

CHAPITRE 4: La Combustion

Présenté par: Dr. Hatem ELAMINE

La combustion par définition c'est une réaction chimique qui s'effectue entre deux substances avec comme résultats un dégagement de chaleur et de la lumière. C'est une réaction chimique exothermique (réaction d'oxydation) d'une substance dit combustible (solide, liquide ou gaz) avec un gaz dit comburant (souvent l'Oxygène), voir (figure).

Lors de la combustion, Il y a rupture des liaisons des molécules du combustible, et recombinaison avec les molécules du comburant pour obtenir des molécules plus « stables » (CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2). Cette réaction nécessite une énergie d'activation (une étincelle, une flamme, ...etc.).

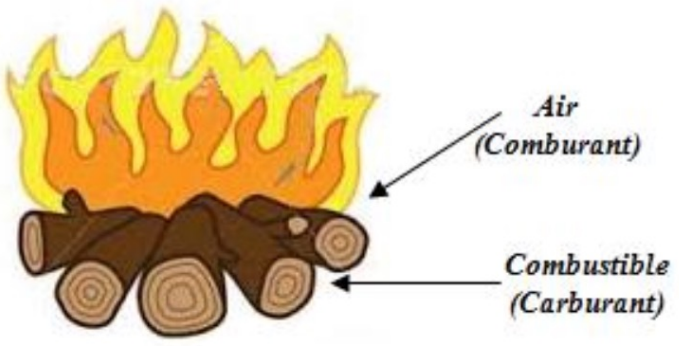


Figure La combustion

La combustion ou l'inflammation d'une substance (combustible) avec un gaz (comburant) ne peut être obtenue qu'à partir d'une température minimale dite température d'auto-inflammation. Soit par un échauffement local du mélange gazeux par une source d'allumage (étincelle par exemple). La température d'auto-inflammation d'un combustible, c'est la température minimale pour laquelle un mélange combustible, de pression et de composition données, s'enflamme spontanément sans contact avec une flamme.

Dans les moteurs à essence, l'allumage est contrôlé par les bougies (étincelle). Le super carburant à une température d'auto-inflammation élevée. Dans un moteur diesel, la compression élevée du mélange gazole-air suffit à atteindre la température d'auto-inflammation.

Les combustibles

1. Définition :

Le combustible peut être solide, liquide ou gazeux, est, le plus souvent, composé de carbone et d'hydrogène. Les éléments oxygène, azote sont souvent présents également. La présence d'une flamme indique que l'on a une vapeur combustible (fumée); le combustible qu'il soit solide, liquide ou gaz est d'abord vaporisé avant d'être brûlé. Les matières minérales incombustibles se retrouvent dans les cendres.

Exemples : essence, gasoil, GPL, méthane, butane, propane, alcool,

2. Les types de combustibles

On distingue :

a) Les combustibles fossiles : Issus de matières organiques préhistoriques fossilisées. On cite: le pétrole, le gaz, le charbon...etc. Ces combustibles ne sont pas renouvelables.

b) Les biocombustibles : Issus de végétations, tel que : biocarburants liquides, copeaux et granulés de bois, céréales et autres formes de la biomasse...

3. Le comburant : c'est le gaz dans lequel se tiendra la combustion. Dans les applications industrielles, le comburant est souvent, le dioxygène (O_2) contenu dans l'air.

Les caractéristiques techniques des combustibles

Les caractéristiques techniques d'un combustible industriel sont les suivantes :

- La composition chimique (nature) ;
- Le pouvoir calorifique, qui définit la capacité calorifique du combustible.

