

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°1

### **Evaporation d'un combustible liquide**

Du n-Octane liquide ( $C_8H_{18}$ ) à  $T=298$  K est contenu dans un bac de stockage de 2.55 m de diamètre, à une distance de 10 cm du sommet du bac. Le combustible liquide s'évapore, et le combustible gazeux est dispersé dans un bâtiment à la pression atmosphérique de 5 m de longueur, 4 m de largeur et 2.5 m de hauteur avec  $T=300$  K. On donne :

Température d'ébullition :  $T_E=127.5$  °C à  $P=1$  bar

Coefficient de diffusion de masse :  $D_F=0.88 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s à 300 K (évaporation dans l'air)

Chaleur latente :  $L_v=300$  kJ/kg

Masse volumique :  $\rho_l = 703$  kg / m<sup>3</sup>

Chaleur spécifique :  $C_{pg}=2.4$  kJ/kg.K

Chaleur de combustion :  $\Delta h_c=44791$  kJ/kg

### **Questions :**

- 1) Déterminer la vitesse d'évaporation du n-Octane en kg/s en imposant  $Y_{F,\infty} = 0$ .
- 2) Estimer la vitesse d'évaporation un jour après la dispersion du combustible gazeux dans ce bâtiment (  $Y_{F,\infty} \neq 0$  ).
- 3) Evaluer le risque d'inflammation de ce mélange dans ce bâtiment un jour après la dispersion du combustible gazeux sachant que LII (richesse)=0.51 et LSI=4.25.
- 4) Déterminer la pression de milieu dans ce bâtiment si un feu de nappe issu de la même surface liquide naît accidentellement dû à la présence d'une source d'inflammation. Pour cela, il faut établir les relations suivantes :
  - fraction de mélange en fonction de la richesse ;
  - température de milieu en fonction de la fraction de mélange ;
  - pression en fonction de la température (Equation d'état).

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°2

### **Combustion des gouttes dans un milieu au repos**

Dans une chambre de combustion à la pression atmosphérique, un hydrocarbure liquide, kérosène ( $C_{12}H_{26}$ ), en gouttelettes d'un diamètre de  $100\ \mu m$  brûle dans l'air. La température initiale de la gouttelette est de  $300\ K$ , et la température de milieu dans cette chambre de combustion est d'environ  $T_{\infty} = 1400\ K$ . On fait l'hypothèse que l'environnement est au repos et la gouttelette est à sa température d'ébullition ( $Y_{F,s}=1$ ) durant la combustion. On donne :

$\rho_l = 825\ kg/m^3$ ,  $T_E = 250^\circ C$ ,  $L_V = 290\ kJ/kg$

$C_{pg} = C_{pf} = 4.22\ kJ/kg.K$ ,  $C_{pl} = 1.9\ kJ/kg.K$

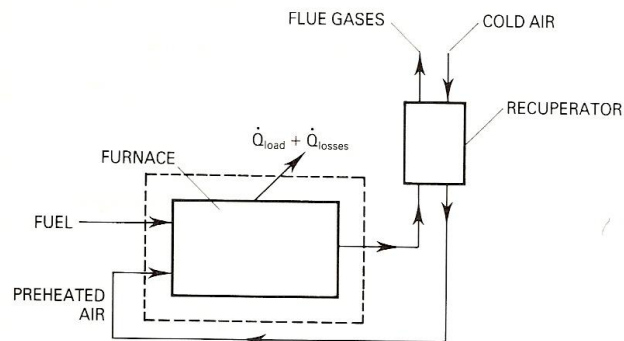
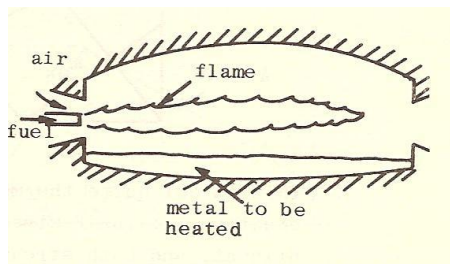
Chaleur spécifique d'un mélange :  $C_{pm} = 2.1\ kJ/kg.K$

