

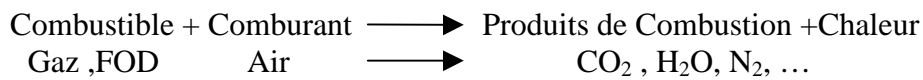
Le chapitre qui suit provient d'un cours écrit par M Thierry CHASSAIN de l'Université Paul SABATIER de TOULOUSE.....

COMBUSTION

I GENERALITES

1) Définition

La combustion est une réaction chimique d'oxydation *exothermique* :



2) Nature et composition

Le comburant est l'air atmosphérique dont la composition est la suivante :

Oxygène : **O₂** Dioxyde de carbone : **CO₂**
 Azote : **N₂** Gaz rares : **Néon, Krypton...**

En combustion, pour déterminer les quantités d'air théoriques, on utilise les pourcentages suivants :

	% en Masse	% en Volume
O₂	24	21
N₂	76	79

La composition générale des combustibles courants est donnée ci-dessous. On y distingue les combustibles suivants accompagnés de leurs compositions générales :

	SOLIDE	LIQUIDE	GAZ Hydrocarbures
Constituants	C, H ₂ O, Cendres	C ; H ₂ ; S	Mélanges C _n H _m , N ₂ , CO ₂
Combustibles courants	Charbons, Anthracites, Bois	FOD Fiouls Lourds n°1 et 2	Gaz naturels, Butane et Propane commerciaux, Air propané

Pour les combustibles gazeux (il s'agit des % en volume) :

	LACQ	GRONINGUE	SAHARA, LE HAVRE	MER DU NORD	URSS
C H₄ %	97.3	82.9	87	88.6	92.3
C₂ H₆ %	2.1	3.2	9.4	4.6	3.2
C₃ H₈ %	0.2	0.6	2.6	1.1	0.8
C₄ H₁₀ %	0.1	0.2	0.6	0.3	0.2
C₅ H₁₂ %		0.1		0.1	0.1
CO₂ %		1		1.4	0.4
N₂ %	0.3	12	0.4	3.9	3
ρ (kg/m³) mass. vol.	0.74	0.83	0.82	0.81	0.78

Pour les combustibles liquides (il s'agit des % en masse) :

	C %	S %	H %	O %	N %
Fiouls domestiques (FOD)	84.3	0.5	12.4	2	0.8
Fiouls lourds n°1	85	2	11.5	0.7	0.8
Fiouls Lourds n°2	85	2.5	11	0.7	0.8

Les produits de combustion (fumées) sont constitués de :

<u>Principalement :</u>	<u>Eventuellement :</u>
1. Dioxyde de carbone : CO₂	5. dioxygène : O₂
2. Anhydride sulfureux : SO₂	6. Monoxyde de carbone : CO
3. Vapeur d'eau : H₂O	7. NO _x : NO, NO₂
4. Azote : N₂	8. Hydrogène libre : H₂
	9. Imbrûlés solides ou gazeux

La présence et le pourcentage de ces constituants présents dans les produits de combustion permettront :

- a) De définir le type de combustion
- b) D'envisager les risques potentiels :
 - d'asphyxie pour les personnes
 - de corrosion du matériel (chaudière, conduit de fumées)
 - de pollutions atmosphériques
- c) D'affiner les réglages du brûleur et d'améliorer les rendements.

Compléments sur les NO_x :

Ils ne sont pas pris en compte dans les équations de combustion classique, et sont à l'origine des pluies acides par formation d'acide nitrique. Dans les chaudières conventionnelles se dégagent exclusivement du NO, le NO₂ se formant grâce à l'oxygène ambiant en sortie de cheminée.

On distingue trois mécanismes de formation de NO :

- le NO *primaire* (prompt NO_x) formé par réaction de l'oxygène libre présent dans l'excès d'air.
- le NO *combustible* dû à la présence d'azote organique dans le combustible (*fuels et charbons*) et à l'oxygène si la température de combustion dépasse 1000°C.
- le NO *thermique* est prédominant dans les chaudières gaz et fuels, sa formation est lié à la concentration d'oxygène et à la durée de passage de l'air comburant dans la zone de flamme où la température dépasse 1200°C (600 ppm à 1600°C).

