

1 Analyse de la combustion isobare et adiabatique du C₂H₄

Considérons la combustion isobare et adiabatique d'éthène (C₂H₄) gazeux dans un système ouvert stationnaire avec un coefficient d'air théorique de 400%, les réactifs étant aux conditions normales. L'équation chimique générale de réaction devient dans ce cas particulier ($x = 2, y = 4, \lambda = 4$)



Les données thermodynamiques des réactifs et des produits aux conditions normales (d'entrée) sont données au tableau ci-dessous :

	C ₂ H ₄	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
M (kg/kmol)	28,054	31,999	28,013	44,01	18,015
\bar{h}_f^0 (kJ/kmol)	52 467	0	0	-393 522	-241 826
\bar{s}^0 (kJ/kmol·K)	219,330	205,148	191,609	213,794	188,835

1.1 Pouvoir calorifique isobare inférieur

Commençons par calculer le pouvoir calorifique isobare (inférieur puisque l'eau sera à l'état de vapeur) aux conditions standard

$$(\overline{\text{PCI}}) = \bar{h}_{f,\text{C}_2\text{H}_4}^0 - 2\bar{h}_{f,\text{CO}_2}^0 - 2\bar{h}_{f,\text{H}_2\text{O}}^0 = 1\,323\,163 \text{ kJ/kmol}$$

1.2 Travail réversible réalisable à partir des réactifs

Calculons à présent le travail réversible à partir des réactifs, obtenu en amenant les produits de combustion en équilibre de pression et de température avec l'ambiance (conditions normales). Comme les constituants sont chacun à leur pression partielle

de mélange, on calcule d'abord les entropies de chaque constituant à sa pression partielle. On trouve

	C ₂ H ₄	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
\bar{s}_R^0 (kJ/kmol·K)	253,109	218,267	193,713		
\bar{s}_P^0 (kJ/kmol·K)		220,659	193,713	241,810	216,851

et par conséquent

$$\begin{aligned}
 W_{\text{rev}}^* &= \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 - T_0 \bar{s})_e - \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 - T_0 \bar{s})_s \\
 &= (\overline{\text{PCI}}) - T_0 \left[\sum_R n_e \bar{s}_e - \sum_P n_s \bar{s}_s \right] = 1\,332\,387 \text{ kJ/kmol}
 \end{aligned}$$

qui est effectivement très proche du pouvoir calorifique, comme on l'a précédemment indiqué.

Il faut une fois encore insister que dans ces expressions, les produits de combustion

sont supposés ramenés à la température et à la pression ambiante !

1.3 Température à la sortie de la chambre de combustion

La température à la sortie de la chambre de combustion, qui n'est rien d'autre que la température adiabatique de flamme s'obtient par l'expression (13.7)

$$\begin{aligned} \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_s(T_{ad}) - \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_e &= \sum_P n_s \Delta \bar{h}_s(T_{ad}) - (\overline{PCI}) \\ &= [2\Delta \bar{h}_{CO_2} + 2\Delta \bar{h}_{H_2O} + 9\Delta \bar{h}_{O_2} + 45,1\Delta \bar{h}_{N_2}](T_{ad}) - (\overline{PCI}) = 0 \end{aligned}$$

Résolvant itérativement cette équation, on trouve $T_{ad} = 1016$ K. Remarquez que, avec l'hypothèse de gaz parfaits, la température de flamme ne dépend pas directement des pressions partielles des constituants.

1.4 Travail réversible et irréversibilité lors de la combustion

Le travail réversible et l'irréversibilité lors de la combustion réelle (produits sortant

à la température adiabatique de flamme) sont donnés par les relations (13.12–13.13).

$$\begin{aligned}
 W_{\text{rev, comb}}^* &= \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 - T_0 \bar{s})_e - \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 - T_0 \bar{s})_{s, T_{\text{ad}}} \\
 &= T_0 \left(\sum_P n_s \bar{s}_{s, T_{\text{ad}}} - \sum_R n_e \bar{s}_e \right) = I
 \end{aligned}$$

puisque aucun travail et aucune chaleur ne sont échangés lors de la combustion réelle !

Pour calculer ces grandeurs, il faut donc déterminer les entropies des produits à la température adiabatique de flamme. Consultants les tables thermodynamiques, on trouve, pour chacun des produits à sa pression partielle

	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
$\bar{s}_p^0(T_{\text{ad}})$ (kJ/kmol·K)	259,646	230,795	298,210	261,371

de sorte que

$$I = 672\,625 \text{ kJ/kmol}$$

c.-à-d. à peu près la moitié du travail réversible !

On vérifie ce résultat en calculant l'exergie des produits, c'est-à-dire le travail réversible qui reste réalisable en ramenant les produits de combustion à l'équilibre de pression et de température avec l'ambiance :

$$J_P = \sum_P n_s [(\bar{h}_s(T_{ad}) - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s}_s(T_{ad}) - \bar{s}_0)] = 659\,762 \text{ kJ/kmol} = W_{rev}^* - I$$

Par conséquent, si à la suite de la combustion adiabatique, on ramenait les produits à l'équilibre avec l'ambiance de manière réversible, le travail effectué ne serait qu'environ la moitié du travail qui pourrait être effectué si la combustion était réversible, et donc le rendement exergetique d'un moteur dans lequel se produirait cette combustion isobare ne pourrait dépasser 50 %.