$k_{ox} = 0.095\ W/m.K$ ,  $k_F = 0.12\ W/m.K$  à  $T = 1400\ K$

$\Delta h_c = 44515\ kJ/kg$

### **Questions :**

- 1) Déterminer la vitesse d'évaporation autour d'une goutte, la température de flamme et le rapport de la flamme/ rayon de la gouttelette.
- 2) Calculer la température de flamme correspondant à une combustion dans un mélange contenant 35% d'oxygène et 65% d'azote (fraction molaire).
- 3) Un récupérateur d'énergie est placé dans cette chambre de combustion de traitement thermique. La chambre de combustion fonctionne avec une richesse d'environ 1. Faire l'hypothèse que la réaction chimique est parfaite et la température des gaz brûlés en sortie de la chambre, avant d'entrer dans le récupérateur est de  $1700\ K$ , que l'air soit préchauffé ou non. L'enthalpie de formation et celle sensible sont résumées dans le tableau.
  - a) Quelle économie de combustible réalise-t-on lorsqu'on préchauffe l'air de  $298\ K$  à  $600\ K$  en utilisant ce récupérateur d'énergie.
  - b) Quelle variation de la température adiabatique ?



Espèces	Enthalpie de formation $\bar{h}_f^0$ (kJ/kmol)	Enthalpie sensible $\Delta \bar{h}_s$ (kJ/kmol)
CO <sub>2</sub>	-393547	73446 à T=1700 K
H <sub>2</sub> O	-241865	57786 à T=1700 K
N <sub>2</sub>	0	45423 à T=1700 K
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-292161	0 à T=300 K
Air	0	0 à T=300 K 8978 à T=600 K

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°3

### **Combustible liquide - Application au feu d'un aéronef**

Un feu peut naître au niveau du moteur en raison d'une fuite de kérosène issue d'une mauvaise maintenance d'avion au niveau de la canalisation. On suppose que le combustible liquide (kérosène) s'évapore en s'écoulant sur une paroi verticale du moteur avec une hauteur de 20 cm et une largeur de 2 mm. Le combustible gazeux est dispersé dans une enceinte du moteur avec un volume de  $0.03 \text{ m}^3$  et une température du milieu de  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  à la pression atmosphérique. Un écoulement en convection naturelle avec une température moyenne de  $T_\infty = 200^\circ\text{C}$  se développe le long de cette paroi verticale, et la température surfacique du liquide est de  $T_s = 150^\circ\text{C}$ . La dimension caractéristique d'évaporation est d'environ 10 cm correspondant approximativement à une épaisseur de la couche limite thermique.

1) Evaluer le temps pour avoir un risque d'inflammation de ce mélange après la dispersion du combustible gazeux dans cette enceinte, sachant que LII (richesse)=0.36 et LSI (richesse)=3.92.

2) Déterminer la pression dans cette enceinte lorsqu'un feu naît accidentellement en présence d'une source d'inflammation.

Dans les cas les plus défavorables, ce type d'accident peut conduire à un feu sortant du moteur dû à l'éclatement du capot avec effets pneumatiques, provoquant un post-crash feu comme représenté sur le schéma ci-dessous. Le kérosène liquide s'établit au sol avec un diamètre d'environ 10 m dû à une fuite de fuel au niveau du moteur. La température initiale du combustible liquide est de 300K. La température de milieu réactif dans la couche limite est d'environ  $T_\infty = 1000\text{K}$ . En présence d'un faible vent, un écoulement à une vitesse d'environ 0.4 m/s passe parallèlement à la surface du combustible liquide qui s'évapore. La dimension caractéristique de cette nappe liquide est considérée comme  $l=0.05 \text{ m}$ , correspondant approximativement à l'épaisseur de la couche limite au-dessus de la surface du liquide.

3) Déterminer la puissance de ce feu issu un post-crash.

On donne quelques propriétés thermo physiques suivantes :

Viscosité cinématique :  $\nu_g = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  ; Conductivité thermique :  $k_g = 0.026 \text{ W/m.K}$

Chaleur spécifique :  $C_{pg} = 1.2 \text{ kJ/kg.K}$  ;  $C_{pl} = 1.9 \text{ kJ/kg.K}$

Température d'ébullition :  $T_E = 250^\circ\text{C}$  à  $P = 1 \text{ bar}$ .