La composition d'un combustible :

La composition des combustibles communs est donnée dans le [Tableau 1](#), comme suit :

| | Combustibles Solides | Combustibles Liquides | Combustibles Gaz Hydrocarbures |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| Combustibles communs | Charbons, Bois, ... | Essence, gasoil, fiouls, ... | Gaz naturel, butane, propane, gaz de ville, ... |
| Constituants | <i>C, H₂O, Cendres</i> | <i>C, H₂, S, O, N</i> | <i>C_nH_m, N₂, CO₂</i> |

La composition de masse pour les combustibles solides et liquides peut être exprimée par les relations suivantes :

- Masse totale :

$$C^t + H^t + S_V^t + O^t + A^t + W^t = 100\%$$

- Masse combustible :

$$C^c + H^c + S_V^c + N^c + O^c = 100\%$$

- Masse sèche :

$$C^s + H^s + S_V^s + N^s + O^s + A = 100\%$$

Des relations reliant les différentes masses sont regroupées dans la [table](#) ci-dessous.

| | <i>Masse totale</i> | <i>Masse combustible</i> | <i>Masse sèche</i> |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| <i>Masse totale</i> | 100% | $\frac{100}{100 - (A^t + W^t)}$ | $\frac{100}{100 - W^t}$ |
| <i>Masse combustible</i> | $\frac{100 - (A^t + W^t)}{100}$ | 100% | $\frac{100 - A^s}{100}$ |
| <i>Masse sèche</i> | $\frac{100 - W^t}{100}$ | $\frac{100}{100 - A^s}$ | 100% |

Pour les pyrochistes de composition (C, H, S_V, N, O) , le calcul de la masse totale à la masse combustible est donné par le coefficient k , suivant :

$$k = \frac{100}{100 - A_{vr}^t - W^t - (CO_2)_c^t}$$

Où :

A_{vr}^t : est la portion vraie des cendres, avec :

$$A_{vr}^t = A^t - (2 \div 4,1) \left(\frac{100 - W^t}{100} \right)$$

$(CO_2)_c^t$: est la fraction des carbonates, en %%

W^t : est l'humidité

La composition moyenne du mélange de deux combustibles est donnée par les expressions suivantes :

$$C_m^t = \beta.C_1^t + (1-\beta).C_2^t \text{ en } [\%]$$

$$H_m^t = \beta.H_1^t + (1-\beta).H_2^t \text{ en } [\%]$$

.....

Où, β : est une fraction de masse d'un combustible constituant le mélange, où :

$$\beta = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

Avec, m_1 et m_2 sont les masses des éléments combustibles constituant le mélange.

Le pouvoir calorifique d'un combustible :

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible (soit 1 kg pour un combustible solide ou liquide ou 1 m^3

- volume mesuré dans les conditions normales - pour les gaz), le combustible et le comburant étant à 0°C et les produits de la combustion étant ramenés à 0°C . Le pouvoir calorifique d'un combustible gazeux s'exprime souvent en kWh.m^3 .

Les produits de combustion

Les produits issus de combustion sont composés des deux catégories regroupées dans le [Tableau 3](#).

Tableau 3. Les produits de combustion

| Produits essentielles | Produits éventuels |
|---|--|
| CO₂ : Dioxyde de carbone | O₂ : dioxygène |
| H₂O : Vapeur d'eau | CO : Monoxyde de carbone |
| SO₂ : Anhydride sulfureux : | NO_x : Oxydes d'Azote |
| N₂ : Azote | H₂ : Hydrogène libre |
| | Imbrûlés solides ou gazeux |

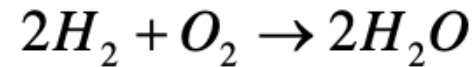
La présence et le taux (%) de ces produits de combustion permettent de:

1. Déterminer le type de combustion,
2. Voir les risques éventuels qui peuvent se présenter pour les personnes ainsi que pour les équipements,
3. Évaluer les taux de pollutions atmosphériques
4. Contribuer à l'optimisation des paramètres de combustion.

Equations de combustion

La combustion du carbone C , de l'hydrogène H et du soufre S donne lieu aux équations chimiques de base suivantes :

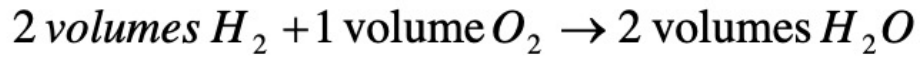
1. Combustion de l'hydrogène :



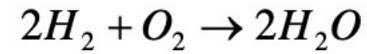
L'équation ci-dessus, montre que :

(i) l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former l'eau ou la vapeur d'eau,

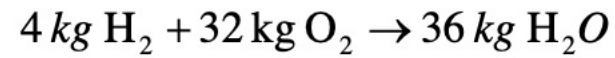
(ii) deux molécules d'hydrogène réagissent avec une molécule d'oxygène pour donner deux molécules d'eau ou de vapeur d'eau.



