

# COMBUSTION & DYNAMIQUE DES GAZ

# INTRODUCTION

Actuellement le besoin  
mondial



\* 95% potentiel chimique(Pétrole)

\* 3,5% l'énergie hydraulique

\* 1,5 % Nucléaire

Potentiel

processus



- énergie électrique

Chimique

combustion

- énergie mécanique

- énergie calorifique

# INTRODUCTION: Aspect positif

Actuellement le besoin  
mondial



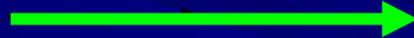
\* 95% potentiel chimique(Pétrole)

\* 3,5% l'énergie hydraulique

\* 1,5 % Nucléaire

Potentiel

processus



- énergie électrique

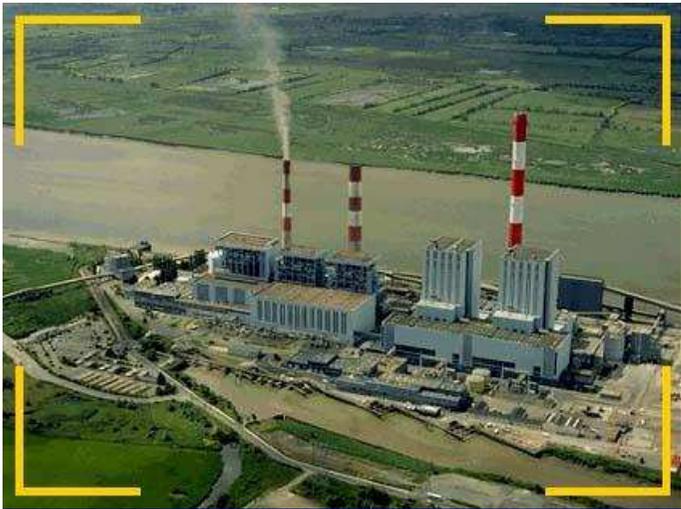
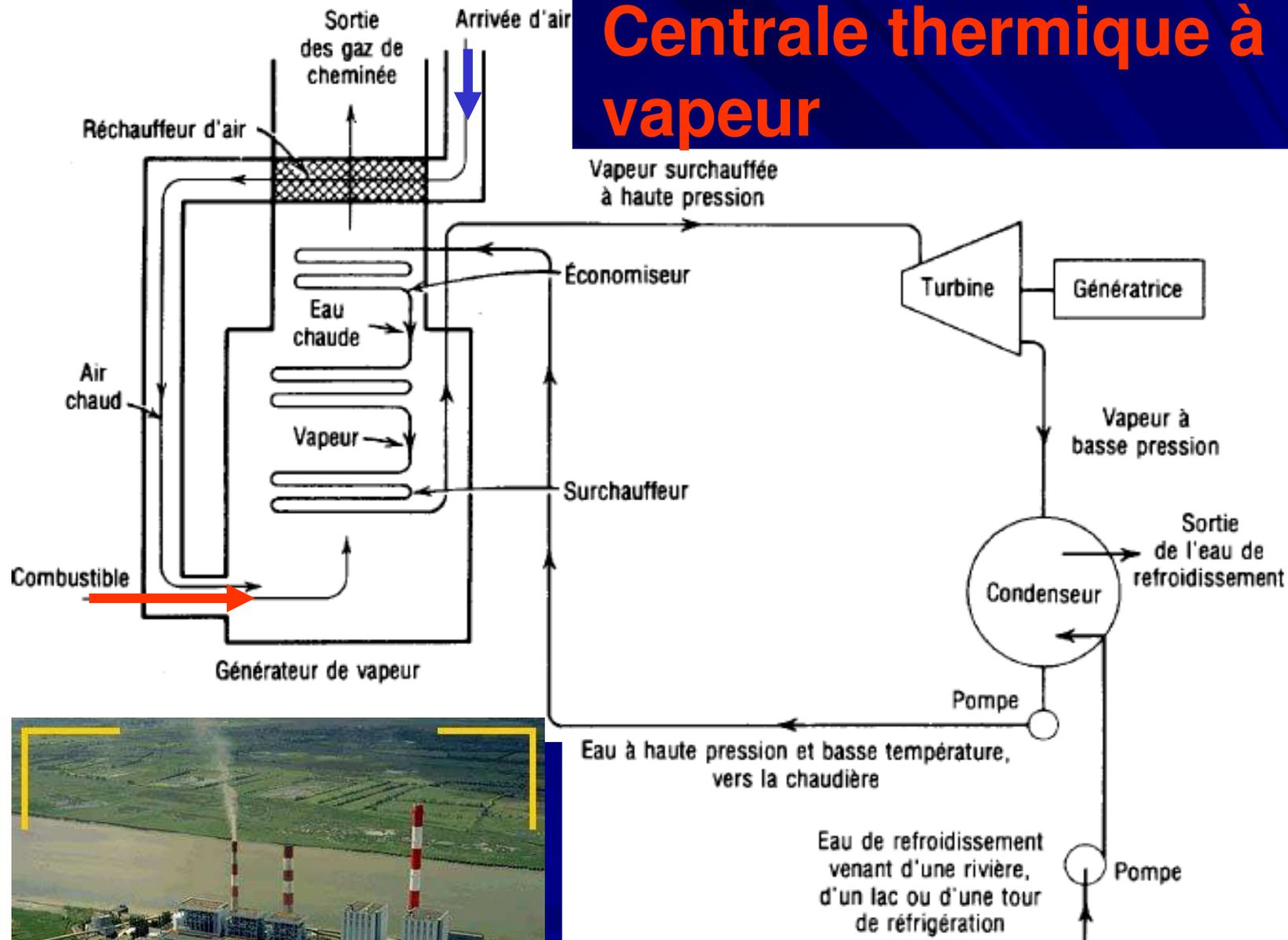
Chimique

combustion

- énergie mécanique

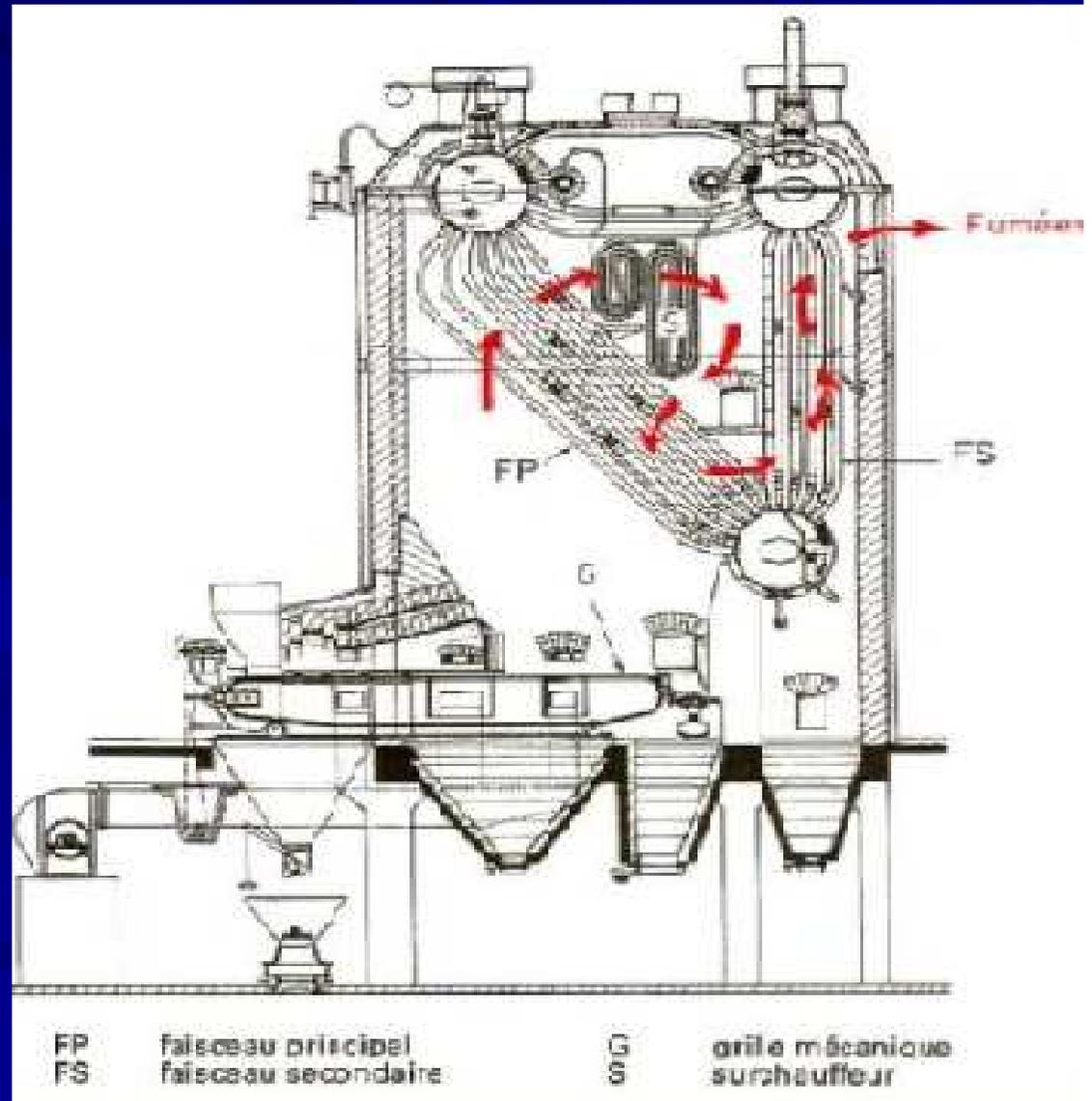
- énergie calorifique

# Centrale thermique à vapeur

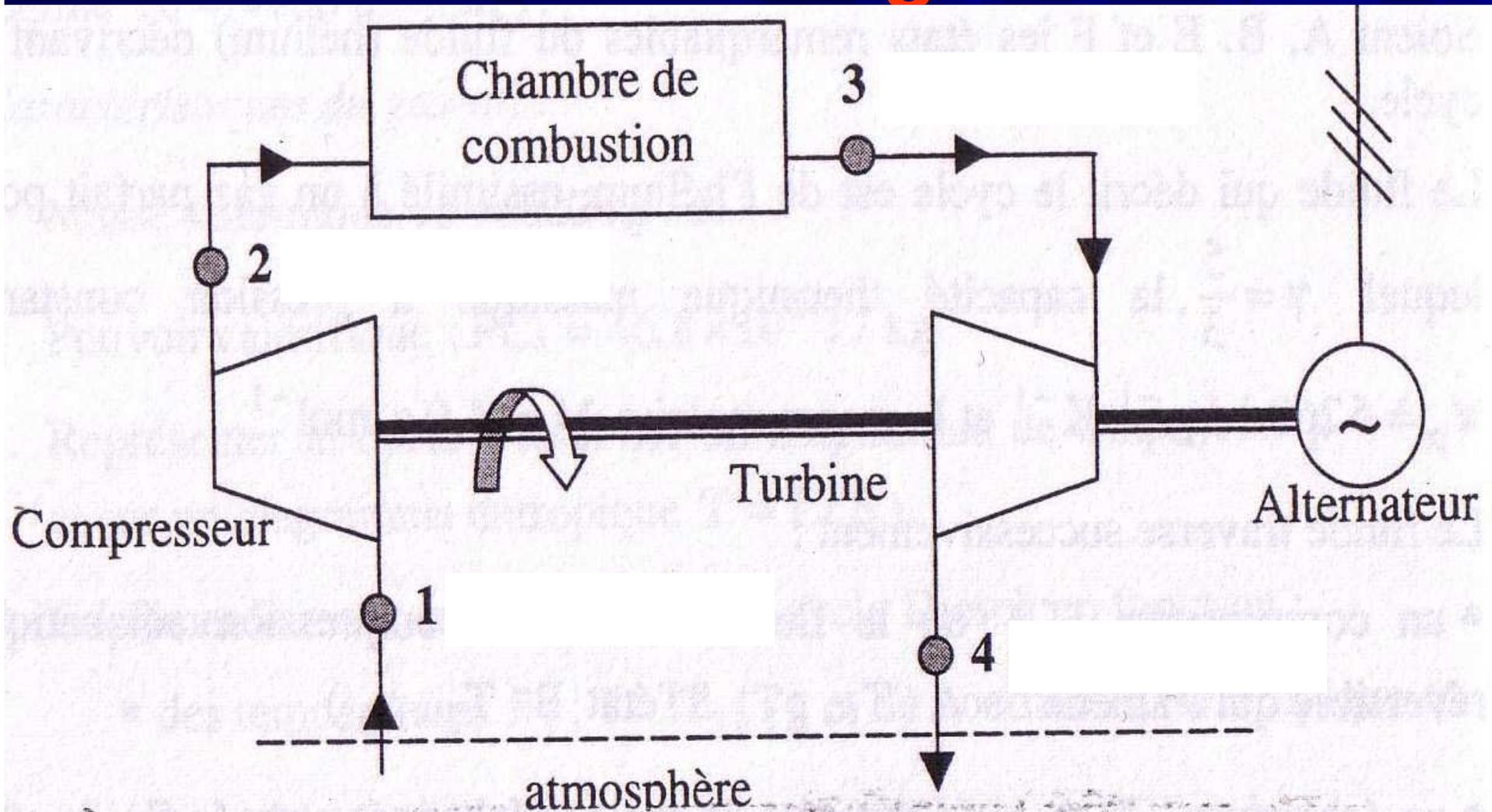


# Chaudière à tubes d'eau

- l'eau circule à travers un réseau de tubes, entre deux ballons placés l'un au-dessus de l'autre.
- La flamme se développe dans un foyer tapissé de tubes qui absorbent le rayonnement.
- Un second faisceau de tubes reçoit sa chaleur des fumées par convection.
- L'eau monte dans les tubes soumis au rayonnement, et descend par le faisceau de convection.



