

Département de Génie Mécanique – Université Badji Mokhtar
Annaba

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

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

Chapitre 2: Thermodynamique de la combustion (Suite)

2.4 Température de flamme adiabatique

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un processus de combustion est la température la plus élevée des produits de combustion qui peut être atteinte. La température des produits sera maximale lorsqu'il n'y a pas de pertes de chaleur dans l'environnement et que toute l'énergie dégagée par la combustion est utilisée pour chauffer les produits. Dans les deux sections suivantes, la méthodologie utilisée pour calculer la température maximale, ou *température de flamme adiabatique*, sera présentée.

2.4.1 Processus de combustion à pression constante

Pour calculer la température de la flamme adiabatique, nous utiliserons une analyse adiabatique à pression constante, en supposant que l'eau dans les produits se manifeste probablement dans la phase gazeuse (vapeur) en raison de la température de combustion élevée. Dans cette condition parfaite, l'équation de conservation de l'énergie s'écrit:

$$H_P(T_P) = H_R(T_R), \quad (2.43)$$

où

$$H_P(T_P) = \sum_i N_{i,P} (\widehat{h}_{i,P}^0) = \sum_i N_{i,P} (\Delta \widehat{h}_{i,P}^0 + \widehat{h}_{s,i,P}(T_P)) \quad (2.44)$$

et

$$H_R(T_R) = \sum_i N_{i,R} (\widehat{h}_{i,R}^0) = \sum_i N_{i,R} (\Delta \widehat{h}_{i,R}^0 + \widehat{h}_{s,i,R}(T_R)) \quad (2.45)$$

La [figure 2.3](#) donne une explication graphique de la façon dont la température de la flamme adiabatique est déterminée. À la température initiale du mélange de réactifs T_R , l'enthalpie du mélange de produits $H_R(T_R)$ est inférieure à celle du mélange de réactifs $H_P(T_R)$. L'énergie

dégagée par la combustion est utilisée pour chauffer les produits de manière à ce que la condition $H_p(T_p) = H_r(T_r)$ soit satisfaite.

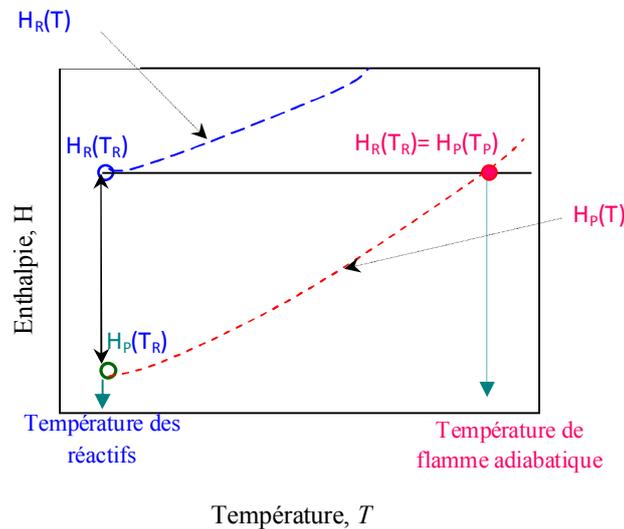


Figure 2.3 : Interprétation graphique de la température de la flamme adiabatique

La tâche consiste à trouver la température des produits T_p en tenant compte de l'enthalpie des réactifs $H_R(T_R)$. Il existe **trois méthodes différentes** pour obtenir le T_p :

1. En utilisant une valeur moyenne constante de c_p ,
2. Un bilan d'enthalpie itératif,
3. Trouver l'état d'équilibre à l'aide d'un logiciel de calcul (tel que Cantera).

Les deux premières méthodes peuvent être effectuées manuellement si une combustion complète est envisagée et ne fournissent que des estimations rapides. Un solveur d'équilibre prend en compte le phénomène de dissociation des produits à haute température, ce qui le rend plus précis que les deux premières méthodes.

Méthode 1: Valeur moyenne constante de c_p

De la conservation de l'énergie, $H_p(T_p) = H_r(T_r)$, nous pouvons écrire :

$$\sum_i N_{i,P} \left(\Delta \hat{h}_{i,P}^0 + \hat{h}_{s,i,P}(T_P) \right) = \sum_i N_{i,R} \left(\Delta \hat{h}_{i,R}^0 + \hat{h}_{s,i,R}(T_R) \right) \quad (2.46)$$

En réarrangeant on a

$$\begin{aligned} \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) &= - \left[\sum_i N_{i,\mathbf{P}} (\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0) - \sum_i N_{i,\mathbf{R}} (\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0) \right] + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} (\widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}})) \\ &= -Q_{r,p}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) \end{aligned} \quad (2.47)$$

avec

$$-Q_{r,p}^0 = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0 - \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0 \quad (2.48)$$

Rappelons que l'eau dans les produits est supposée en phase gazeuse en raison de la température de combustion élevée; donc lorsque le carburant est complètement consommé l'**enthalpie de réaction** est donnée par : $-Q_{r,p}^0 = PCI N_{fuel} \mathcal{M}_{fuel} = PCI m_{fuel}$. Le deuxième terme, $\sum_i N_{i,\mathbf{R}} (\widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}))$, dans l'équation (2.47) représente la différence d'enthalpie sensible entre $T_{\mathbf{R}}$ et T_0 (25°C) pour le mélange réactif. En supposant que l'enthalpie sensible peut être approximée par $\widehat{h}_{s,i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) \approx \widehat{c}_{p_i}(T_{\mathbf{P}} - T_0)$ avec $\widehat{c}_{p_i} \approx \text{constant}$, nous avons alors de l'équation (2.47) :

$$(T_{\mathbf{P}} - T_0) \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i} \cong \widehat{c}_p (T_{\mathbf{P}} - T_0) \sum_i N_{i,\mathbf{P}} = -Q_{r,p}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) \quad (2.49)$$