De nouvelles technologies sur les brûleurs gaz, annihilant quasiment la flamme (*brûleur hémisphérique radiant MATRIX de VIESMANN*), ou les brûleurs à flamme bleue avec vaporisation du fuel et recirculation des fumées sur la flamme contribuent à une très forte réduction des NO_x.

3) Les différents types de combustion

La combustion est **complète** si la totalité du combustible est oxydée. A contrario elle est **incomplète** s'il y a présence de combustible dans les fumées.

La combustion est dite *stœchiométrique, neutre* ou *théorique* si l'air comburant est en quantité suffisante et strictement nécessaire à la combustion complète de l'unité de combustible. Les fumées ne contiennent pas d'oxygène.

La combustion est *oxydante* ou *en excès d'air* si une partie de l'air comburant est utilisé pour l'oxydation du combustible, l'autre partie se retrouvant dans les fumées.

La combustion est dite *réductrice* ou *en défaut d'air* si le volume d'air admis pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique ; l'oxygène y est néanmoins totalement utilisé donc pas de présence d'O₂ dans les fumées, mais il y a formation de monoxyde de carbone (CO).

4) Physico-chimie de la combustion

a- *Nombre de moles - Masse Molaire - Volume Molaire :*

Relations	Désignations	Unités
$n = \frac{m}{M}$	n : Nombre de moles m : Masse du corps M : Masse molaire du corps	mol ou kmol g ou kg g/mol ou kg/kmol
$n = \frac{V}{V_m}$	n : Nombre de moles V : Volume du corps V _m : Volume molaire du corps	mol ou kmol L ou m ³ L/mol ou m ³ /kmol

A 0°C, sous la pression atmosphérique normale de 101325Pa, le volume molaire des gaz est égal à :

$$V_m = 22.4 \text{ litres/mol} \quad \text{ou} \quad V_m = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

b- *Caractéristiques chimiques des composants*

CORPS	SYMBOLE	MASSE MOLAIRE	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES
OXYGENE	O ₂	32 g/mol	Densité de 1,1 c'est un agent actif de la combustion, qui est incolore, inodore et sans saveur
AZOTE	N ₂	28 g/mol	Densité de 0.97 c'est un gaz neutre inodore, incolore et sans saveur
AIR		28.9 g/mol	Densité de 1 Air atmosphérique
HYDROGENE	H	1 g/mol	Densité de 0.07, il est présent dans tous les combustibles
CARBONE	C	12 g/mol	Etat solide (bois – charbon), état liquide ou gazeux (hydrocarbures)
SOUFRE	S	32 g/mol	Densité de 2.85 corps solide de couleur jaune
GAZ CARBONIQUE	CO ₂	44 g/mol	Densité de 1.5 Inodore, saveur acide odeur piquante
MONOXYDE DE CARBONE	CO	28 g/mol	Densité de 0.97 il est dangereux car toxique, incolore, inodore et sans saveur
VAPEUR D'EAU	H ₂ O	18 g/mol	Présence sous forme liquide ou gazeuse

c- *Equations chimiques élémentaires*

Combustion (ou oxydation) du carbone :

	C	+	O₂	→	CO₂	+	Chaleur [kJ]
[kmol]	1		1		1	+	394.10 ³
[kg]	12		32		44		
[m ³]	---		22.4		22.4		

Combustion (ou oxydation) du soufre :

	S	+	O₂	→	SO₂	+	Chaleur [kJ]
[kmol]	1		1		1	+	320.10 ³
[kg]	32		32		64		
[m ³]	---		22.4		22.4		

Combustion (ou oxydation) du monoxyde de carbone :

	CO	+	½ O₂	→	CO₂	+	Chaleur [kJ]
[kmol]	1		½		1	+	284.10 ³
[kg]	28		16		44		
[m ³]	22.4		11.2		22.4		

Combustion (ou oxydation) de l'hydrogène :

	H₂	+	½ O₂	→	H₂O	+	Chaleur [kJ]
[kmol]	1		½		1	+	288.10 ³ /PCS
[kg]	2		16		18		
[m ³]	22.4		11.2		22.4		