# Turbine à gaz

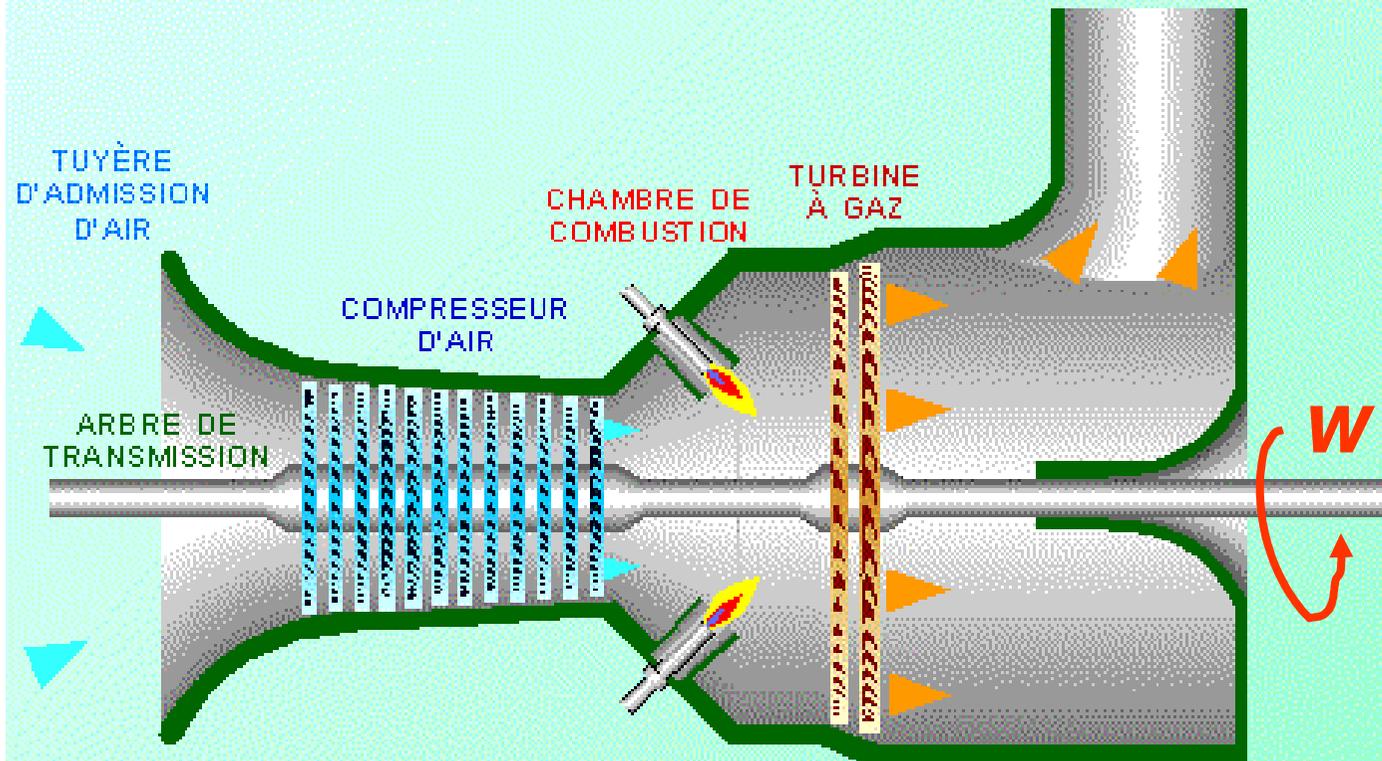


**Remarques:** Le travail nécessaire à l'entraînement du compresseur peut atteindre **50% du travail produit au niveau de la turbine**

La turbine à gaz (TAG) la plus puissante et la plus performante au monde : **340 MW**

# PRINCIPE D'UNE TURBINE À GAZ

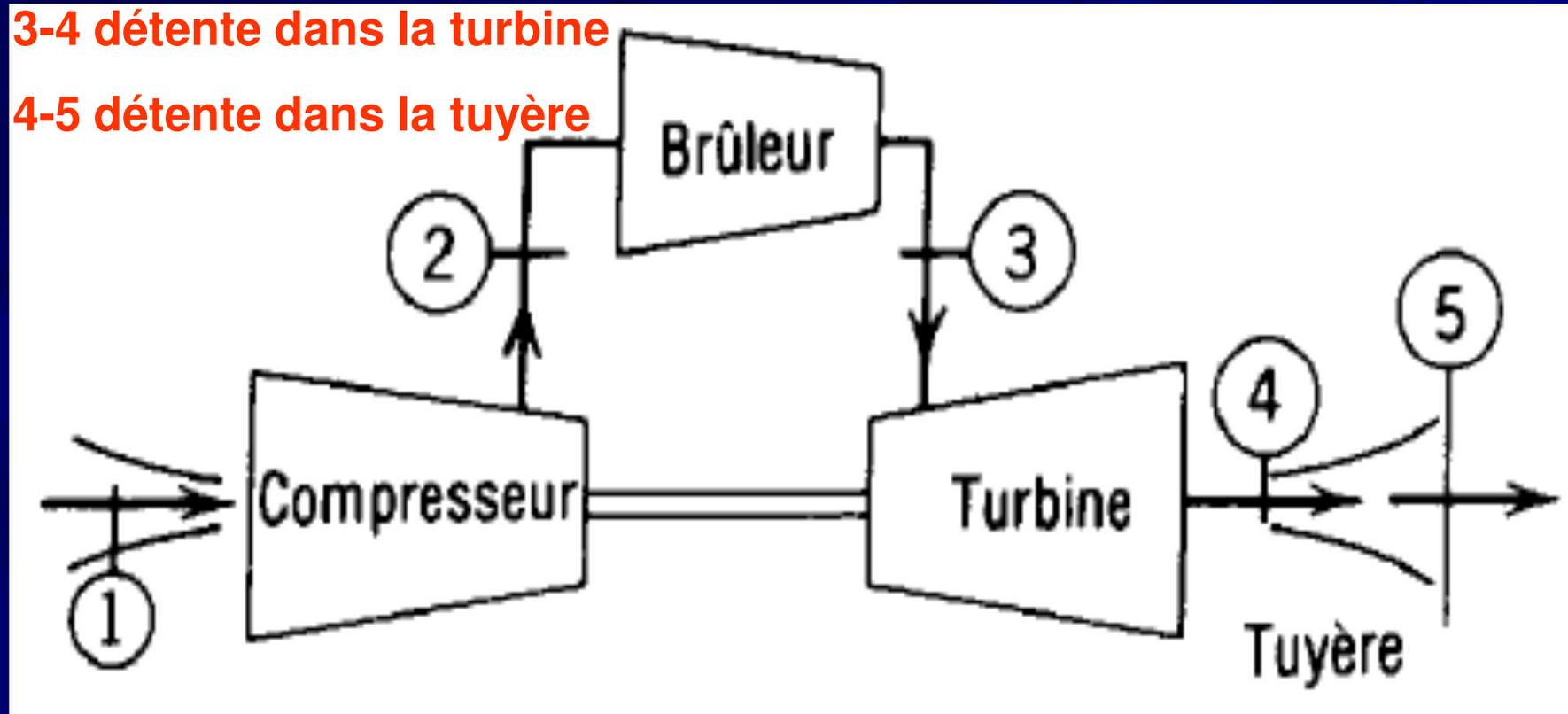
T° peut atteindre  
500°C  
ECHAPPEMENT



# Turboréacteur

3-4 détente dans la turbine

4-5 détente dans la tuyère



- la puissance fournie par la turbine soit juste suffisante à entraîner le compresseur.
- Les gaz à la sortie de la turbine sont alors détendus dans une tuyère pour être accélérés et ainsi produire une poussée.

# Impact de l'industrie sur la qualité de l'air atmosphérique : Aspect négatif

## ■ Gaz à effet de serre (augmentation continue)?

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	SF <sub>6</sub>	CF <sub>4</sub>
Concentration en 1750 (ppm)	278	0,700	0,270	0,0 10 <sup>-3</sup>	40 10 <sup>-3</sup>
Concentration en 1998 (ppm)	365	1,74	0,314	4,2 10 <sup>-3</sup>	80 10 <sup>-3</sup>
Taux d'augmentation	24%	60%	14%	100%	50%
Durée de vie(années)	50-200	12	114	3200	>50000

Source : Intergovernmental Panel on climate change

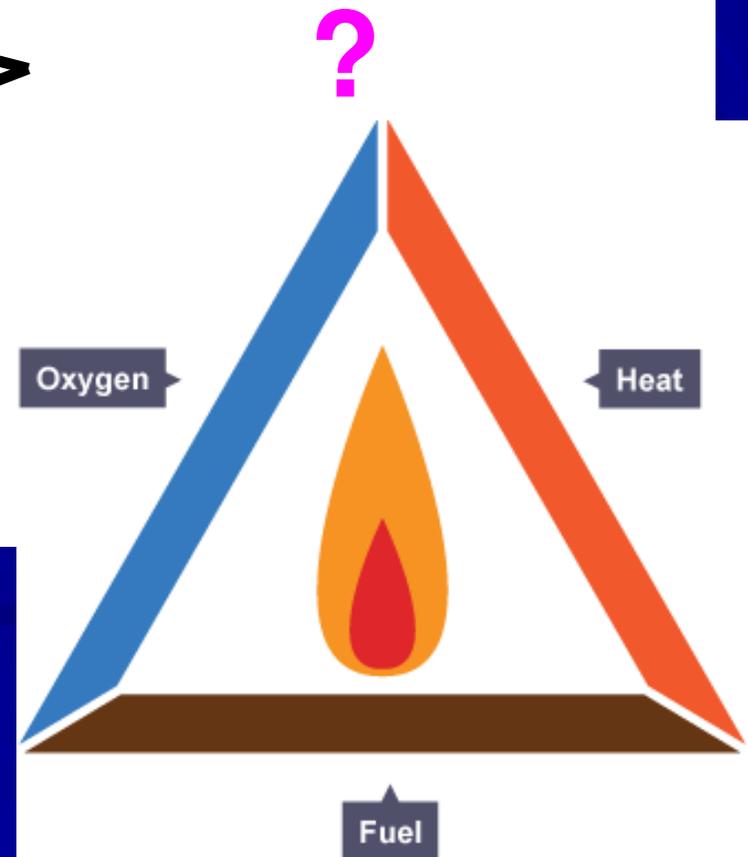
# Quelles sont les conditions pour avoir une combustion?

Quels sont les agents de la combustion ?

combustible

triangle de feu

comburant



# COMBUSTIBLE CONVENTIONNELS?

- **Les hydrocarbures purs;**
- **Le gaz naturel;**
- **Les fiouls (les produits pétroliers liquides);**
- **GPL;**
- **Les alcools;**
- **Charbon.**

# Les hydrocarbures purs

■ **Les alcanes:**  $C_nH_{2n+2}$

CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

■ **Les cyclanes :**  $C_nH_{2n}$

C<sub>5</sub>H<sub>10</sub> : le cyclopentane

C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>: les cyclohexane

**Les alcènes:**  $C_nH_{2n}$  (présence de **double liaison**)

Éthylène: C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

Isobutène: C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>.