En réarrangeant cette dernière équation, on trouve $T_{\mathbf{P}}$ comme suit :

$$T_{\mathbf{P}} = T_0 + \frac{-Q_{r,p}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}})}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} \approx T_{\mathbf{R}} + \frac{-Q_{r,p}^0}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} = T_{\mathbf{R}} + \frac{PCI (N_{fuel} \mathcal{M}_{fuel})}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} \quad (2.50)$$

où les approximations suivantes $\sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{c}_{p_i,\mathbf{R}} \cong \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}$ a été appliquée. Aussi

$$\frac{\sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}})}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} = \frac{\sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{c}_{p_i,\mathbf{R}} (T_{\mathbf{R}} - T_0)}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} \approx (T_{\mathbf{R}} - T_0) \quad (2.51)$$

Et lorsque les réactifs entrent dans la chambre de combustion dans les conditions standard, l'équation (2.50) se réduit à :

$$T_{\mathbf{P}} = T_0 + \frac{PCI(N_{fuel} \mathcal{M}_{fuel})}{\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{c}_{p_i}} \quad (2.52)$$

car les enthalpies sensibles des réactifs sont nulles à T_0 .

Remarque :

Noter que la procédure ci-dessus est générale et peut être appliquée à n'importe quel mélange. De plus, la chaleur spécifique est une fonction de la température, donc la précision de cette approche dépend de la valeur sélectionnée pour la chaleur spécifique \widehat{c}_p .

Méthode 2: Équilibre enthalpique itératif

Une approche plus précise consiste à trouver la température de la flamme en attribuant itérativement la température de la flamme T_P jusqu'à $H_P(T_P) = H_R(T_R)$. L'enthalpie des réactifs est supposée donnée. L'enthalpie des produits peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} H_{\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) &= \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{h}_{i,\mathbf{P}} = \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \left(\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0 + \widehat{h}_{s,i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) \right) \\ &= H_{\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{i,\mathbf{R}} = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \left(\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0 + \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) \right) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Ensuite, nous réarrangeons cette équation pour trouver une expression pour l'enthalpie sensible des produits telle que :

$$\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \left(\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0 + \widehat{h}_{s,i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) \right) = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \left(\Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0 + \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) \right)$$

implique que

$$\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s,i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}})$$

ce qui donne

$$\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{h}_{s i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) = \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{R}}^0 - \sum_i N_{i,\mathbf{P}} \Delta \widehat{h}_{i,\mathbf{P}}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}})$$

alors

$$\sum_i N_{i,\mathbf{P}} \widehat{h}_{s i,\mathbf{P}}(T_{\mathbf{P}}) = -Q_{r,p}^0 + \sum_i N_{i,\mathbf{R}} \widehat{h}_{s i,\mathbf{R}}(T_{\mathbf{R}}) \quad (2.54)$$

Avec une estimation initiale de la température de la flamme, T_{p1} , on évalue $H_p(T_{p1})$ à partir de tableaux tels que ceux de l'annexe 3. Si $H_p(T_{p1}) < H_R(T_R)$, on suppose une température de flamme plus élevée, T_{p2} . On répète ce processus jusqu'à ce que les deux températures les plus proches soient trouvées telles que $H_p(T_{f1}) < H_R(T_R) < H_p(T_{f2})$. La température des produits peut être estimée par **interpolation linéaire**.

Remarque :

Cette méthode est plus précise que la première mais elle suppose toujours une combustion complète.

Méthode 3: État d'équilibre (utilisation du logiciel libre : Cantera ou du logiciel commercial: Chemkin)

La dissociation¹ des produits à haute température ($T > 1500$ K à la pression ambiante) peut prendre une part importante de l'énergie de la combustion et donc la température du produit est inférieure à celle calculée avec uniquement des composants majeurs comme produits. L'état d'équilibre détermine les concentrations et la température des espèces sous certaines contraintes telles que l'enthalpie, la pression ou la température constantes. La température de flamme à l'équilibre devrait être inférieure aux températures estimées avec la méthode 1 ou la méthode 2. De plus, l'état d'équilibre chimique est souvent utilisé en génie de la combustion comme point de référence pour la **cinétique chimique** si un temps infini est disponible pour les réactions chimiques. Dans cet état idéal, les vitesses de réaction avant et arrière de toutes les étapes de réaction chimique sont équilibrées. En contraignant certaines variables telles que la pression constante et l'enthalpie, l'état d'équilibre chimique peut être déterminé en minimisant l'énergie

¹ La dissociation est la séparation de molécules plus grosses en molécules plus petites. Par exemple, $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.

libre de Gibbs, même sans connaissance de la cinétique chimique. Les programmes informatiques (tels que [STANJAN](#), [Chemkin](#), [Cantera](#)) sont préférés pour cette tâche, car les calculs manuels prennent du temps.

2.4.2 Travaux dirigés (section 2.4 Température de flamme adiabatique)

Voir série [TD 2.4](#)