En terme massique, on :

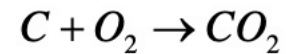


$$2.(2x1) + 2x(2x8) \rightarrow 2.(2x1 + 16)$$

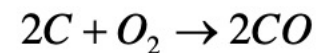


2. Combustion du carbone :

(i) combustion complète :



(ii) combustion incomplète :



Pouvoirs calorifiques

1. Définition

Le pouvoir calorifique d'un combustible (PC) est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kg de combustible solide ou liquide ou de 1 Nm^3 de combustible gazeux. La combustion se produit sous la pression atmosphérique normale et la température de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. L'unité du pouvoir calorifique est: [kJ/kg de combustible] ou [kJ/m^3 de combustible].

Le pouvoir calorifique d'un combustible peut être calculé à partir de sa composition chimique en se servant des chaleurs de combustion ou par les voies d'expérience. On distingue deux types :

2. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)

C'est quand l'eau résultant de la combustion de l'hydrogène et des hydrocarbures est supposée à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

3. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

C'est quand l'eau résultant de la combustion est ramenée à l'état liquide dans les fumées.

4. Relation entre PCI et PCS

La différence entre PCS et PCI demeure dans la chaleur de condensation de l'eau contenue dans les fumées.

$$PCS - PCI = m_{H_2O} \cdot L$$

Avec, L : la chaleur latente de vaporisation de l'eau (soit : $L = 2258 \text{ kJ/kg}$).

5. Détermination du pouvoir calorifique

D'après DULONG, le pouvoir calorifique (PC) peut être calculé approximativement par la formule suivante :

1. Pouvoir calorifique supérieur PCS :

$$PCS = 8080.C + 34450(H - O/8) + 2250.S \quad \text{en [Kcal/kg]}$$

2. Pouvoir calorifique inférieur PCI :

$$PCI = 8080.C + 28924(H - O/8) + 2250.S \quad \text{en [kcal/kg]}$$

Avec, C , H , O et S sont les masses de carbone, hydrogène, oxygène et soufre mis en combustion respectivement.

Pouvoir comburivore

C'est la quantité d'air exacte (suffisante) pour assurer une combustion complète de l'unité de combustible. Il est désigné par V_a et son unité c'est [m^3 d'air/kg de combustible] ou [m^3 d'air/ m^3 de combustible] ou même [kg d'air/kg de combustible].

Le pouvoir comburivore est exprimé par la relation suivante :

$$V_a = V_{O_2} + V_{N_2}$$

Avec : V_{O_2} : Volume d'oxygène nécessaire

V_{N_2} : Volume d'azote

Il est exprimé aussi sous forme de rapport comme suit :

$$V_a = \frac{V_{O_2}}{\% \text{ en Volume de } O_2 \text{ dans l'air}} = \frac{V_{O_2}}{0,21}$$

En écrivant les réactions de combustion et en remarquant que l'azote N_2 ne s'oxyde pas aux températures où a lieu la combustion (se comporte comme un corps neutre), on détermine le pouvoir comburivore A_a :

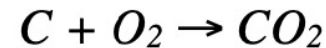
$$V_a = \frac{1}{23} \left[\frac{8}{3} C + 8H + S - O \right]$$

C , H , S et O représentent les teneurs en % du combustible en carbone, en hydrogène, en soufre et en oxygène.

6.14. Composition des fumées

Cherchons à titre d'exemple la teneur en CO₂ dans les fumées.

Le CO₂ provient de la réaction :



La combustion d'une mole de carbone C (12 g) libère 1 mole de CO₂ (12 + 2x16 = 44g).