# Les hydrocarbures purs

**Les aromatiques:**  $C_nH_{2n-6}$

Le **benzène:**  $C_6H_6$

**Toluène:**  $C_7H_8$

■ **Les alcools:**  $C_nH_{2n+1}OH$

$CH_4$  méthane  $\rightarrow$   $CH_3OH$  (méthanol)

$C_2H_6$  éthane  $\rightarrow$   $C_2H_5OH$  (éthanol)

$C_3H_8$  propane  $\rightarrow$   $C_3H_7OH$  propanol

Butane  $C_4H_{10}$   $\rightarrow$   $C_4H_9OH$  butanol

# Gaz naturel

- **Gaz naturel** (dont la combustion présente un grand avantage par rapport aux autres combustibles fossiles)

## En % volumique

<b>méthane</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>:</b>	<b>95,3%</b>	<b>(principal constituant)</b>
éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	:	3,4%	
propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	:	0,7%	
butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	:	0,2%	
divers		:	0,4%	

## Remarques:

- **Pas de soufre** dans la composition;
- **L'azote** peut atteindre **15 %**.

# Produits pétroliers liquides (distillation du pétrole)

## Fioul-oil domestique (FOD)

C : 86%

H : 13,5%

S : 0,45%

## Fioul-oil n° 2 (FOL 2)

C : 85,8%

H : 10,4%

S : 2,3%

N : 0,34%

## Remarque

En règle générale ;

C : 84-87 %

H : 10-14 %

S : 0,2-4 % (TBTS,BTS)

Divers : 0-1 %

**L'azote:** ne dépasse pas 1 % dans ces fiouls

# Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)

Désignation	% volumique							Densité Kg/m <sup>3</sup>
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	
<b>Butane commercial</b>	3,2	-	-	6,1	21,8	<b>68,6</b>	0,3	2,6
<b>Propane commercial</b>	0,5	2	30	<b>65,5</b>	-	2	-	1,98

# Le charbon

## Charbon local

C : 74,6%

H : 5,2%

S : 0,9%

O : 10,5%

eau : 0,3%

N : 1,1%

cendres : 7,4%

PCI : 23440 KJ/Kg

- Il existe toute une panoplie de charbon

- Exemple de composition de charbon (en % massique):

## Composition sèche du charbon importé au Maroc :

C : 87 %

H : 5,2%

S : 0,5%

O : 5,8%

N : 1,2%

PCI: 26800 KJ/Kg

## Le carbone total

On définit le carbone total  $VCO_2$  comme étant le volume de  $CO_2$  dégagé par la combustion de  $1 m^3$  de combustible gaz ou *d'1 Kg* de combustible solide ou liquide :

$$VCO_2 = \frac{0,224}{12} C(\%) = 0,0187 C(\%)$$

avec  $C(\%)$  est le pourcentage du carbone dans le combustible

$$VCO_2 = (CO_2) + (CO)$$

## Hydrogène total

On définit aussi l'hydrogène total  $VH_2O$  comme étant le volume de  $H_2O$  dégagé par la combustion de  $1 m^3$  de combustible gaz ou *d'1 Kg* de combustible solide ou liquide :

$$VH_2O = 1,224 \left( \frac{E}{100} + \frac{9H}{100} \right)$$

**E** : l'humidité dans le combustible

**H** : teneur d'hydrogène dans le combustible

**Remarque :**

Il existe une autre façon d'estimer ces deux paramètres

# Le pouvoir calorifique

## Définition

- C'est la quantité d'énergie dégagée par la combustion **stœchiométrique** et **complète** d'1 m<sup>3</sup> (pour les gaz) ou d'1 Kg (pour les solides et les liquides) les produits étant ramener à la température de référence  $T=298K$
- Si l'eau formée est à l'état vapeur, on parle alors de pouvoir calorifique inférieur : **PCI**
- Si l'eau formée est à l'état liquide, on parle alors de pouvoir calorifique supérieur: **PCS**

# Le pouvoir calorifique (suite)

## Lequel utilise-t-on le PCS ou le PCI?

- Dans l'industrie, généralement, l'eau sort de la cheminée à l'état vapeur, donc seul le PCI présente un intérêt d'ordre énergétique.
- Le débit de combustible dépend étroitement de ce pouvoir calorifique.

# Calcul du pouvoir calorifique d'un combustible

- $PCS=84*C+277,65*H+25*S$  (avec C,H et S exprimés en % massique)
- $PCI=82 C+236 H+25 S$

## Application:

Calculer le PCS d'un combustible dont la composition pondérale est :

C : 86 %

H : 13,5 %

S : 0,5 %

$$PCS=84*86+277,65*13,5+25*0,5=10984,775 \text{ Kcal/Kg}$$

$$PCI=82*86+236*13,5+25*0,5=10250,50 \text{ Kcal/kg}$$

# Calcul du pouvoir calorifique d'un combustible (suite)

## ■ Remarque

On peut aussi estimer le PCS et le PCI par:

$$PCI = \sum_{\text{réactifs}} n_i \Delta H_{fi} - \sum_{\text{produits}} n_j \Delta H_{fj}$$

$\Delta H_{fj}$ : enthalpie de formation (tables de **Janaf**)

# Exemple de réactions de formations

- La réaction de formation de  $\text{H}_2\text{O}$ :



- La réaction de formation de  $\text{CO}_2$ :



- La réaction de formation de  $\text{CO}$ :



- **Remarque:**



# Enthalpie de formation

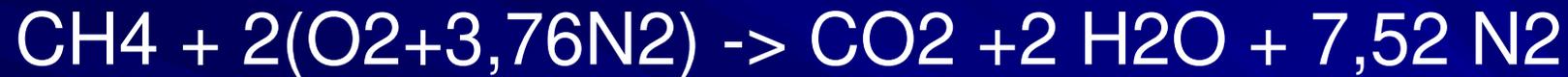
TABLE 5.3 Standard Enthalpies of Formation,  $\Delta H_f^\circ$ , at 298 K

Substance	Formula	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	Substance	Formula	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)
Acetylene	$C_2H_2(g)$	226.7	Hydrogen chloride	$HCl(g)$	-92.30
Ammonia	$NH_3(g)$	-46.19	Hydrogen fluoride	$HF(g)$	-268.6
Benzene	$C_6H_6(l)$	49.0	Hydrogen iodide	$HI(g)$	25.9
Calcium carbonate	$CaCO_3(s)$	-1207.1	Methane	<u><math>CH_4(g)</math></u>	-74.8
Calcium oxide	$CaO(s)$	-635.5	Methanol	$CH_3OH(l)$	-238.6
Carbon dioxide	<u><math>CO_2(g)</math></u>	-393.5	Propane	$C_3H_8(g)$	-103.85
Carbon monoxide	$CO(g)$	-110.5	Silver chloride	$AgCl(s)$	-127.0
Diamond	$C(s)$	1.88	Sodium bicarbonate	$NaHCO_3(s)$	-947.7
Ethane	$C_2H_6(g)$	-84.68	Sodium carbonate	$Na_2CO_3(s)$	-1130.9
Ethanol	$C_2H_5OH(l)$	-277.7	Sodium chloride	$NaCl(s)$	-410.9
Ethylene	$C_2H_4(g)$	52.30	Sucrose	$C_{12}H_{22}O_{11}(s)$	-2221
Glucose	$C_6H_{12}O_6(s)$	-1273	Water	$H_2O(l)$	-285.8
Hydrogen bromide	$HBr(g)$	-36.23	Water vapor	<u><math>H_2O(g)</math></u>	-241.8

# Calcul du pouvoir calorifique d'un combustible (suite)

## ■ Exemple:

Exprimer le PCS et le PCI du méthane:



$$\text{PCI} = \text{DHf}(\text{CH}_4) - \text{DHf}(\text{CO}_2) - 2 \text{DHf}(\text{H}_2\text{O})$$

DHf: l'enthalpie de formation (JANAF)

Voir:

<https://janaf.nist.gov/?myCountry=>

$$\text{PCI} = -74,92 - (-393,65) - 2(-241,91) = 802,55 \text{ KJ/mol}$$

de méthane

## Exemple de valeur de PCI

Combustible	PCI (KJ/Kg)
Pétrole brut	40500 – 46000
FOD	41000 – 42250
Fuel léger	41400
FOL n°1	40500
FOL n°2	40150 - 40500
FOL n° 7	41022
Essence	42700 – 44800
Gasoil	42700
Kérosène	43100
Propane commercial	91200
Charbon local	23440
Charbon importé	26800
Bois	18418
Grignons d'Olives	18000

# Limite d'inflammabilité

LIMITES D'INFLAMMABILITE ET TEMPERATURES D'AUTO-INFLAMMATION  
DANS L'AIR POUR QUELQUES COMBUSTIBLES

Composés	Formule	Limite inférieure	Limite supérieure	$\theta$
		Exprimées en volume dans l'air (%)		Inflammation (°C)
Hydrogène	H <sub>2</sub>	4,0	74,5	570
Oxyde de carbone	CO	12,5	74	630
Méthane	CH <sub>4</sub>	5,0	15,0	580
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,25	9,4	480
<i>n</i> - et isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,85/1,8	8,4	420/480
<i>n</i> - et néopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1,45/1,4	7,8/7,5	(290)/450
Heptanes	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	(1,10)	6,7	(220)
<i>n</i> - octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	(1,0 )	(6)	(240)
Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	(1,0 )	(6)	(670)
Ethylène	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	(3,1 )	(32)	520
Propylène	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	(2,2 )	10,5	460
Butène-1	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1,6	9,35	385
Butène-2	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1,8	9,7	435
Butadiène	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2,0	11,5	420
Acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	(81)	320
Benzène	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1,4	(7,1)	(620)
Toluène	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	(1,4)	(6,7)	(585)
Naphtalène	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	(0,9)	(5,9)	575
Méthanol	CH <sub>3</sub> OH	(6,7)	(36)	(510)
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	(3,3)	(19)	(490)
Acétaldéhyde	CH <sub>3</sub> CHO	4,0	56	230
Acétone	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	(2,6)	12,8	(560)

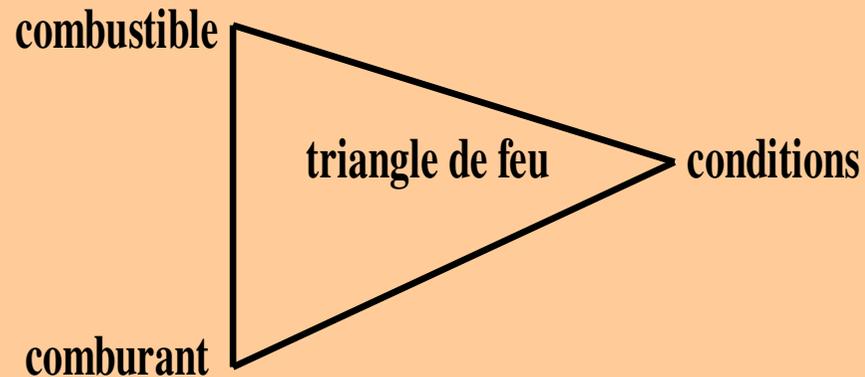
Ce tableau est tiré du volume : Oxydations et Combustions, de A. Van Tiggelen, Tome I,

# COMBURANT

De formule chimique générale:



Quels sont les agents de la combustion ?