Combustion (ou oxydation) des hydrocarbures :

	C_nH_m	+	(n+m/4) O₂	→	nCO₂	+	(m/2)H₂O
[kmol]	1		n+m/4		n	+	m/2
[kg]	12n+m		32(n+m/4)		44n		9m
[m ³]	22.4		22.4(n+m/4)		22.4n		22.4(m/2)

5) Les pouvoirs calorifiques

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

→ Notation : **PC**

→ Unité : **[kJ/kg(n) de combustible]** ou **[kJ/m³(n) de combustible]**

→ Remarque : (n) signifie que toutes les réactions se produisent dans les conditions normales de température et de pression.

Le pouvoir calorifique est dit *inférieur (PCI)* 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.

Le pouvoir calorifique est *supérieur (PCS)* quand cette eau de combustion est ramenée à l'état liquide dans les fumées.

En notant « L » la chaleur latente de vaporisation de l'eau (soit L = 2258 kJ/kg)

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

Pour tous les gaz naturels, riches en méthane, on trouve sensiblement la relation :

$$PCS \approx 1,1 \cdot PCI$$

Pouvoirs calorifiques, masse volumique et densité des combustibles gazeux :

NATURE DU GAZ	POUVOIR CALORIFIQUE		Masse volumique normale	densité	POUVOIR CALORIFIQUE PAR UNITE DE MASSE		RAPPORT $\frac{PCI}{PCS}$
	SUPERIEUR En MJ/m ³ (n)	INFERIEUR En MJ/m ³ (n)			Kg/m ³ (n)	SUPERIEUR En MJ/m ³ (n)	
Lacq	40,6	36,6	0,74	0,57	55,1	49,6	0,90
Algérie (Le Havre)	44,7	40,3	0,82	0,64	54,3	49,0	0,90
Algérie (Fos)	42,3	38,1	0,78	0,60	54,2	48,8	0,90
Algérie (Montoir)	44,5	40,1	0,82	0,64	54,0	48,7	0,90
Mer du Nord	40,2	36,2	0,78	0,60	49,8	44,9	0,90
U.R.S.S.	40,3	36,3	0,82	0,64	52,0	47,3	0,90
Groningue	36,3	32,7	0,83	0,64	43,9	39,5	0,90
Propane commercial	99	91,4	1,98	1,53	50,0	46,1	0,92
Butane commercial	128,4	118,7	2,60	2,00	49,4	45,7	0,92
Air propané à 27 MJ/m ³ (n)	27	24,9	1,47	1,14	Grandeurs non utilisées dans la pratique pour les mélanges AIR - GPL		0,92
Air propané à 56,1 MJ/m ³ (n)	56,1	51,8	1,68	1,30			0,92
Air butané à 26,3 MJ/m ³ (n)	26,3	24,3	1,55	1,20			0,92
Gaz de cokerie à 19,9 MJ/m ³ (n)	19,9	17,7	0,56	0,44	35,2	31,3	0,89

II LA COMBUSTION NEUTRE

1) Définition

Afin d'obtenir la combustion totale de l'unité d'un combustible (1 kg ou 1 m³), l'air comburant doit être en quantité suffisante et strictement nécessaire. Cette combustion est **complète** : il n'y a pas de présence d'oxygène dans les fumées.

On appelle *caractéristiques stœchiométriques* les caractéristiques spécifiques de la combustion neutre d'un combustible dans les conditions normales de température et de pression, soit :

- Le **POUVOIR COMBURIVORE** : quantité d'air théorique
- le **POUVOIR FUMIGENE** : quantité de fumées produites
- Le **volume de CO₂ produit**
- Le **volume de H₂O produit**
- Le **volume de N₂ présent**

2) Le pouvoir comburivore

Il désigne la quantité d'air strictement nécessaire et suffisante qu'il faut fournir pour assurer la combustion neutre de l'unité de combustible.