La combustion de 1 kg de combustible contenant 825 g de carbone libère donc :

$$\frac{44 \times 825}{12} = 3,025 \text{ kg de } CO_2$$

La teneur en CO₂ des fumées est : $\frac{3,025 \times 100}{14,65} = 20,65\%$

Cette teneur permet de contrôler la combustion, à savoir si la combustion est complète ou incomplète.

Température de combustion

C'est la température à laquelle sont portés les produits de combustion, voir (fig). Dans le cas d'une combustion complète s'effectuant dans les conditions théoriques, cette température est dite *température théorique de combustion*, désignée par T_{th} .

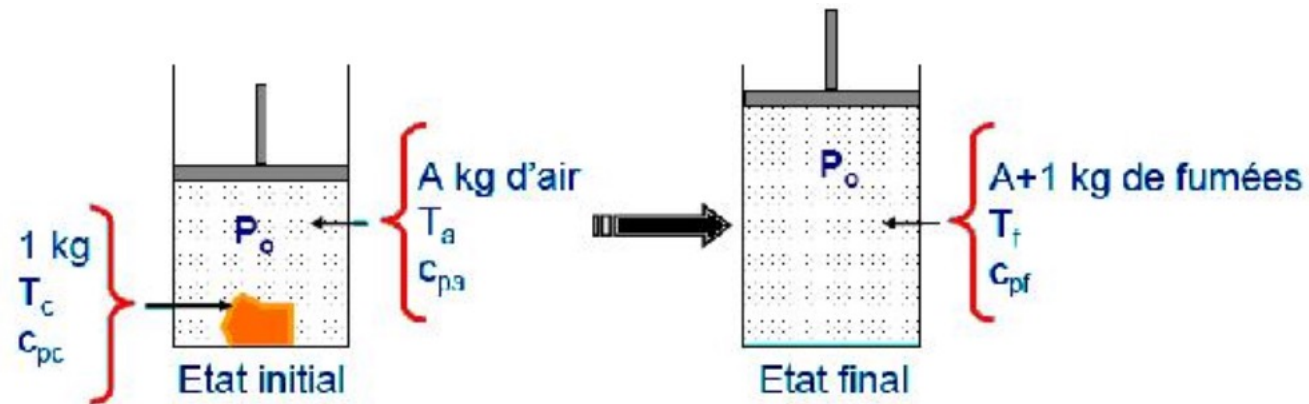


Figure Processus de combustion

En pratique, plusieurs facteurs influent cette température théorique de sorte que la **température effective** (pratique) **de combustion** T est toujours inférieure à T_{th} . Pour le calcul de la température théorique de combustion, on considère une combustion fictive possédant les mêmes états initial et final que la combustion étudiée et qui s'effectue à pression constante par exemple.

- le combustible et le comburant sont refroidis à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- la combustion est effectuée à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- les produits de combustion sont réchauffés de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $T\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La combustion fictive dégage la même quantité de chaleur que la combustion effective, en définitif, que la chaleur totale libérée est la somme de :

1. la chaleur sensible du combustible brûlé :

$$Q_c = c_c T_1$$

2. la chaleur sensible du comburant (air) de combustion:

$$Q_a = V_a' \cdot c_a \cdot T_2$$

3. la chaleur dégagée par la combustion :

C'est la chaleur sensible des fumées, Q_f .

Si la combustion porte sur l'unité de combustible (1 kg ou 1 Nm^3), Q_f ce n'est rien que le pouvoir calorifique inférieur **PCI**, et la relation donnant la température de combustion T est défini par :

$$T = \frac{PCI + Q_C + Q_a}{V_f' \cdot c_f} = \frac{PCI + c_C T_1 + V_a' \cdot c_a T_2}{V_f' \cdot c_f}$$

Où, V_f' : est le volume total de fumées humides de combustion,

c_f : la chaleur volumique des fumées humides de combustion entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T \text{ }^\circ\text{C}$.