**si  $x=0$**  : il s'agit de l'oxygène pur (peu utilisé)

**si  $x=3,76$**  : c'est de l'air atmosphérique (le plus fréquemment)

## COMBURANT (suite)

- La composition **volumique** est :
    - Azote : 78%
    - Oxygène : 20.94 %
    - Argon : 0.93 %
    - Autres : 0.03 % (CO<sub>2</sub>, Krypton...)
  - Composition en % **massique**:
    - Azote: 77%
    - Oxygène: 23
- la densité est **1,29 Kg/m<sup>3</sup>** à 0°C

# Préparation d'un comburant à faible teneur d'azote

Dans certaines industries (Besoin d'une forte température):

- Verrerie;
- Cimenterie;
- Sidérurgie
- $x < 3,76$  : il s'agit de l'air oxygéné

On utilise un comburant riche en oxygène pour contrer l'effet thermique de l'azote du comburant

Comburant à  $y$  % d'oxygène au lieu de 20,9% on devrait injecter de l'oxygène à l'air atmosphérique :

$$(O_2)_{\text{sup } p} = \frac{Y - 20,9}{100 - Y} \quad \text{en } m^3 \text{ d' } O_2 / m^3 \text{ d' air atmosphérique}$$

## ■ Exercice:

pour préparer un comburant contenant **22% d'O<sub>2</sub>**, il faut **injecter** une quantité d'oxygène de l'ordre de:

$$(O_2)_{\text{sup } p} = \frac{22 - 20,9}{100 - 22} = 0,014 \text{ litres d'O}_2 / \text{m}^3 \text{ d'air atmosphérique}$$

# Pouvoir comburivore d'un combustible

## Définition:

**Le pouvoir comburivore** est le volume d'air nécessaire à la combustion **complète** et **stoechiométrique** d'un m<sup>3</sup> de gaz ou d'1 Kg de combustible solide ou liquide

- En général, le pouvoir comburivore **dépend** du
  - **comburant**
  - et de **la nature du combustible.**

## Exemple:

Déterminer le pouvoir comburivore du méthane



Le volume  $V_a$  d'air utilisé à la stoechiométrie est:

$$V_a = 2 * 4,76 = 9,52 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de méthane}$$

**$V_a$  est appelé le pouvoir comburivore du méthane**

# Pouvoir comburivore d'un combustible

- Pour un hydrocarbure pur  $C_nH_m$ :
  - $V_a = (1+x) \cdot (n+m/4)$  en  $m^3$  d'air/  $m^3$  d'hydrocarbure
- Pour un **gaz naturel** GN:

$$(O)_{stoech} = \sum_{i, \text{constituant}} (O)_i - (O)_j$$

Oxygène pour la combustion stoechiométrique

Oxygène relatif à la combustion stoechio de chaque constituant du gaz

Oxygène faisant partie de la composition du GN

# Pouvoir comburivore d'un combustible

- Le pouvoir comburivore est déduit à partir de :

$$V_a = (O_2)_{stoech} \frac{100}{\tau_{O_2}}$$

*avec*

$$\tau_{O_2} = 20,9$$

$$\tau_{N_2} = 79,1$$

## Pouvoir comburivore (suite)

- **Le pouvoir comburivore** pour un combustible **solide** ou **liquide** est déduit à partir de :

$$P_a (\text{Kg d'air} / \text{Kg Combustible}) = \frac{8}{23,1} \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right)$$

$$V_a (m^3 / \text{Kg}) = \frac{P_a}{1,293}$$

# THERMODYNAMIQUE DE LA COMBUSTION

# Chaleur échangée entre le milieu réactionnel et le milieu extérieur

## ■ Chaleur à volume constant

D'après le premier principe de la thermo:

$$dU = \delta Q + \delta W \Rightarrow dU = (\delta Q)_V \Rightarrow \Delta U = Q_V$$

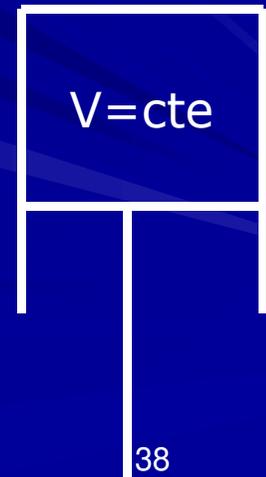
## C/C:

Au cours d'une transformation isochore, la chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur est égale à **la variation de l'énergie interne** du système.

## Exemples:

-La combustion dans le cylindre d'un moteur à essence

-Explosion qui a lieu dans un récipient ou une chambre si les murs et les fenêtres ne sont pas cassés.



# Chaleur échangée entre le milieu réactionnel et le milieu extérieur(suite)

## ■ Chaleur à pression constante

D'après le premier principe de la thermo:

$$\begin{aligned}dU &= \delta Q - pdV \quad \Rightarrow \quad \Delta U = Q_p - p(V_f - V_i) \\ \Rightarrow \Delta U &= U_f - U_i = Q_p - p(V_f - V_i) \\ \Rightarrow (U_f + pV_f) - (U_i + pV_i) &= Q_p \Rightarrow H_f - H_i = Q_p\end{aligned}$$

soit,

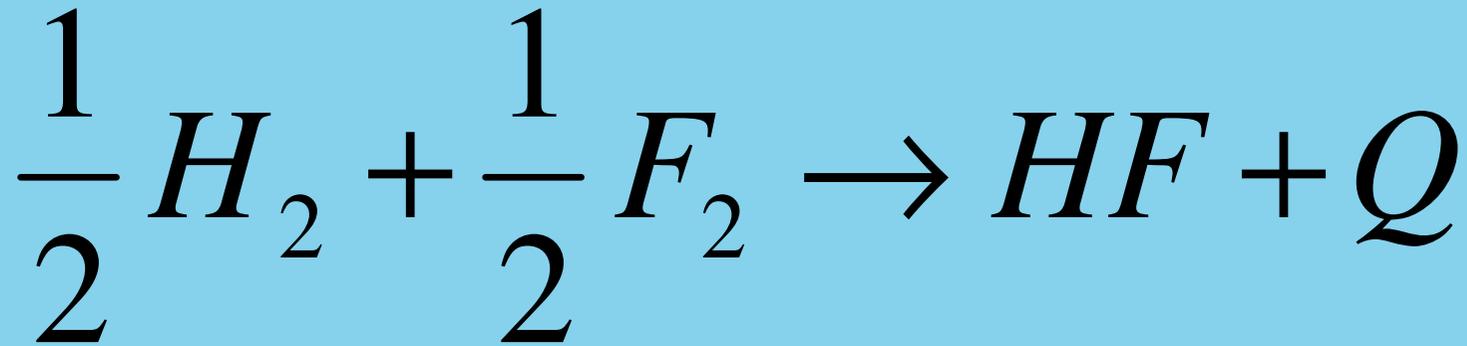
$$Q_p = \Delta H$$

**C/C:**

Au cours d'une transformation **isobare**, la chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur est égale à **la variation de l'enthalpie** du système.

# Exercice

- Si on considère la réaction de combustion suivante:



**Calculer** la chaleur échangée entre le milieu réactionnel et le milieu extérieur lorsque les températures initiale et finale sont égales à 298K.

# Réponse

on a

$$Q_p = \Delta H = H_{\text{produits}} - H_{\text{réactifs}} = (H_{\text{HF}})_{298} - \frac{1}{2}(H_{\text{H}_2})_{298} - \frac{1}{2}(H_{\text{F}_2})_{298}$$
$$= -272,6 \text{ Kj} \quad (\text{selon tables JANAF})$$

$$Q_p < 0 \quad \Rightarrow$$

On dit que la réaction est **exothermique**

$$Q_p > 0 \quad \Rightarrow$$

On dit que la réaction est **endothermique**

$$Q_p = 0 \quad \Rightarrow$$

On dit que la réaction est **adiabatique**

## Relation entre $Q_p$ et $Q_r$

on montre que :

$$Q_p = \int_{T_i}^{298} C_{p, \text{réactif}} dT + \int_{298}^{T_f} C_{p, \text{produits}} dT + \sum_{\text{produits}} n_j (\Delta H_f)_{j,298} - \sum_{\text{réactifs}} n_i (\Delta H_f)_{i,298}$$

soit alors

$$Q_r = \int_{T_i}^{298} C_{p, \text{réactif}} dT + \int_{298}^{T_f} C_{p, \text{produits}} dT - Q_p$$

**C/C** La chaleur dégagée par la réaction est répartie comme suit:

- Une partie sert à chauffer les réactifs
- Une partie sert à chauffer les produits
- Une partie est échangée avec le milieu extérieur

# Les types de flammes

■ Il existe deux types de flamme:

– Flamme de **prémélange**;

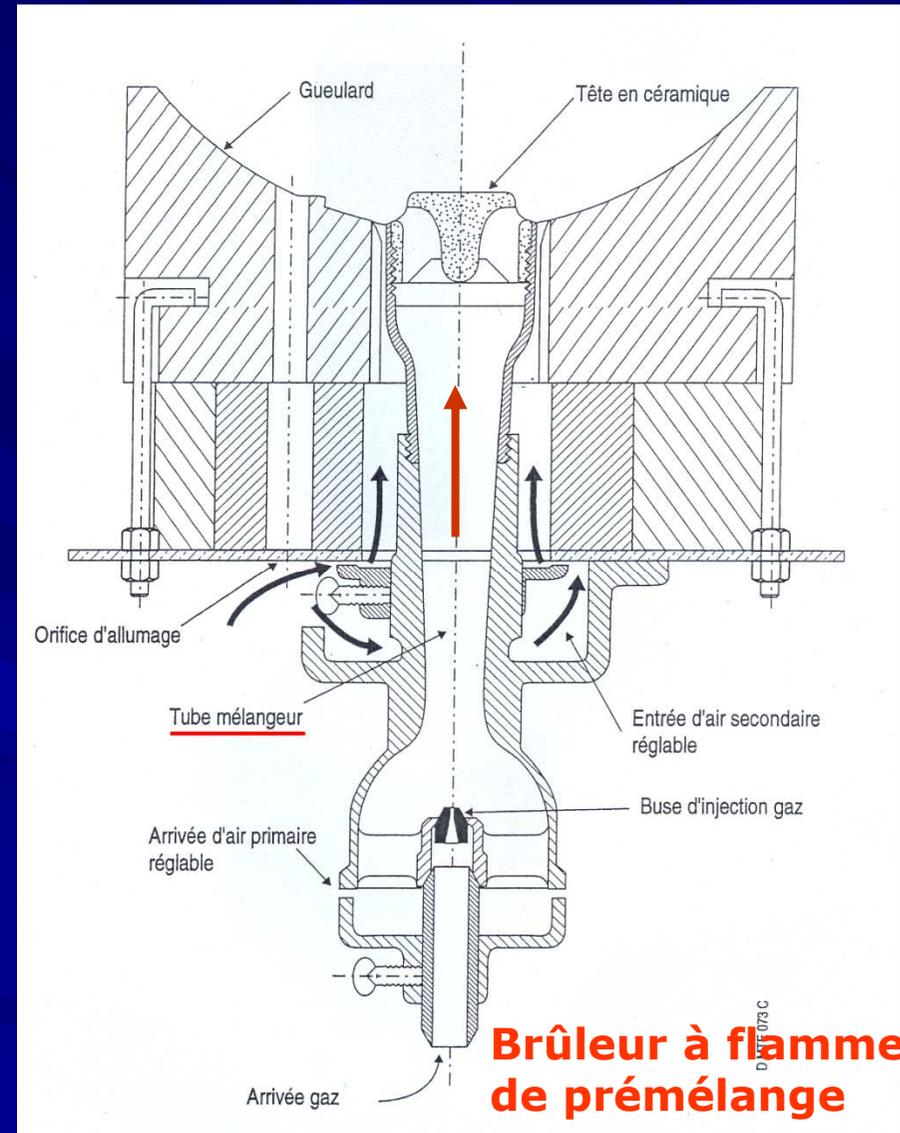
– Flamme de **diffusion**

# Flamme de prémélange

■ Lorsque le combustible et le comburant sont préalablement mélangés avant d'arriver à la chambre de combustion, on parle d'une flamme de **prémélange**.

■ **Exemples:**

- Flamme d'un bec benzène
- Flamme dans le moteur à essence

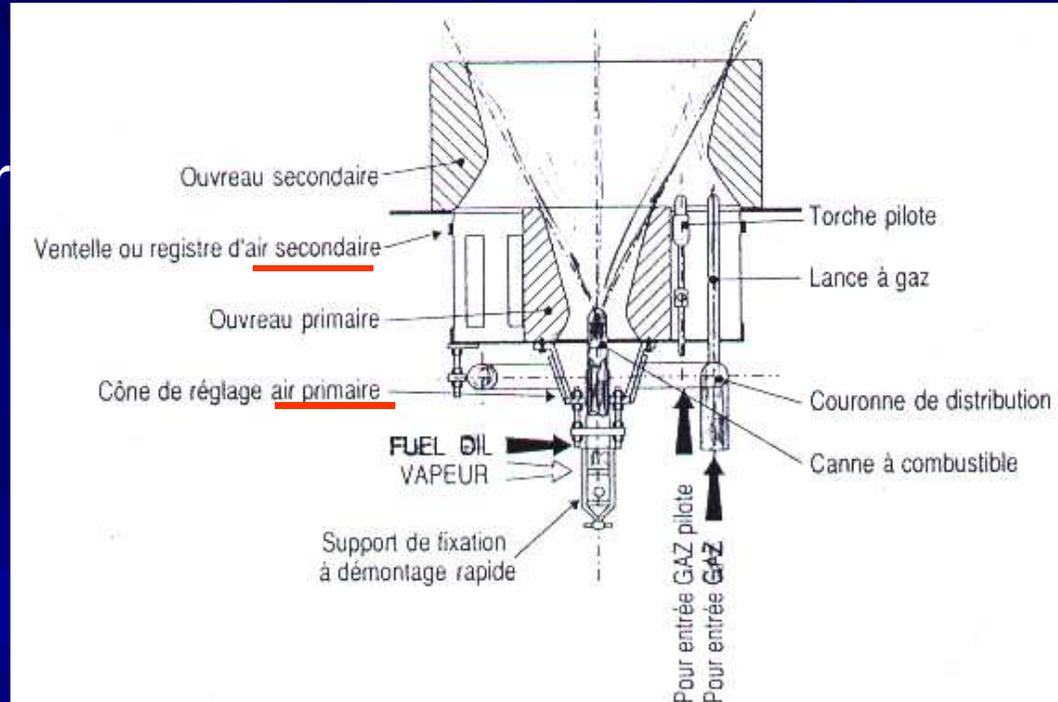


# Flamme de diffusion

- Lorsque le combustible et le comburant ne sont pas préalablement mélangés avant d'arriver à la chambre de combustion, on parle d'une flamme de diffusion.