Notation : V_a
Unités : [m³_(n) d'air / m³_(n) de combustible]
[m³_(n) d'air / kg_(n) de combustible]
[kg_(n) d'air / m³_(n) de combustible]
[kg_(n) d'air / kg_(n) de combustible]

Relation :

$$V_a \equiv V_{O_2} \pm V_{N_2}$$

Avec : V_{O_2} = Volume d'oxygène nécessaire
 V_{N_2} = Volume d'azote

$$V_a \equiv \frac{V_{O_2}}{\% O_2 \text{ en volume dans l'air}} \equiv \frac{V_{N_2}}{\% N_2 \text{ en volume dans l'air}}$$

$$V_a \equiv \frac{V_{O_2}}{0.21} \equiv \frac{V_{N_2}}{0.79}$$

3) Les pouvoirs fumigènes

C'est la quantité de fumées qui résulte de la combustion neutre de l'unité de combustible.

Il existe deux types de pouvoirs fumigènes :

- Le pouvoir fumigène SEC
- Le pouvoir fumigène HUMIDE

Notation :- Pouvoir fumigène SEC : Vf_o
 Pouvoir fumigène HUMIDE : Vf'_o

Unités : $[m^3_{(n)} \text{ de fumées (sec ou humide)} / m^3_{(n)} \text{ de combustible}]$
 $[m^3_{(n)} \text{ de fumées (sec ou humide)} / kg_{(n)} \text{ de combustible}]$
 $[kg_{(n)} \text{ de fumées (sec ou humide)} / m^3_{(n)} \text{ de combustible}]$
 $[kg_{(n)} \text{ de fumées (sec ou humide)} / kg_{(n)} \text{ de combustible}]$

	Pouvoir Fumigène SEC	Pouvoir Fumigène HUMIDE
En volume :	$V_{fO} \equiv V_{N_2} \pm V_{CO_2}$	$V_{f'O} \equiv V_{N_2} \pm V_{CO_2} \pm V_{H_2O}$
En masse :	$V_{fO} \equiv m_{N_2} \pm m_{CO_2}$	$V_{f'O} \equiv m_{N_2} \pm m_{CO_2} \pm m_{H_2O}$

4) Les proportions des constituants

Elles représentent le rapport entre la quantité du constituant choisi et la quantité totale des fumées, découlant de la combustion neutre de l'unité de combustible. Ayant deux pouvoirs fumigènes, on définira donc, pour chaque constituant, deux pourcentages.

Pourcentages de CO_2 :

Notation : γ_{CO_2}

Unité : [%]

Relations :

$$\gamma_{CO_2} \equiv \frac{V_{CO_2}}{V_{fO}} \times 100 \quad \text{et} \quad \gamma'_{CO_2} \equiv \frac{V_{CO_2}}{V_{f'O}} \times 100$$

Pourcentages de O_2 :

Notation : γ_{O_2}

Unité : [%]

Relations :

$$\gamma_{O_2} \equiv \frac{V_{O_2}}{V_{fO}} \times 100 \equiv 0 \quad \text{et} \quad \gamma'_{O_2} \equiv \frac{V_{O_2}}{V_{f'O}} \times 100 \equiv 0$$

Dans la combustion neutre il n'y a pas présence d'oxygène dans les fumées ! ! ! !

Pourcentages de N_2 :

Notation : γ_{N_2}

Unité : [%]

Relations :

$$\gamma_{N_2} \equiv \frac{V_{N_2}}{V_{fO}} \times 100 \quad \text{et} \quad \gamma'_{N_2} \equiv \frac{V_{N_2}}{V_{f'O}} \times 100$$

Pourcentages de H_2O :

Notation : γ_{H_2O}

Unité : [%]

Relations :

$$\gamma'_{H_2O} \equiv \frac{V_{H_2O}}{V_{f'O}} \times 100$$

III LA COMBUSTION REELLE

1) Définition

La combustion stœchiométrique est la base des calculs théorique en combustion. Les analyses réalisées ou les résultats fournis d'une combustion réelle, d'un combustible de composition connue, vont permettre de la définir précisément, par comparaison avec les résultats de la combustion neutre. Ainsi, par rapport à la théorie, on pourra définir :

- La combustion en excès d'air
- La combustion en défaut d'air

En pratique, c'est l'analyse des fumées sur site qui donnera les renseignements techniques nécessaires à la définition de la combustion réelle.