Chaleur de combustion:  $\Delta h_c = 44515 \text{ kJ/kg}$  ;

Chaleur latente :  $L_V = 290 \text{ kJ/kg}$



Feu sortant du moteur durant vol



Feu issu un post-crash

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°4

### **Combustion des gouttes avec des environnements convectifs**

On considère un moteur de combustion, qui est constitué de plusieurs buses circulaires réparties sur un cercle de diamètre de 36 cm et alimenté au kérosène ( $C_{12}H_{26}$ ) avec un débit massique de  $\dot{M}_F = 2 \text{ kg/s}$ . Chaque jet est issu d'une buse circulaire de 2 mm de diamètre avec une vitesse d'injection de 80 m/s. Des grosses gouttelettes d'un diamètre de 100  $\mu\text{m}$  sont injectées dans cette chambre de combustion, et donc un préchauffage des gouttelettes devient significatif. Le kérosène est à la température initiale de 280 K, et l'air est préchauffé jusqu'à une température de 600 K. La température de milieu dans cette chambre de combustion est d'environ  $T_\infty = 1400\text{K}$  et la pression est de 10 bar. On considère les effets convectifs sur la combustion des gouttes dus à une forte vitesse relative entre les gouttes et l'écoulement principal correspondant à l'air primaire.

De plus, on suppose que la diffusion autour des gouttes est laminaire bien que le mélange du gaz soit turbulent. Supposons aussi que le poids molaire de ce mélange est d'environ 30 kg/kmol, et la chaleur spécifique de ce mélange est d'environ 4.2 kJ/kg.K.

On donne aussi :

$$\rho_l = 825 \text{ kg/m}^3, T_E = 250^\circ\text{C} \text{ à } P = 1 \text{ bar}, L_v = 290 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{pg} = C_{pF} = 4.22 \text{ kJ/kg.K}, C_{pl} = 1.9 \text{ kJ/kg.K}$$

$$k_{ox} = 0.095 \text{ W/m.K}, k_F = 0.12 \text{ W/m.K} \text{ à } T = 1400 \text{ K}$$

$$\Delta h_c = 44515 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Viscosité cinématique en régime laminaire : } \nu_g = 13 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \text{ à } T = 1400 \text{ K}$$

$$\text{Nombre de Prandtl : } Pr = 0.7$$

### **Questions :**

1) L'évaporation d'un combustible liquide est fonction essentiellement de la pression à l'interface. L'équation de Clausius-Clapeyron sous forme différentielle s'exprime :

$$\frac{dP_v}{P_v} = \frac{L_v}{R_u / MW_F} \frac{dT}{T^2}$$

On trouve aussi l'expression exponentielle de Clausius-Clapeyron :

$$P_v = A \exp(-B/T)$$

Montrer que les constantes de Clausius-Clapeyron A et B sont spécifiques à un combustible donné comme suit :

$$A = \exp\left(\frac{L_v}{T_E R_u / MW_F}\right) \qquad B = \frac{L_v}{R_u / MW_F}$$

Déterminer les constantes A et B de l'équation de Clausius-Clapeyron et ensuite la température d'ébullition à  $P = 10 \text{ bar}$ .

2) Calculer le débit massique d'air primaire ( $\dot{M}_{A, \text{pri}}$ ) nécessaire à la stoechiométrie

- 3) Estimer la longueur de cette chambre de combustion, le nombre des jets nécessaires et l'espacement entre les jets. Ensuite, comparer les résultats afin de savoir si qu'il y a une interaction entre les jets.
- 4) Calculer l'intensité ( $\text{W} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) de combustion de ce moteur avec une section circulaire pour une réaction chimique parfaite.
- 5) Calculer le débit massique de  $\text{CO}_2$  dans le produit de combustion à la sortie de combustion moteur.