- **Exemples:**

- Flamme d'une bougie
- Flamme dans le moteur diesel



**Brûleur à fioul ( flamme de diffusion)**

# Type de flamme dans four-chaudière

- Quel est le type de la flamme dans:
  - Le four?
  - La chaudière?

# Les différents types de la combustion

## ➤ **combustion théorique ou neutre ou stœchiométrique:**

- ✓ sert de référence
- ✓ difficile à réaliser car le mélange combustible - air n'est jamais parfait
- ✓ toute technique évoluée tente de s'en approcher

## ➤ **Combustion réductrice**

- ✓ Industrie chimique

## ■ **combustion oxydante ou avec excès d'air**

- ✓ production d'énergie (avec un minimum d'imbrûlés)

# Les produits de la combustion



Les produits de combustion sont:

- **Les fumées** :
  - $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  : oxydation de C, H et S
  - $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  : imbrûlés
  - $\text{O}_2$  : excès d'air ou combustion incomplète
  - $\text{NO}_x$  : oxydation de l'azote
  - $\text{N}_2$  : comburant + combustible
- **Les cendres** (combustible solide et fioul): les imbrûlés solides et les matières minérales non combustibles.

## Excès d'air?

- un **mélange parfait** de combustible - air est **difficile** à obtenir dans une unité de production de chaleur.
- Pour être sûr que tout le combustible soit bien brûlé, il est nécessaire de fournir un **léger excès** d'air défini par:

$$e = 100 \frac{\text{Volume d'air utilisé} - \text{volume d'air stoechiométrique}}{\text{volume d'air stoechiométrique}}$$

# Exemple d'excès d'air

<b>Combustible</b>	<b>Excès d'air en %</b>
<b>Fioul</b>	<b>10-20</b>
<b>Charbon</b>	<b>30-60</b>
<b>Butane/propane</b>	<b>5-12</b>

# Le pouvoir comburivore

## Définition:

**Le pouvoir comburivore** est le volume d'air nécessaire à la combustion **complète** et **stoechiométrique** d'un m<sup>3</sup> de gaz ou d'1 Kg de combustible solide ou liquide

On le note **Va**

## Exemple:



Le volume Va d'air utilisé à la stœchiométrie est:

$$\text{Va} = 2 * 4,76 = 9,52 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de méthane}$$

**Va** est appelé **le pouvoir comburivore du méthane**

# Comment calculer ce pouvoir comburivore? (suite)

- Pour un hydrocarbure pur  $C_nH_m$ :
  - $V_a = (1+x) \cdot (n+m/4)$  en  $m^3$  d'air/  $m^3$  d'hydrocarbure
- Pour un **gaz naturel** GN:

$$(O)_{stoech} = \sum_{i, \text{constituant}} (O)_i - (O)_j$$

Oxygène pour la combustion stoechiométrique

PI. E. AFFAD

Oxygène relatif à la combustion stoechio de chaque constituant du gaz

FI G. Energétique\_FSTM

Oxygène faisant partie de la composition du GN

## Pouvoir comburivore (suite)

- Le pouvoir comburivore est déduit à partir de :

$$V_a = (O_2)_{stoech} \frac{100}{\tau_{O_2}}$$

*avec*

$$\tau_{O_2} = 20,9$$

$$\tau_{N_2} = 79,1$$

## Pouvoir comburivore (suite)

- **Le pouvoir comburivore** pour un combustible **solide** ou **liquide** est déduit à partir de :

$$P_a (\text{Kg d'air} / \text{Kg Combustible}) = \frac{8}{23,1} \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right)$$

$$V_a (m^3 / \text{Kg}) = \frac{P_a}{1,293}$$

## Excès d'air

### ■ Exercice:

- Si on prend le cas du méthane
- Si on travaille avec un excès d'air de 5 %  
c'est-à-dire que :

Le volume d'air **utilisé** dans la combustion est augmenté de **5 %** par rapport à celui utilisé à **la stoechiométrie**

**Quel est le volume d'air utilisé?**

## Le volume d'air utilisé dans la combustion

Le volume d'air utilisé avec 5% d'excès est de:

$$V_{\text{comburant}} = V_a + 5\% V_a = 1,05 V_a$$

**cas de m éthane:**

$$V_{\text{comburant}} = 1,05 * 9,52 = 9,996 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

**En général:**

$$V_{\text{comburant}} = V_a * \left(1 + \frac{e}{100}\right)$$

# Le pouvoir fumigène d'un combustible

On définit aussi le **pouvoir fumigène**:

Le **pouvoir fumigène** d'un combustible comme étant le volume de fumées dégagées par la combustion stoechiométrique et complète d'1 m<sup>3</sup> de gaz ou d'1 kg de combustible solide ou liquide.

Suivant que la quantité d'eau formée au cours de la combustion est prise en compte ou non, on définit:

- le **pouvoir fumigène sec**;
- et le **pouvoir fumigène humide**

# Le pouvoir fumigène d'un combustible

**Donc**

➤ le pouvoir **fumigène humide**  $V'_{f0}$  est:

$$V'_{f0} = (CO_2) + (N_2) + (SO_2) + (H_2O)$$

➤ le pouvoir **fumigène sec**  $V_{f0}$  comme étant le volume:  $V_{f0} = (CO_2) + (N_2) + (SO_2)$

➤ **Exemple: pour le méthane?**



$V_{f0}' = 1 + 7,52 + 0 + 2 = 10,52 \text{ m}^3$  de fumées humides/ $\text{m}^3$  de méthane

$V_{f0} = 1 + 7,52 + 0 = 8,52 \text{ m}^3$  de fumées sèches/  $\text{m}^3$  de méthane

# Remarque

- La composition élémentaire du combustible en **C, H et S** permet de déterminer son **pouvoir comburivore** et son **pouvoir fumigène**:

$$V'_{f0} (m^3 / Kg) = 0,0893C + 0,3239H + 0,0334S + 0,008N + 0,0124E - 0,0265O$$

$$V_{f0} (m^3 / Kg) = V'_{f0} - \frac{22,4}{18} \left( \frac{E}{100} + \frac{9H}{100} \right)$$

qté d'eau

# Exercice1

## ■ Calculer

- le carbone total;
- l'hydrogène total;
- le pouvoir comburivore;
- le pouvoir fumigène;
- le pouvoir calorifique

Du fioul oil domestique de composition:

- C : 86 %
- H : 13,5 %
- S : 0,50 %

# Solution de l'exercice 1

Si on raisonne sur 100 Kg de FOD, on obtient le tableau:

Constituant En Kg	$(O_2)_{Stoe}$ $m^3$	Gaz de combustion pour la combustion de 100Kg du FOD			
		$N_2$	$CO_2$	$H_2O$	$SO_2$
C=86 $C+O_2 \rightarrow CO_2$	$22,4 * 86 / 12 = 160,53$	$236,48 * 3,76 = 889,165$	160,53	-	-
H=13,5 $2H+0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	$22,4 * 13,5 / 4 = 75,6$		-	$2 * 75,6 = 151,2$	-
S=0,5 $S+O_2 \rightarrow S O_2$	$22,4 * 0,5 / 32 = 0,35$		-	-	0,35
<b>Total (<math>m^3</math>)</b>	<b>236,48</b>		<b>160,53</b>	<b>151,2</b>	<b>0,35</b>

A partir de ce tableau, on peut déduire les différents paramètres:

# Solution1 de l'exercice (suite)

## ■ Le carbone total:

–  $V_{CO_2}=1,60 \text{ m}^3 \text{ de } CO_2/\text{Kg de FOD}$

## ■ L'hydrogène total

–  $V_{H_2O}=1,51 \text{ m}^3 \text{ d'eau/Kg FOD}$

## ■ Le pouvoir comburivore

–  $V_a=(O_2)_{Stoe} 100/(\text{taux } O_2 \text{ dans le comburant})$

–  $V_a=2,365 * 100/20,9=11,316 \text{ m}^3 \text{ d'air/Kg FOD}$

## ■ Le pouvoir fumigène:

–  $V_{f0}=(CO_2)+(N_2)+(SO_2)=1,6+8,89+0,35$

–  $V_{f0}=10,84 \text{ m}^3 \text{ fumées sèches/Kg FOD}$

–  $V_{f0}'=V_{f0}+(H_2O)=10,84+1,51=12,35 \text{ m}^3 \text{ fumées humides/Kg FOD}$

## ■ Le pouvoir calorifique inférieur:

–  $PCI=82 C+236 H+25 S$

–  $PCI=82 * 86+236*13,5+25*0,5=10250,5 \text{ Kcal/Kg}$

On produit

- 1,6 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>
- 1,51 m<sup>3</sup> d'eau
- 0,0035 m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub>
- 8,95 m<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>

Soit

■ un total de : 12,014 m<sup>3</sup> / Kg FOD

Que se soit dans les réactifs ou dans les produits, la **proportion** la plus élevée est celle de **l'azote**

**Sortie**

Lorsqu'on brûle 1 Kg de FOD

On consomme 11,31 m<sup>3</sup> d'air

**entrée**

## Exercice2 : cas d'un combustible gazeux

### ■ Calculer:

- le carbone total;
  - l'hydrogène total;
  - le pouvoir comburivore
  - et le pouvoir fumigène
- de **l'air propané** de composition:

### Composition du gaz en %

$C_2H_4$	$C_2H_6$	$C_3H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$O_2$	$N_2$
0,3	1,1	17,2	37,6	1,1	9	33,7

# Solution2 de l'exercice (suite)

## ■ Le carbone total:

–  $V_{CO_2}=1,716 \text{ m}^3 \text{ de } CO_2/ \text{ m}^3 \text{ d'air propané}$

## ■ L'hydrogène total

–  $V_{H_2O}=2,11 \text{ m}^3 \text{ d'eau/ m}^3 \text{ d'air propané}$

## ■ Le pouvoir comburivore

–  $V_a=(O_2)_{Stoe} 100/(\text{taux } O_2 \text{ dans le comburant})$

–  $V_a=(2,776-0,09) * 100/20,9=13,28 \text{ m}^3 \text{ d'air/ m}^3 \text{ d'air propané}$

## ■ Le pouvoir fumigène:

–  $V_{f0}=(CO_2)+(N_2)+(SO_2)=1,716+(10,43+0,33)$

–  $V_{f0}=12,146 \text{ m}^3 \text{ fumées sèches/ m}^3 \text{ d'air propané}$

–  $V_{f0}'=V_{f0}+(H_2O)=12,146+2,11=14,146 \text{ m}^3 \text{ fumées humides/ m}^3 \text{ d'air propané}$

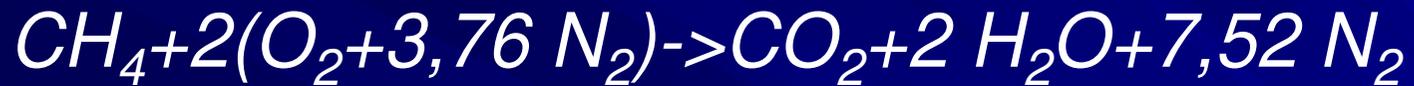
## Teneur maximale de CO<sub>2</sub> dans les fumées sèches