2) La combustion en excès d'air

On parlera de « combustion en excès d'air » chaque fois que l'on détectera la présence d'oxygène dans les produits de combustion. L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur (*brûleur à air soufflé*), soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air (*brûleur atmosphérique*). Cette quantité supplémentaire, non utilisé dans la combustion complète de l'unité de combustible, se retrouvera inéluctablement dans les fumées.

L'air en excès impliquera :

- une augmentation des pertes par les fumées,
- une diminution du rendement de la chaudière.

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques sur une saison de chauffe (consommation de combustible plus importante), qui restent non négligeables même pour de petites puissances de chaudières.

L'air en excès, un mauvais réglage du brûleur et la présence d'eau condensée dans les fumées peuvent entraîner la présence d'éléments tels que les NO_x, SO₃ (formation d'acides sulfurique et nitrique provoquant la corrosion de la chaudière et du conduit de fumées) ainsi que du monoxyde de carbone toxique dans le cas d'une combustion incomplète.

On caractérise l'air en excès par le *facteur d'air Fa* ou *taux d'aération n* en utilisant la relation suivante :

$$n = \frac{\text{Volume d'air réellement admis au brûleur}}{\text{Volume d'air théorique}} \quad \text{soit} \quad n \equiv \frac{V_a + \text{VEA}}{V_a}$$

Avec : V_a : Pouvoir comburivore [m³_(n) d'air / unité de combustible]
VEA : Volume d'air en excès [m³_(n) d'air en excès / unité de combustible]

Nota. : Généralement « n » est fourni par les relevés réalisés sur site à l'aide d'analyseurs de fumées.

$$\text{VEA} \equiv V_a \times (n - 1)$$

Pourcentage d'excès d'air **EA%** :

$$\text{EA}\% = (n-1)/100$$

3) Le volume des fumées

Il représente le pouvoir fumigène sec ou humide augmenté du volume d'excès d'air.

- Notation : **VF**
- Unité : $[m^3_{(n)} \text{ fumées} / m^3_{(n)} \text{ de combustible}]$
 $[m^3_{(n)} \text{ fumées} / \text{kg de combustible}]$

On distinguera :
 Le volume des fumées Sèches $\frac{VF_S}{VF_H}$
 Le volume des fumées Humides $\frac{VF_S}{VF_H}$

$$\begin{aligned} VF_S &= Vf_0 + VEA \\ VF_S &= Vf_0 + Va_{(n-1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VF_H &= Vf'_0 + VEA \\ VF_H &= Vf'_0 + Va_{(n-1)} \end{aligned}$$

En pratique (relevés sur site) il est impossible de mesurer le volume d'air en excès. On utilisera donc un autre paramètre, en supposant la combustion **complète** : Le γ_{CO_2} mesuré (à l'aide d'analyseurs).

Combustion neutre	Combustion réelle
$\gamma_{CO_2 \text{ maxi}} = \frac{VCO_2}{Vf_0} \times 100$	$\gamma_{CO_2 \text{ mesuré}} = \frac{VCO_2}{VF_S} \times 100$
	$VF_S = \frac{VCO_2}{\gamma_{CO_2 \text{ mesuré}}} \times 100$
	$VEA = VF_S - Vf_0$

4) Influence de l'excès d'air

Avant de pouvoir montrer l'influence de l'excès d'air sur le rendement de la chaudière, nous allons nous intéresser, à son influence sur les pourcentages des différents constituants dans les fumées.