Enthalpie standard de réaction

La chaleur de réaction ou enthalpie de réaction notée Δh_0 , et est définie pour des conditions de référence p_0 et T_0 qui sont en général les valeurs standards :

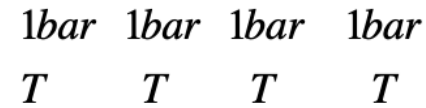
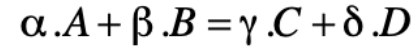
$$- p_0 = 1 \text{ atm} \approx 1,01325 \text{ bar} = 101325 \text{ Pascal.}$$

$$- T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K.}$$

Les grandeurs molaires ou massiques sont reliées par :

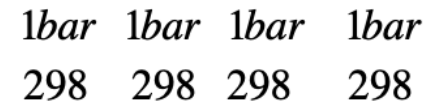
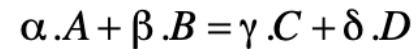
$$\Delta H_0 = M \Delta h_0$$

A une température T , l'**enthalpie standard de réaction** associée à l'équation-bilan ci-dessous est égale à la variation d'enthalpie au cours de la réaction fictive où A et B , supposés purs et isolés sous 1 bar à la température T , sont transformés en C et D , supposés purs et isolés sous 1 bar à la température T .



Cette réaction hypothétique est la réaction standard à la température T . L'enthalpie standard de réaction est notée : $\Delta_r H_0(T)$

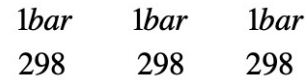
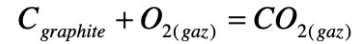
En particulier à 298 K , température prise en compte pour le calcul et la publication des données thermodynamiques. Dans ces conditions :



La variation d'enthalpie accompagnant cette réaction hypothétique est **l'enthalpie standard de réaction à 298 K**. Notée $\Delta_r H_0(298)$ où simplement $\Delta_r H_0$.

Enthalpie molaire standard de formation à 298 K.

Considérons la réaction fictive (équation-bilan ci-dessous) où *1 mole* du composé CO_2 dans son état standard à 298 K est formé à partir des corps purs qui le constituent (carbone et oxygène), supposés purs et isolés dans leur état standard à 298 K :



C'est la **réaction standard de formation** de CO_2 à 298 K. La variation d'enthalpie accompagnant cette réaction est l'**enthalpie molaire standard de formation** : Notée $\Delta_f H_0(CO_2)$ à 298 K.

La variation d'enthalpie de la réaction étant égale à :

$$\Delta_f H_0(CO_2) = H_0(CO_2)_{\text{gaz}} - [H_0(C)_{\text{graphite}} + H_0(O_2)_{\text{gaz}}] = H_0(CO_2)_{\text{gaz}}$$

L'enthalpie molaire standard de formation d'un corps pur composé est la variation d'enthalpie qui accompagne la formation d'une mole de ce composé dans son état standard, à partir des corps purs simples qui le constituent, également pris dans leur état standard.

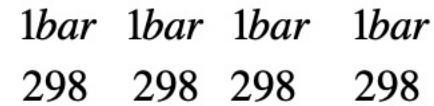
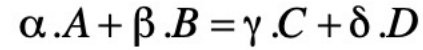
Les valeurs des $\Delta_f H_0$ à $T=298$ K sont disponibles dans les tables de données thermodynamiques.

Exemple :

$$\Delta_f H_0(CO_2) = -393,1 \text{ KJ.mol}^{-1} \text{ à } 298 \text{ K.}$$

Calcul des enthalpies standard de réaction

Pour une réaction standard à 298 K :



L'enthalpie standard de réaction est calculée de la sorte suivante :

$$\Delta_r H_0 = [\gamma H_0(C) + \delta H_0(D)] - [\alpha H_0(A) + \beta H_0(B)]$$

Etant donnée que : $H_0(A) = \Delta_f H_0(A)$

$$H_0(B) = \Delta_f H_0(B)$$

$$H_0(C) = \Delta_f H_0(C)$$

$$H_0(D) = \Delta_f H_0(D)$$

$$\Delta_r H_0 = [\gamma \Delta_f H_0(C) + \delta \Delta_f H_0(D)] - [\alpha \Delta_f H_0(A) + \beta \Delta_f H_0(B)]$$