- A partir de  $V_{f0}$  et  $(CO_2)$ , on définit la teneur maximale de CO<sub>2</sub> qu'on pourrait trouver dans les fumées lors d'une combustion **stoechiométrique complète** par:

$$\alpha_0 = 100 \frac{(CO_2)}{V_{f0}}$$

# Exemple1

■ **Exemple1** (cas d'un hydrocarbure pur) :



$$\alpha_0 = 100 \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{fumées}}} \quad \text{en combustion neutre}$$

$$\alpha_0 = 100 \frac{1}{1 + 7,52} = 11,75$$

## Exemple3 : cas de (GPL)

Combustible	Pourcentage volumiques des éléments constituant le combustible							Densité Kg/m <sup>3</sup>
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	
Butane commercial	3,2	-	-	6,1	21,8	68,6	0,3	2,6
Propane commercial	0,5	2	30	65,5	-	2	-	1,98

Selon cette composition, calculons les paramètres suivants:

- La quantité d'air nécessaire à la combustion de 1 m<sup>3</sup> de butane commercial
- Le volume de fumées dégagé lors de la combustion 1 m<sup>3</sup> de butane commercial
- La teneur maximale en dioxyde de carbone qu'on peut retrouver dans les fumées sèches

Refaire les mêmes questions pour le propane

# Ordre de grandeur de la teneur maximale de CO<sub>2</sub> pour les différents combustibles

En général, le paramètre  $\alpha_0$  a les ordres de grandeurs suivants :

**Gaz naturels :**

$$11 < \alpha_0 \leq 12$$

**Le butane commercial et le propane commercial :**

$$\alpha_0 \approx 14$$

**Le fioul :**

Pr. E. 2

$$11,5 < \alpha_0 \leq 16$$

# Etude de la combustion oxydante complète

# Réaction globale d'une combustion oxydante complète

- Combustion oxydante complète?
  - Oxydante : avec un excès de comburant
  - Complète: pas d'imbrûlés (CO, H<sub>2</sub>)

# Notations

On désigne par :

$\alpha$  : la teneur du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> dans les fumées

$\delta$  : la teneur de l'azote dans les fumées

$\omega$  : la teneur de l'oxygène dans les fumées

**Les Concentrations** de ces espèces chimiques formant les fumées **ne sont pas indépendantes**

**Ces teneurs sont définies par :**

$$\alpha = 100 \frac{(CO_2)}{V_f}$$

$$\delta = 100 \frac{(N_2)}{V_f}$$

$$\omega = 100 \frac{(O_2)_{fumées}}{V_f}$$

**Ces teneurs sont  
données par les analyses**

**Ces paramètres ne sont pas indépendants :**

$$\alpha + \delta + \omega = 100$$

# Relation entre la teneur en CO<sub>2</sub> et celle de O<sub>2</sub> (cas de combustion oxydante complète)

1m<sup>3</sup> ou 1 Kg de combustible

$$\frac{\alpha}{100} V_f, \text{ CO}_2$$

$$\frac{\omega}{100} V_f, \text{ O}_2$$

$$\frac{\delta}{100} V_f, \text{ N}_2$$

+

Vexcès

$$\alpha_0 = 100 \frac{V_{CO_2}}{V_{f_0}}$$

$$\alpha = 100 \frac{V_{CO_2}}{V_f}$$

$$V_f = V_{f_0} + V_{excès}$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{V_{f_0}}{V_f} \quad \text{et} \quad V_{f_0} = V_f - V_{excès}$$

$$V_{f_0} = V_f - \left( V_f * \frac{\omega}{100} \right) \frac{100}{\tau_{O_2}}$$

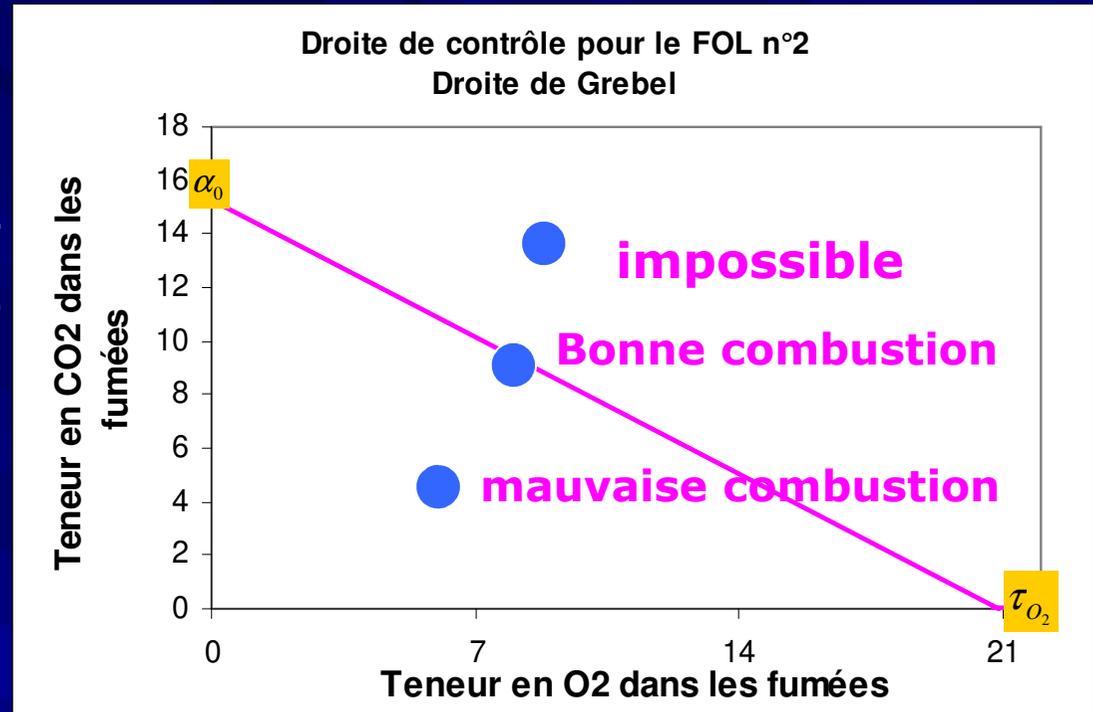
$$\frac{V_{f_0}}{V_f} = 1 - \frac{\omega}{\tau_{O_2}}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{\alpha}{\alpha_0} + \frac{\omega}{\tau_{O_2}} = 1$$



# Vérification des analyses des fumées

- La relation donnant la droite de Grebel ou la droite de contrôle pour un combustible donné est :



$$\frac{\omega}{20.9} + \frac{\alpha}{\alpha_0} = 1$$

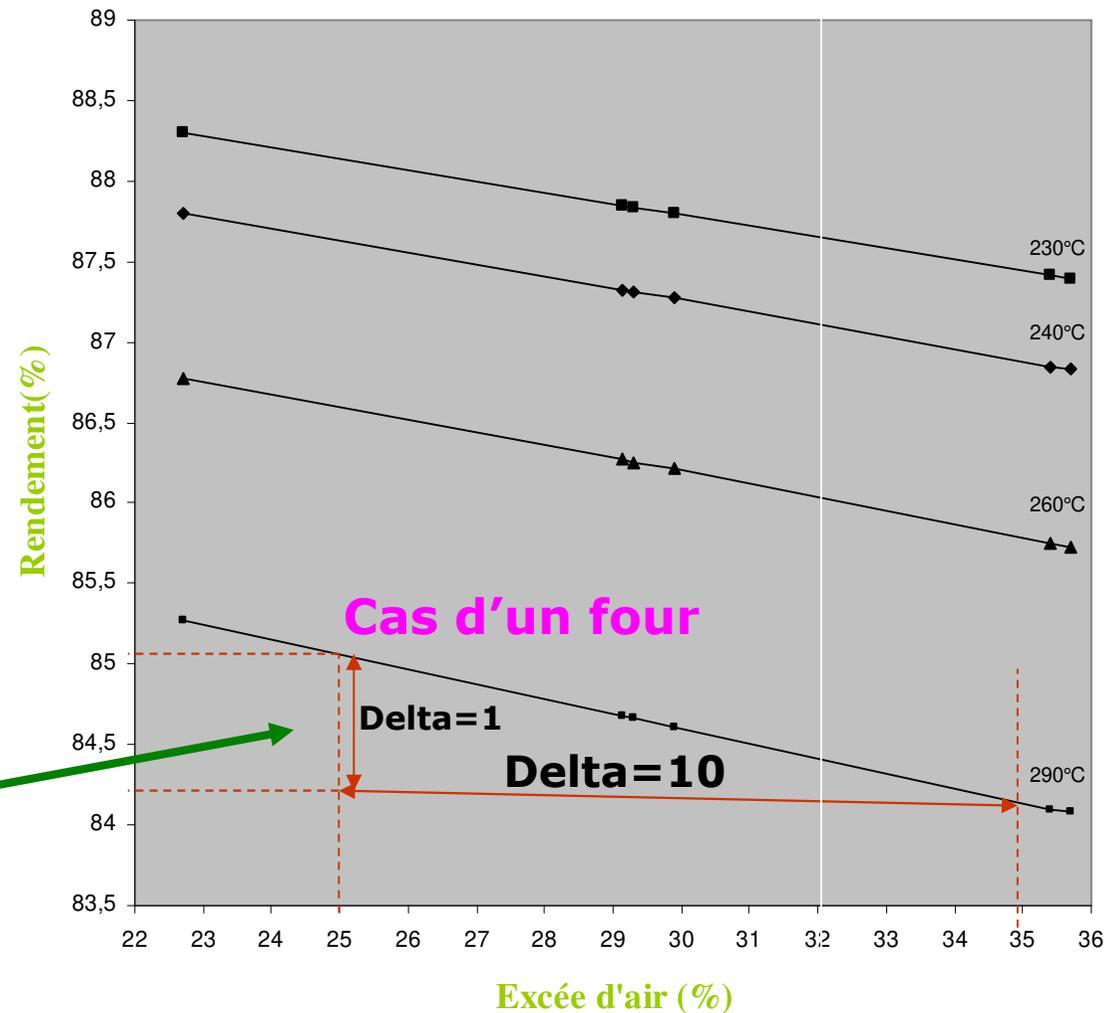
$$\omega = 100 \frac{V_{O_2}}{V_{fumées}}$$

$$\alpha = 100 \frac{V_{CO_2}}{V_{fumées}}$$

# Détermination de l'excès d'air dans le cas d'une combustion oxydante complète

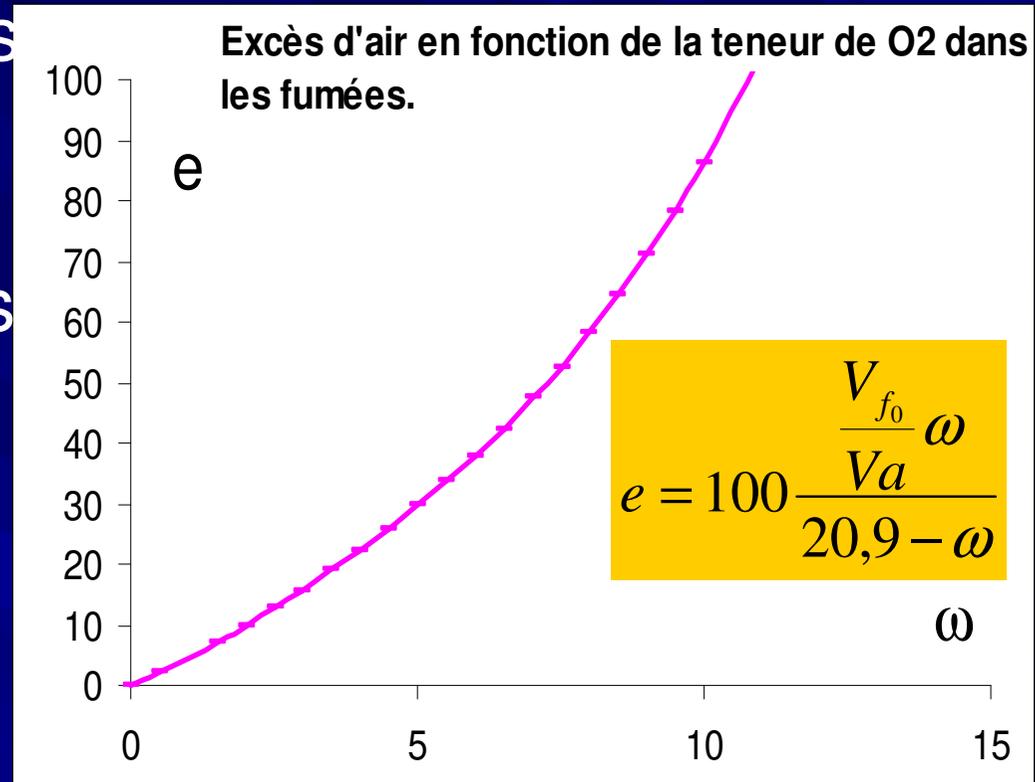
# DÉTERMINATION DE L'EXCES D'AIR

- L'excès d'air est un facteur très important du rendement.
- On peut retenir que **+10 %** d'excès d'air entraîne une perte de rendement d'environ **1%** du four.



