

Département de Génie Mécanique – Université Badji Mokhtar
Annaba

Cours « **Combustion** » pour les étudiants de **Master I -
Énergétique**

Responsable du module: Dr **F. MECHIGHEL**

Chapitre 4 : Équations des écoulements réactifs

4.1 Introduction

Les **transferts** de **chaleur** et de **masse** (c'est-à-dire des espèces générées par des réactions chimiques) sont des enjeux essentiels dans la plupart des processus de combustion. Ces processus de transfert peuvent être décrits par des équations mathématiques (lois de conservation). Ces équations qui incluent les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie régissent et expliquent les effets des réactions chimiques sur les différents transferts dans les systèmes de combustion.

4.2 Conservations de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces chimiques

4.2.1 Transfert thermique

La **chaleur** peut être transférée (transportée) par **conduction**, **convection** et **rayonnement**.

-La **conduction** : dans un processus de combustion général, la chaleur peut être transférée par conduction, convection et rayonnement. La conduction est le transfert moléculaire d'énergie de haute à basse température. En fait, les molécules à haute température ont beaucoup d'énergie et transmettent une partie de cette énergie aux molécules à basse température. Le flux (taux) de chaleur transférée est donné par la loi de Fourier de conduction thermique tel que :

$$\dot{q}_{cond} = -kA \text{ grad } T \quad \text{en (W)} \quad (4.1)$$

où k est la conductivité thermique du milieu (domaine) en (W/m K), A est l'aire (m^2) et $\text{grad } T$ est le gradient de température (K/m).

-La **convection** : elle est la combinaison de deux mécanismes de transfert d'énergie. Le premier transfert est dû aux collisions moléculaires (conduction) et le second représente le transfert d'énergie dû au déplacement des particules fluides au sein de l'écoulement (advection). En traitant la convection comme une combinaison de conduction et d'écoulement global, nous pouvons appliquer la loi de Fourier de conduction thermique :

$$\dot{q}_{conv} = -kA \text{grad } T(\mathbf{u}) \quad (4.2)$$

où le gradient de température est fonction de la vitesse du fluide \mathbf{u} . En raison de la condition de non-glissement sur une paroi solide, le fluide forme une **impulsion** et une couche limite thermique près de la surface. Si une seule dimension (1D) est prise en compte, le gradient de température peut s'écrire :

$$-\text{grad } T = -\frac{dT}{dx} \approx \frac{T_c - T_f}{\delta} \quad (4.3)$$

où δ est l'épaisseur de la couche limite thermique. Si cette expression est insérée dans l'équation 4.2 (cas 1D), on a :

$$\dot{q}_{conv} = -kA \nabla T(\mathbf{u}) = kA \frac{T_c - T_f}{\delta} = \tilde{h} A (T_c - T_f) \quad (4.4)$$

où \tilde{h} est le coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W/m}^2 \text{K}$) défini comme le rapport de la conductivité thermique et de l'épaisseur de la couche limite thermique δ . L'équation 4.4 est appelée **loi de Newton du refroidissement**. Généralement, le coefficient de transfert de chaleur convectif est déterminé soit avec des solutions de similitude des équations de la couche limite, soit avec des corrélations expérimentales et peut être trouvé dans les manuels sur le transfert de chaleur. Le coefficient de transfert de chaleur convectif varie avec la géométrie et les conditions d'écoulement, mais de nombreuses situations peuvent être représentées par une corrélation de la forme

$$\tilde{h} = C \frac{k}{L} \text{Re}^a \text{Pr}^b \quad (4.5)$$

où Re est le nombre de Reynolds, Pr est le nombre de Prandtl fluide, L est la longueur caractéristique et a , b et C sont des constantes empiriques. Pour les processus fortement dominés (par convection libre), l'équation 4.5 devient

$$\tilde{h} = C \frac{k}{L} \text{Gr}^a \text{Pr}^b \quad (4.6)$$

où Gr est le nombre de Grashof (le rapport de la flottabilité à la force visqueuse).

-Le **rayonnement** : il représente le transfert d'énergie à travers les ondes électromagnétiques et ne nécessite donc pas de « **milieu** ». Pour calculer la quantité de transfert de chaleur par rayonnement d'une substance à la température T vers l'environnement à la température T_∞ , la loi de Stefan-Boltzmann est utilisée :

$$\dot{q}_{rad} = F_{12} A \varepsilon \sigma_s (T^4 - T_\infty^4) \quad (4.7)$$

où ε est l'émissivité du corps ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), σ_s est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴), A est la surface (m²) de la substance et F_{12} est un facteur géométrique.

4.2.2 Transfert massique (d'espèces)

Également, **la masse** peut être transférée (transportée) par **advection** et **diffusion**. Mais aussi peut être **créée** ou **détériorée** par les réactions chimiques.

1- Advection : L'**advection** est le transport d'espèces par le mouvement de fluide comme décrit par :

$$\dot{m}_{adv}'' = \rho_i u = \rho y_i u \quad (4.8)$$

Le double primes désigne le flux massique à travers une surface unitaire en (kg/m² s), ρ_i est la densité de masse (kg/m³) de l'espèce i qui est liée à la **densité** globale telle que $\rho_i = \rho y_i$.

2- Diffusion : La **diffusion** est le transport de **masse** dû à un **gradient** de **concentration des espèces**. Prenons un domaine unidimensionnel infini. Initialement, le côté gauche du domaine est rempli de carburant et le côté droit avec l'oxydant comme indiqué sur la **figure 4.1**. La diffusion entre le carburant et le comburant commence à l'interface, créant une couche de mélange contenant à la fois le carburant et le comburant. Le processus de diffusion est décrit par la loi de Fick tel que :

$$\dot{m}_{D,i}'' = \rho D_i \frac{\partial y_i}{\partial x} \quad (4.9)$$

où ρ est la densité (kg/m³), D_i est la diffusivité des $i^{\text{èmes}}$ espèces (m²/s), et y_i est la fraction massique correspondante.

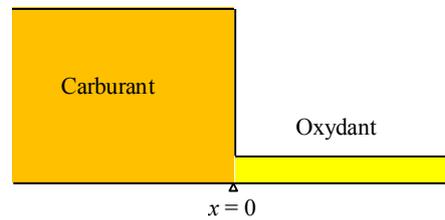


Figure 4.1 : et oxydant initialement séparés à $x = 0$. La concentration du carburant est 1 dans le domaine gauche et 0 dans la droite.

3- Création ou détérioration de la masse : La masse d'une espèce, i , peut être créée (générée) ou détruite par des réactions chimiques à une vitesse donnée par :

$$\dot{m}_{\text{gen},i}^m = \hat{r}_i M_i \quad (4.10)$$

qui représente une grandeur volumétrique avec des unités de $\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$. M_i est la masse moléculaire de l'espèce i (kg/kmole), et \hat{r}_i est le taux de production molaire en ($\text{kmole}/\text{m}^3 \text{ s}$).