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°5

### **Combustion des gouttes avec des imbrûlés**

Un moteur de combustion est constitué de N buses circulaires (jets) réparties sur un cercle de diamètre de 0.32 m. Les jets sont correctement répartis sur ce cercle afin d'éviter l'interaction entre les jets. Chaque jet est issu d'une buse circulaire de 1.5 mm de diamètre avec une forte vitesse d'injection. Ce moteur avec une longueur de 0.6 m est alimenté au kérosène ( $C_{12}H_{26}$ ) avec une intensité de combustion théorique d'environ  $5 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ . La flamme reste au sein de la chambre de combustion pour assurer une meilleure efficacité de combustion. Faire l'hypothèse que la réaction chimique est parfaite dans la chambre de combustion. On considère un préchauffage des gouttelettes pour estimer la durée de vie des gouttes. Le kérosène est à la température initiale de 280 K, et l'air est préchauffé jusqu'à une température de 600 K. La température de milieu dans cette chambre de combustion est d'environ  $T_\infty = 1400 \text{ K}$  et la pression est de 30 bar. De plus, on suppose que 1) les effets convectifs entre les gouttes et l'écoulement principal sur l'évaporation des gouttes sont indépendants de diamètre des gouttelettes avec le nombre de Nusselt identique ; 2) l'interaction entre les gouttelettes est négligeable, et la diffusion autour des gouttes est laminaire dans un écoulement turbulent ; 3) le poids molaire de ce mélange est d'environ 30 kg/kmol, et la chaleur spécifique de ce mélange est d'environ  $C_{pm} = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ .

En raison d'une mauvaise maintenance du moteur au niveau des jets, des grosses gouttelettes de kérosène d'un diamètre de 350  $\mu\text{m}$  sont injectées dans la chambre de combustion. De ce fait, les gouttelettes ne sont pas complètement brûlées en fin de la chambre de combustion. La formation des combustibles imbrûlés à la sortie de la chambre de combustion peut entraîner une diminution de l'intensité de combustion, et par conséquent, de la force de poussée du moteur.

On donne aussi :

$\rho_l = 825 \text{ kg/m}^3$ ,  $T_E = 250^\circ\text{C}$  à la pression atmosphérique

Chaleur latente du liquide :  $L_v = 290 \text{ kJ/kg}$

Chaleur spécifique pour le gaz :  $C_{pg} = C_{pf} = 4.22 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  ; pour le liquide :  $C_{pl} = 1.9 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

Conductivité thermique :  $k_{ox} = 0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $k_f = 0.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  à  $T = 1400 \text{ K}$

Viscosité cinématique :  $\nu_g = 21.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $T = 1400 \text{ K}$

Chaleur de combustion :  $\Delta h_c = 44515 \text{ kJ/kg}$

### **Questions :**

- 1) Déterminer le nombre total, par seconde, des gouttelettes injectées dans la chambre de combustion en négligeant l'interaction entre les gouttelettes.
- 2) Evaluer l'intensité ( $\text{W} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) de combustion effective en raison du mauvais fonctionnement des injecteurs.

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°6

### **Combustion des particules solides**

Des particules de carbone de diamètre compris entre 70 et 250  $\mu\text{m}$  sont injectées dans de l'air au repos ( $Y_{\text{O}_2, \infty} = 0.233$ ) à la pression atmosphérique. La température initiale de carbone est de 300 K et sa température surfacique des particules est de 1800 K durant la combustion. Le rayonnement s'avère le paramètre primordial dans le contrôle de la combustion solide avec une température de flamme de 2000 K. On suppose que le poids molaire d'un mélange du gaz à l'interface est de 30 kg/kmol. On utilise également la température surfacique des particules pour estimer le coefficient de diffusion de masse comme suit :

$$D_m = D_{m,0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2}$$

On donne :

$$D_m = 1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \text{ à } 393 \text{ K}$$

$$C_{pg} = 1.286 \text{ kJ/kg.K}, \quad k_g = 0.12 \text{ W/m.K} \text{ à } T = 1800 \text{ K}$$

$$\Delta h_c = 32765 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Masse volumique de carbone : } \rho_c = 1900 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Chaleur spécifique de carbone : } C_{pc} = 2 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Emissivité surfacique de carbone : } \varepsilon_s = 1$$