# Détermination par le dosage de O<sub>2</sub> dans les fumées

L'échantillon de fumées récupéré à la sortie de la cheminée est refroidi et passé dans un analyseur continu qui donne la teneur en oxygène



Moyennant la courbe ci-dessus, on détermine le % en excès d'air.

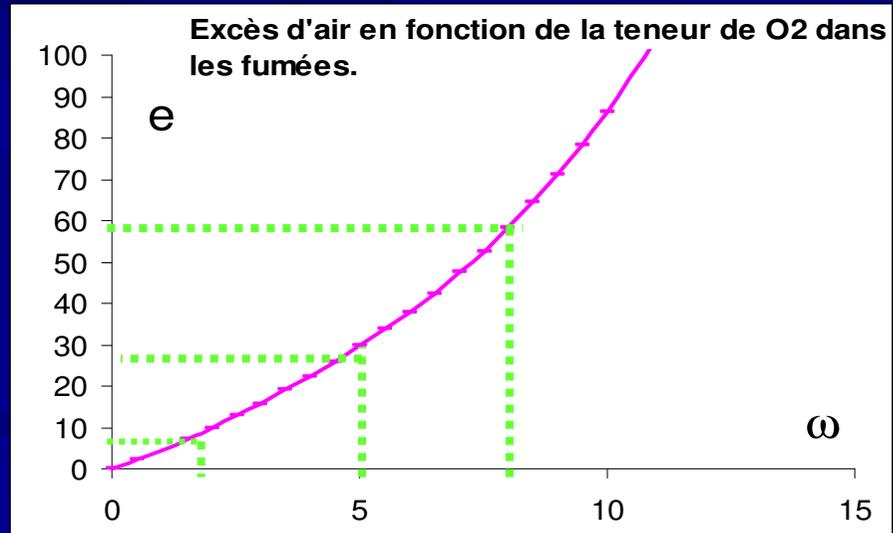
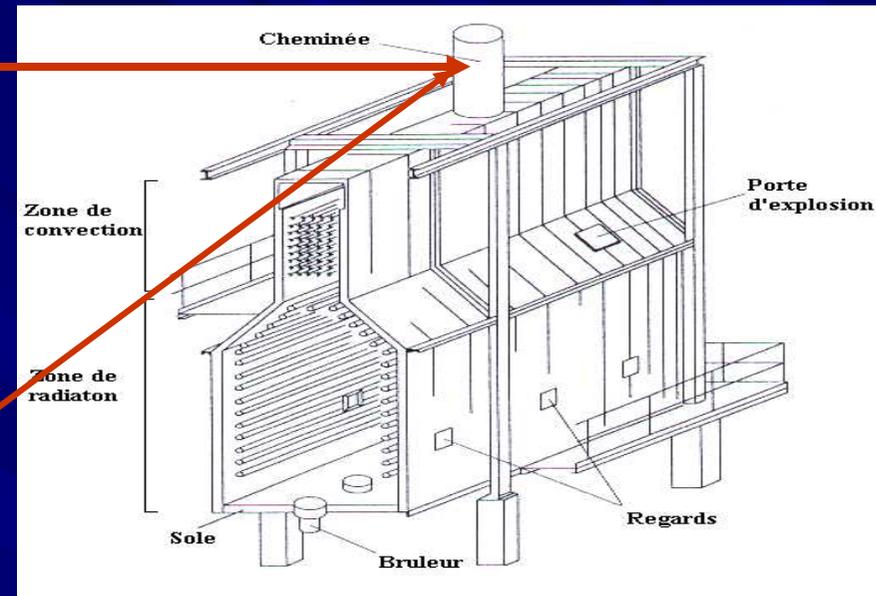
# Exemple de calcul de l'excès d'air

## ■ exemples

➤ Une teneur de 2% de  $O_2$  dans les fumées correspond à un excès d'air de  $e=10\%$

➤ Une teneur de 5% de  $O_2$  dans les fumées correspond à  $e=29,55$

➤ Une teneur de  $O_2$  de 8% correspond à un excès d'air de  $e=60$

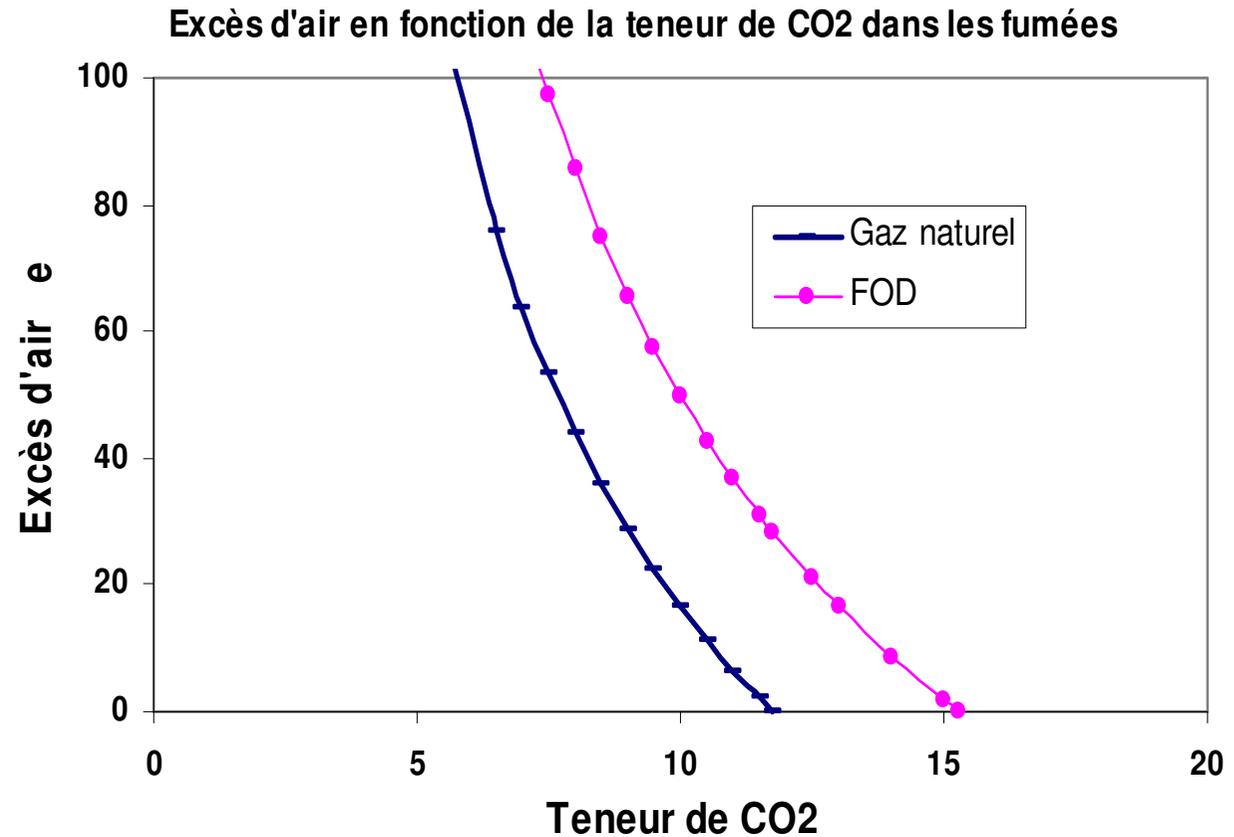


# Détermination par le dosage de $\text{CO}_2$ dans les fumées

$$e = 100 \frac{V_{f_0}}{V_a} \left( \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha} \right)$$

**Le combustible intervient par les paramètres:**

$$\frac{V_{f_0}}{V_a} \quad \text{et} \quad \alpha_0$$



# Détermination par le dosage simultané de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> dans les fumées

## ■ Exemple

combustible : le fioul lourd n°2

l'analyse des fumées :

(O<sub>2</sub>) = 4%

(CO<sub>2</sub>) = 13 %

on trouve, e=22 %

## ■ En règle générale :

- pour le gaz (e#10) par la mesure de O<sub>2</sub>;
- pour le fioul oil (e <30%) par la mesure de CO<sub>2</sub> (et par O<sub>2</sub> à faible excès d'air)
- pour le charbon (e<=60%) par l'association des deux mesures

$$e = \frac{376}{\frac{100 - (\alpha + \omega)}{\omega} - 3,76}$$

## Exercice d'application

- Une chaudière brûle un fioul dont la composition pondérale est: C=86,5; H=10,5 et S=3, Df=2400 kg/h
- L'analyse des fumées conduit au résultat suivant:
  - La teneur de CO<sub>2</sub>: 13,4
  - La teneur de O<sub>2</sub>: 2,6
- Déterminer la teneur de l'azote dans les fumées sèches
- Déterminer l'excès d'air qui correspond à ces analyses
- Déterminer les débits volumiques d'air, de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>

$$\delta + \omega + \alpha = 100 \Rightarrow \delta = 100 - (\omega + \alpha) = 100 - 2,6 - 13,4 = 84\%$$

$$e = 100 \frac{V_{f0}}{V_a} \left( \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha} \right)$$

$$\alpha_0 = ?$$

$$V_{CO_2} = \frac{0,224}{12} * C = \frac{0,224}{12} * 86,5 = 1,61$$

$$V'_{f0} (m^3 / Kg) = 0,0893 C + 0,3239 H + 0,0334 S + 0,008 N + 0,0124 E - 0,0265 O$$

$$V'_{f0} = 0,0893 * 86,5 + 0,3239 * 10,5 + 0,0334 * 3 = 11,22$$

$$V_{f0} (m^3 / Kg) = V'_{f0} - \frac{22,4}{18} \left( \frac{E}{100} + \frac{9H}{100} \right)$$

$$V_{f0} = 11,22 - \frac{22,4}{18} * \frac{9 * 10,5}{100} = 10,04$$

$$\alpha_0 = 100 \frac{V_{CO_2}}{V_{f0}} = 100 * \frac{1,61}{10,04} = 16$$

$$e = 100 \frac{V_{f0}}{V_a} \left( \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha} \right) = 100 * 0,94 * \frac{16 - 13,4}{13,4} = 18,24$$

# Débits des espèces

$$\alpha = 100 \frac{(CO_2)}{V_f} \Rightarrow (CO_2) = \frac{\alpha}{100} V_f \text{ (m}^3 \text{ / kg fioul)}$$

$$V_f = V_{f0} + \frac{e}{100} V_a$$

$$(CO_2) = \frac{\alpha}{100} \left( V_{f0} + \frac{e}{100} V_a \right)$$

$$D_{CO_2} = (CO_2) D_f = \frac{\alpha}{100} \left( V_{f0} + \frac{e}{100} V_a \right) D_f$$

# Détermination de l'excès d'air dans le cas d'une combustion incomplète

# Réaction globale d'une combustion incomplète

- Combustion **oxydante incomplète**?
  - Oxydante : avec un excès de comburant
  - incomplète: présence d'imbrûlés (CO, H<sub>2</sub>)
- Combustion **réductrice incomplète**?
  - réductrice : avec un défaut de comburant
  - incomplète: présence d'imbrûlés de O<sub>2</sub>

# Notations

On désigne par :

$\beta$  : la teneur du monoxyde de carbone CO dans les fumées

$h$  : la teneur de l'hydrogène dans les fumées

**Les Concentrations** de ces espèces chimiques formant les fumées **ne sont pas indépendantes**



**Ces teneurs sont définies par :**

$$\beta = 100 \frac{(CO)}{V_f}$$

$$h = 100 \frac{(H_2)}{V_f}$$

**Ces teneurs sont  
données par les analyses**

**Ces paramètres ne sont pas indépendants :**

$$\alpha + \beta + \delta + \omega + h = 100$$

**Lorsque la combustion est quelconque  
(on connaît le combustible utilisé)**

■ **on détermine l'excès d'air par :**

$$\frac{e}{100} = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad \leftarrow \text{à définir}$$

où  $\phi$  est un paramètre déterminé à partir :

- **des analyses des fumées**
- **des analyses du combustible (si cette analyse est disponible)**

$\phi$  est donnée par :

$$\phi = \frac{7,91 \left[ 5,36 \left( \alpha + \beta + \sum n \gamma \right) + C_L \right] V_a}{C \delta}$$

avec :

$C_L$  : est en g/m<sup>3</sup> désigne la concentration des du carbone libre dans les cendres

$C$  : le pourcentage du carbone dans le combustible

$\gamma$  : La teneur de l'hydrocarbure  $C_nH_m$

# Exemple de calcul

- Exemple 1 :
- L'analyse des fumées issues de la combustion du FOD conduit au résultat suivant :

*H<sub>2</sub> : 4,6*  
*O<sub>2</sub> : 0,3*  
*N<sub>2</sub> : 77,2*  
*CH<sub>4</sub> : 0,4*  
*C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : 0,4*  
*CO : 7*  
*CO<sub>2</sub> : 10,1*  
*CL = 18 g/m<sup>3</sup>*

*h = 4,6*  
*ω = 0,3*  
*δ = 77,2*  
*γ<sub>1</sub> = 0,4*  
*γ<sub>2</sub> = 0,4*  
*β = 7*  
*α = 10,1*

*φ = 1,59*

## Exemple 2

on considère une combustion utilisant un combustible contenant 84% de carbone et ayant un pouvoir comburivore de 11,7 m<sup>3</sup> d'air/Kg. L'analyse des fumées conduit au résultat suivant:

CO<sub>2</sub>: 13 %, O<sub>2</sub>: 1,8%, CO: 0,2%

- 1) S'agit-il d'une combustion oxydante ou réductrice?
- 2) S'agit-il d'une combustion complète ou incomplète?