$\gamma_{CO_2} = f(n)$:

Mise en équation $\gamma_{CO_2} = \frac{VCO_2}{VF_S} \times 100$

Avec : $VF_S = Vf_0 + VEA$

$$\gamma_{CO_2} = \frac{VCO_2}{Vf_0 + Va_{(n-1)}} \times 100$$

$\gamma_{O_2} = f(n)$:

Mise en équation $\gamma_{O_2} = \frac{VO_2 \text{ en excès}}{VF_S} \times 100$

Avec : $VF_S = Vf_0 + VEA$ $VEA = Va_{(n-1)}$
 $VO_2 \text{ en excès} = 0.21 \times Va_{(n-1)}$

D'où :

$$\gamma_{O_2} = \frac{0.21 \times Va_{(n-1)}}{Vf_0 + Va_{(n-1)}} \times 100$$

5) Le diagramme d'Ostwald

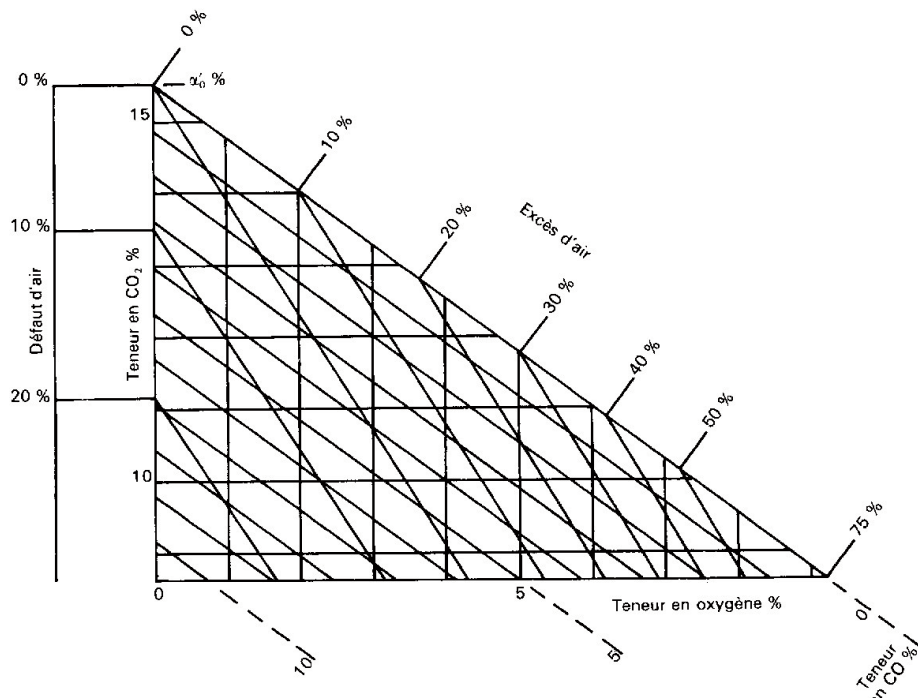
Il permet d'obtenir en fonction du λ CO₂ mesuré et du λ O₂ mesuré :

1. Le type de combustion réelle
2. Le % d'excès d'air ou de défaut d'air
3. Le λ CO (s'il y a lieu)

Il est défini pour un combustible donné, l'axe des abscisses représente le λ O₂ et celui des ordonnées représente le λ CO₂. Il comporte en général :

- La droite des combustions oxydantes (λ CO = 0%) graduée en excès d'air,
- Une graduation en défaut d'air sur l'axe vertical (λ O₂ 0%),
- Le point représentatif de la combustion neutre (λ O₂=0% et λ CO = 0%) pour λ CO_{2max},
- Les droites d'égale teneur en CO (λ CO = cte) parallèle à la droite des combustions oxydantes,
- Les droites d'égale excès ou défaut d'air

Les diagrammes d'OSTWALD sont applicables à tous les combustibles, ils sont insensibles aux teneurs en eau et en cendres des combustibles solides, mais ne sont plus utilisables si la teneur en imbrûlés solides dépasse 3%. Les diagrammes pratiques sont limités à leur partie utile (λ O₂ < 21%).



6) Le volume des fumées à la température réelle

Il représente le volume des fumées (sèches ou humides) ramené à la température réelle des fumées. En première approche on peut considérer la pression des fumées constante, et appliquer la loi des gaz parfaits.

Notation : V_f à θ

Unité : [m³ de fumées (sèches ou humides) à θ fumées / unité de combustible]

$$\frac{VF_S}{T_0} - \frac{V_f}{T}$$

ou

$$\frac{VF_H}{T_0} - \frac{V_f}{T}$$

avec : $T_0 = (0 + 273)$ en K
T = Température réelle des fumées en K