sont liés:

$$DY_1 = \frac{W_1}{W} DX_1 + W_1 X_2 \left( \frac{DX_1}{W} \right) = \frac{W_1}{W} \left[ DX_1 - X_2 \frac{W_1 DX_1 + W_2 DX_2}{W} \right] = \frac{W_1}{W} DX_1 \left[ \frac{W - X_2 (W_1 - W_2)}{W} \right]$$

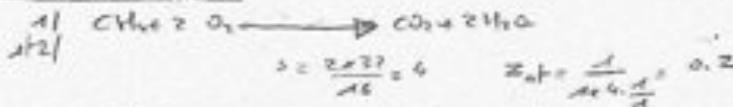
$$\boxed{\frac{DY_1}{DX_1} = \frac{W_1 W_2 DX_1}{W^2}}$$

En ramenant dans (1):

$$D \left( \frac{W_1 X_1}{W} \right) = - \frac{W_1}{W} X_1 \frac{W_1}{W_2} X_2 \left( V_1 + V_2 \frac{Y_1}{Y_2} \right) \Rightarrow \boxed{D_{12} DY_1 = - Y_1 V_2} \quad \text{Fin}$$

3. Question de cours: 1-non 2-oui 3-oui 4-oui 5-oui

4. Flamme de diffusion



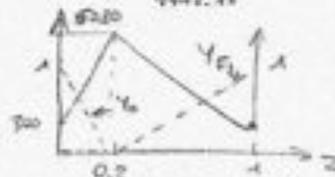
$$T_{flam} = z_{st} T_1 + (1 - z_{st}) T_2 + \frac{Q_{R1} z_{st}}{C_p} = 300 + \frac{50 \times 10^6}{2100} \times 0.2 = 5080 \text{ K}$$

avec  $Q_{R1} = - \{ 2 \Delta H_f(\text{CO}_2) + 2 \Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H_f(\text{CH}_4) \} = - \{ -39,01 - 2 \times 241,8 + 74,8 \} \text{ kJ/mol}$   
 $= 187,76 \text{ kJ/mol} = 202 \text{ kJ/mol}$   
 $\Rightarrow \boxed{Q_{R1} = 44 / 0.218 = 202 \text{ MJ/kg}}$

et  $C_p$  est calculé sur les gaz brûlés:

$C_p = C_p(\text{CO}_2) Y_{\text{CO}_2} + C_p(\text{H}_2\text{O}) Y_{\text{H}_2\text{O}}$  et  $Y_{\text{CO}_2} = \frac{44}{44 + 2 \times 18} = 0.57$  et  $Y_{\text{H}_2\text{O}} = 0.43$

$$C_p = \frac{60 \times 0.57}{0.218} + \frac{54 \times 0.43}{0.218} = 2410 \text{ J/kg K}$$



3/ Seul  $z_{st}$  change:  $\frac{1}{4 \times 4} = 0.054$ ,  $C_p$  change aussi pour les gaz brûlés

Donc  $T_{flam} = 300 + \frac{50 \times 10^6}{2100} \times 0.054$   
 $T_{flam} = 2170 \text{ K}$

$Y_{\text{CO}_2} = \frac{44}{44 + 2 \times 18 + 2 \times 32 \times 0.054} = 0.48$   
 $Y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{36 \times 0.054}{44 + 2 \times 18 + 2 \times 32 \times 0.054} = 0.12$   
 $Y_{\text{N}_2} = 1 - 0.48 - 0.12 = 0.4$

$$C_p = \frac{60 \times 0.48}{0.218} + \frac{54 \times 0.12}{0.218} + \frac{32 \times 0.4}{0.218} = 2450 \text{ J/kg}$$

4/ la flamme réelle ne suit pas les hypothèses de la fraction de mélange de côté réactif: le Schmidt et le Prandtl sont différents,  $C_p$  varie la combustion réelle diffère de la limite théorique.