**On trouve :**

$$\phi = 0,92$$

**il s'agit donc d'une combustion oxydante incomplète qui se fait avec un excès d'air de 8,69%**

Lorsque la combustion est quelconque  
(on ne connaît pas le combustible utilisé)

■ on détermine l'excès d'air par :

$$\frac{e}{100} = \frac{1 - \phi}{\phi}$$

Avec

$$A = \frac{\beta}{2} + \frac{h}{2} + \frac{2,24}{12} C_L + \sum_{i = \text{hydrocarbu}} (n + \frac{m}{4})_i \gamma_i$$

**Exemple :**

**Analyse des fumées conduit au résultat suivant :**

**$H_2 : 4,6$**

**$O_2 : 0,3$**

**$N_2 : 77,2$**

**$CH_4 : 0,4$**

**CL = 18 g/m<sup>3</sup>**

**$CO : 7$**

**$CO_2 : 10,1$**

**$C_3H_8 : 0,4$**

**On trouve:  $\phi = ?$**

**Il s'agit d'une combustion avec défaut d'air**

# Rendement global

Pour porter un jugement sur ce bilan, on définit le rapport  $R_g$  :

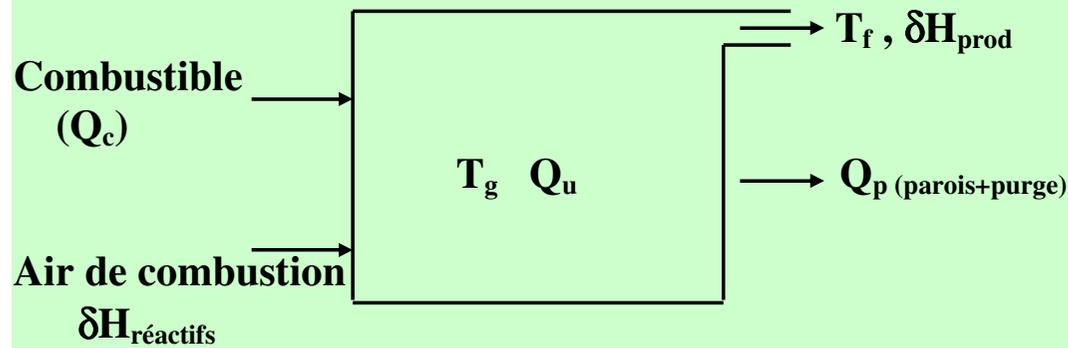
$$R_g = \frac{Q_u}{Q_e}$$

chaleur transmise à la charge (vapeur)

chaleur introduite dans le foyer

appelé rendement global de l'unité thermique

- Ce rapport, d'apparence trompeusement simple, dépend de plusieurs paramètres et en particulier, de la nature du combustible.



Chaleur apportée par le combustible + énergie sensibles du combustible et de l'air de combustion

$$Q_c + \left[ \Delta H_{\text{Reactiv}} \right]_{T_0}^{T_1} = Q_u + \left[ \Delta H_{\text{produits}} \right]_{T_0}^{T_f} +$$

*Pertes (parois + imbrûlés + purge)*

**Qu** : chaleur utile transmise à la charge (vapeur)

- pertes par chaleur sensible des fumées

- Qpertes**
- pertes par les parois : rayonnement + convection
  - pertes par des imbrûlés
  - purge
  - pertes par chaleur sensible des cendres

## Le rendement de la combustion

On définit aussi le rendement de combustion par:

$$\eta_c = \frac{Q_e - \text{Pertes (fumées)}}{Q_e}$$

## Comment estimer ces pertes par fumées? (suite)

$$Pertes(\% Q_c) = K \frac{T_f - T_a}{\alpha}$$

avec **K** une constante qui dépend du combustible et de l'excès d'air. Mais on peut prendre :

**K=0,5** pour les GPL

**K=0,6** pour les fiouls oil

**K=0,7** charbons

# Comment estimer ces pertes par fumées? (suite)

■ On peut **aussi** calculer les pertes par les fumées par:

■  $Pertes(fumées) = \sum D_k \Delta h_k$

■ Avec

–  $D_k$ : Débit de l'espèce k

–  $\Delta h_k$ : différence d'enthalpie de l'espèce k  
(donnée par Janaf)

## Exemple d'estimation des pertes par l'énergie sensible des fumées

### ■ Exemple:

- Combustible : **Fioul lourd n°2**
- Teneur en **(CO<sub>2</sub>)** dans les fumées : **11%**
- **Température des fumées** à la sortie de la cheminée **T<sub>f</sub>=300°C**

### ■ Calculer le rendement de combustion

### ■ Réponse

- les pertes(%PCI)= $0,6(300-25)/11 = 15\%$  PCI
  - Le rendement de la combustion est donc :

$$\eta_c = \frac{PCI - 0,15PCI}{PCI} = 85\%$$

# Pertes par imbrûlés

- Pertes par imbrûlés HC ou par **combustion incomplète** se composent de:

- **imbrûlés solides:**

- perte par carbone dans **les suies**

- **imbrûlés gazeux:**

- **hydrogène;**
- **CO;**
- **hydrocarbures HC**

## Pertes par imbrûlés (suite)

- Les **pertes** correspondant à ces **imbrûlés** peuvent être calculées par:

$$Pertes(imbrûlés) = \sum_{imbrûlés} D_i PCI_i$$

- Avec:
- $D_i$ : le débit de l'imbrûlé
- $PCI$ : le pouvoir calorifique inférieur

# Pertes par parois du générateur thermique (cas de chaudière)

- Ces pertes par rayonnement et convection externe, **proportionnelles à l'enveloppe extérieure** de la chaudière, diminuent en valeur relative quand la puissance de la chaudière s'accroît.
- **Pour une chaudière donnée**, elles restent constantes en valeur absolue, indépendamment de l'allure, puisque la température des parois (écrans tubés) ne varie pratiquement pas.

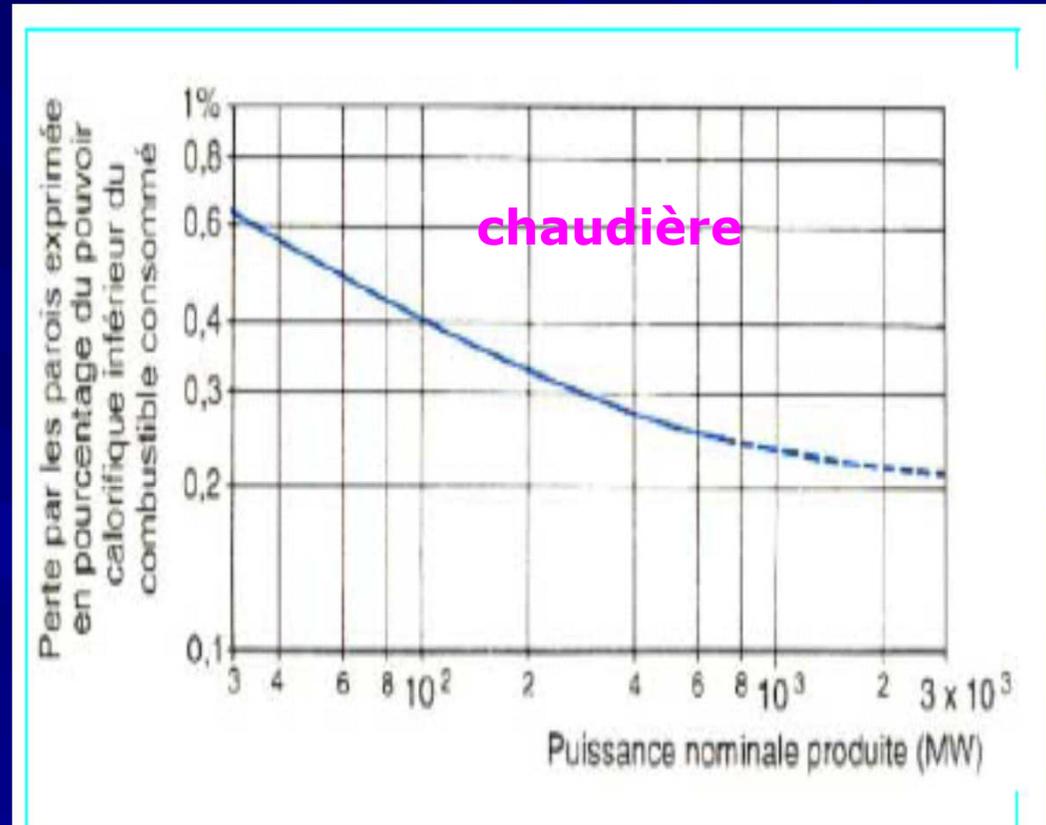


Figure 6 - Évaluation conventionnelle de la perte par les parois  
(d'après NF E 32-131)

## Pertes par parois (cas de fours)

- Les pertes par les parois du **four** sont dues aux **imperfections** de **l'isolation thermique** par les matériaux réfractaires.
  - Dans le cas des fours **récents** de grande puissance thermique elles représentent **1% à 2 %** de chaleur libérée aux brûleurs (entrée)
  - Elles peuvent être **beaucoup plus importantes** dans le cas de **fours anciens** dont le réfractaire est défectueux.

# Rendement global

- D'où
- **$Q_u = Q_e$  - toutes les pertes**
- **Ainsi** on peut calculer le rendement du générateur thermique:

Pour porter un jugement sur ce bilan, on définit le rapport  $R_g$  :

$$R_g = \frac{Q_u}{Q_e}$$

chaleur transmise à la charge (vapeur)

chaleur introduite dans le foyer

# Exercice

On considère un butane commercial dont la composition volumique est :  
C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> : 3,2 %, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : 6,1 %, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> : 21,8 %, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> : 68,6 % et  
C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> : 0,3 %

- 1- Quel serait le volume nécessaire à l'oxydation neutre de 1 m<sup>3</sup> de ce gaz
  - 2- Quel serait le volume des fumées sèches dégagées lors de la combustion neutre de 1 m<sup>3</sup> de ce gaz
  - 3- Calculer la teneur maximale en CO<sub>2</sub> qu'on pourrait retrouver dans les fumées lors d'une combustion neutre
- 
- 4- Calculer le volume des fumées lors d'une oxydation complète avec un excès d'air de 20 %
  - 5- Les fumées sortent à une température de 127 °C, calculer les pertes d'énergie occasionnées par l'énergie sensible des fumées. Calculer la contribution( en %) de l'azote à cette perte d'énergie. Conclure.
  - 6- Refaire la question (5) pour une température des fumées de 227 °C – Conclure
  - 7- Calculer ces pertes d'énergie par fumées pour deux valeurs d'excès d'air  $e=20\%$  et  $e=30\%$  pour une température des fumées de 127 °C – Conclure
  - 8- Calculer le rendement de combustion dans les conditions de la question 6