### **Questions :**

On utilise d'abord le modèle à un film pour des particules de diamètre de 250  $\mu\text{m}$ . Avec ce modèle, la constante de vitesse cinétique pour la réaction,  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ , est sous la forme empirique suivante :

$$k_c = 3 \cdot 10^5 \exp(-17966/T_s) \quad (\text{m/s})$$

- 1) Calculer la vitesse de combustion d'une particule de carbone.
- 2) Estimer la température du gaz ( $T_\infty$ ) autour d'une particule de carbone qui rayonne comme un corps noir vers l'environnement avec une température de référence de  $T_r = 300 \text{ K}$ .

La cinétique chimique devient prédominante pour la combustion des particules de carbone de diamètre de 70  $\mu\text{m}$ . Dans ce cas, on utilise le modèle à deux films avec lequel la constante de vitesse cinétique pour la réaction,  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ , s'exprime :

$$k_c = 4.016 \cdot 10^8 \exp(-29790/T_s) \quad (\text{m/s})$$

- 3) Détermine la vitesse de combustion et la durée de vie des particules de carbone avec un diamètre de 70  $\mu\text{m}$ .

## Travaux Dirigés (Combustion Hétérogène) n°7

### **Combustion des solides**

Dans un propulseur hybride solide-gaz, une flamme se développe à la surface d'un combustible solide de type propergol ( $C_5H_8$ ) avec une température initiale de  $T_0=293K$ . La pression de milieu dans ce propulseur est d'environ 10 bar. Un écoulement turbulent en convection forcée avec une vitesse de 15 m/s passe parallèlement à la surface de ce combustible solide. En estimant la température de flamme à  $T_f = 2500 K$  dans un milieu réactif avec l'oxygène pur, l'épaisseur de flamme issue de la surface de propergol est d'environ 35  $\mu m$ . On suppose qu'une diffusion laminaire est maintenue dans la couche limite réactive au niveau de la hauteur de flamme.

Pour améliorer les performances des moteurs propulsifs, les matériaux énergétiques comme les propergols solides, sont fortement chargés en particules d'Aluminium. On suppose que les particules d'Aluminium et le combustible gazeux sont éjectées de la surface de propergol avec la même vitesse uniforme. La masse volumique de propergol est d'environ  $1700 \text{ kg/m}^3$ , et celle d'Aluminium est de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . De plus, le poids molaire de ce mélange à l'interface est d'environ 45 kg/kmol. On utilise le modèle à un film pour la combustion des particules d'Aluminium ( $4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3$ ) avec une diffusion prédominante.

On donne aussi,

Température surfacique de propergol à dégradation :  $T_s=367^\circ C$

Chaleur de la gazéification :  $L_v=1563 \text{ kJ/kg}$

Chaleur spécifique d'Aluminium :  $C_{p,Al}= 0.9 \text{ kJ/kg.K}$

Chaleur spécifique du gaz :  $C_{pg}= 2.4 \text{ kJ/kg.K}$

Conductivité thermique du gaz :  $k_g=0.12 \text{ W/m.K}$

Chaleur de combustion :  $\Delta h_c=47000 \text{ kJ/kg}$

Viscosité cinématique en régime laminaire :  $\nu_g = 268 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $\bar{T} = 0.5(T_f + T_s)$

Coefficient de diffusion de masse :  $D_{m,0}=1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  à 393 K.

Coefficient de diffusion en fonction de la température :  $D_m = D_{m,0} \left( \frac{\bar{T}}{T_0} \right)^{3/2}$

Température moyenne :  $\bar{T} = 0.5(T_f + T_s)$

Nombre de Prandtl :  $Pr=0.7$

### **Question :**

- 1) Evaluer la vitesse de régression de propergol le long de ce combustible solide à la longueur de  $x= 1 \text{ m}$ .
- 2) Estimer la taille des particules critique lorsque les particules d'aluminium sont complètement brûlées en fin de la hauteur de la flamme à  $x= 1 \text{ m}$ .