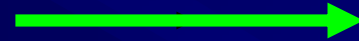


COMBUSTION & DYNAMIQUE DES GAZ

INTRODUCTION

Actuellement le besoin
mondial



* 95% potentiel chimique(Pétrole)

* 3,5% l'énergie hydraulique

* 1,5 % Nucléaire

Potentiel

processus



- énergie électrique

Chimique

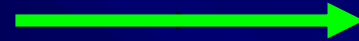
combustion

- énergie mécanique

- énergie calorifique

INTRODUCTION: Aspect positif

Actuellement le besoin
mondial



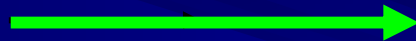
* 95% potentiel chimique(Pétrole)

* 3,5% l'énergie hydraulique

* 1,5 % Nucléaire

Potentiel

processus



- énergie électrique

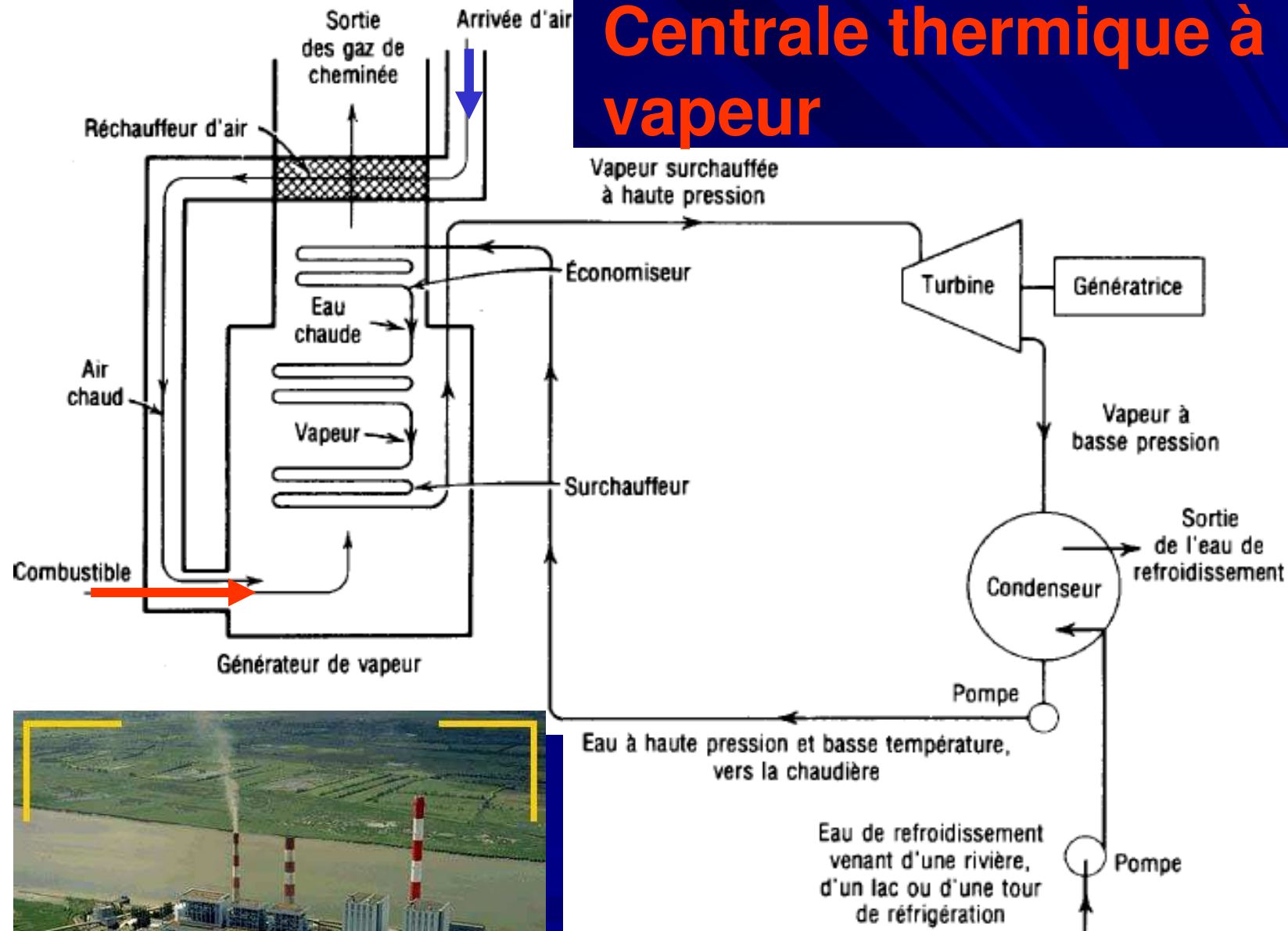
Chimique

combustion

- énergie mécanique

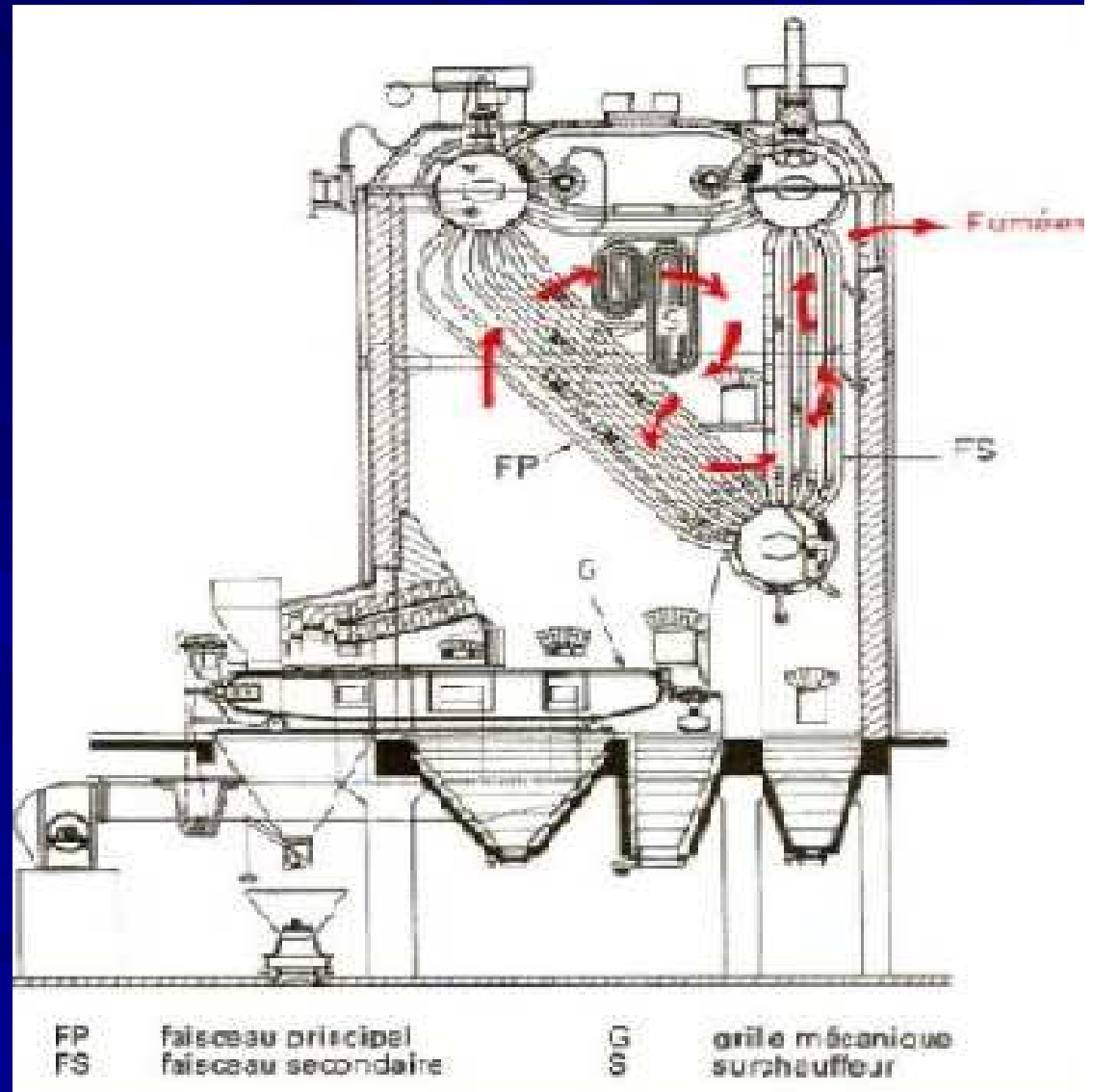
- énergie calorifique

Centrale thermique à vapeur

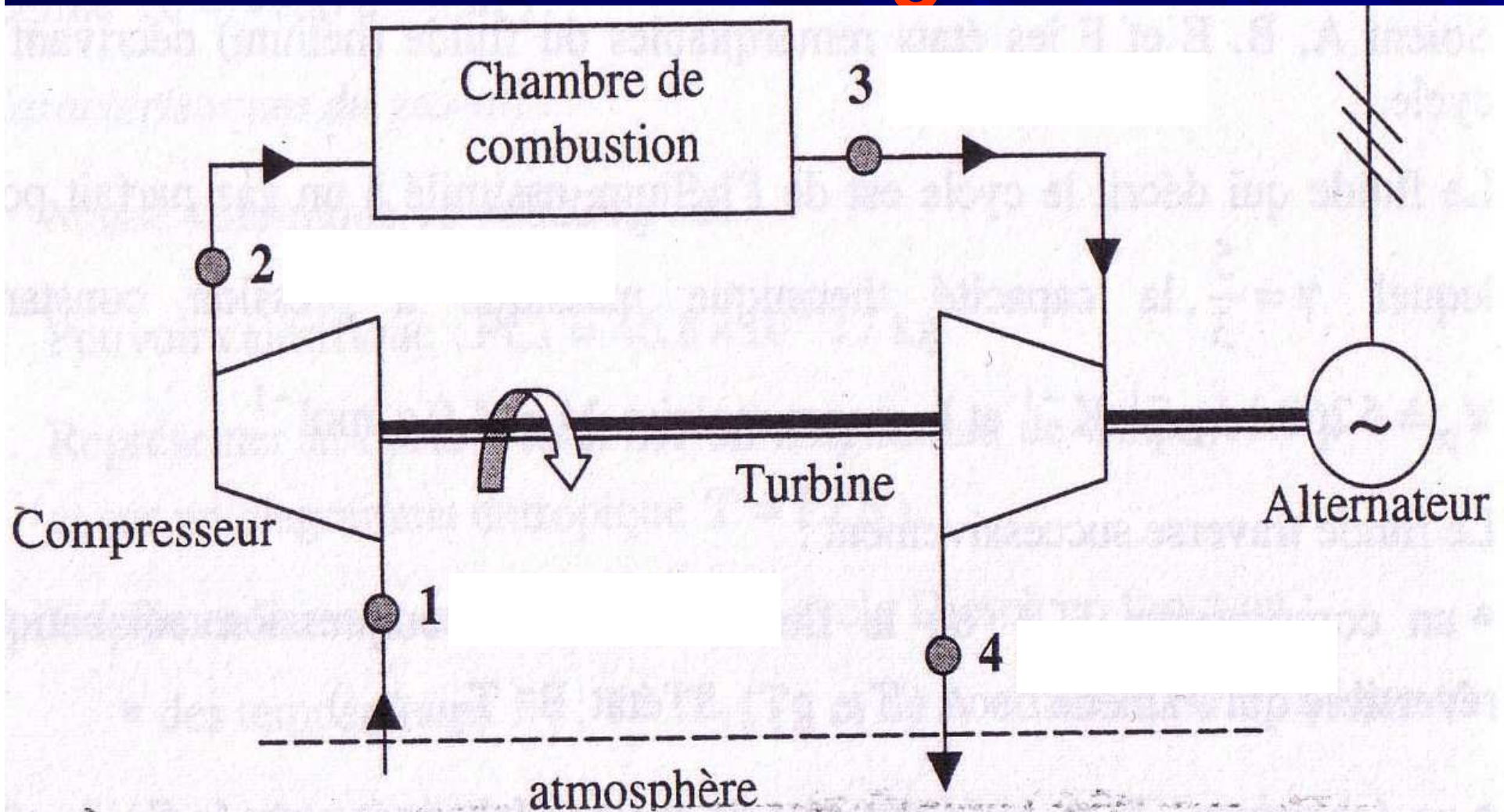


Chaudière à tubes d'eau

- 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

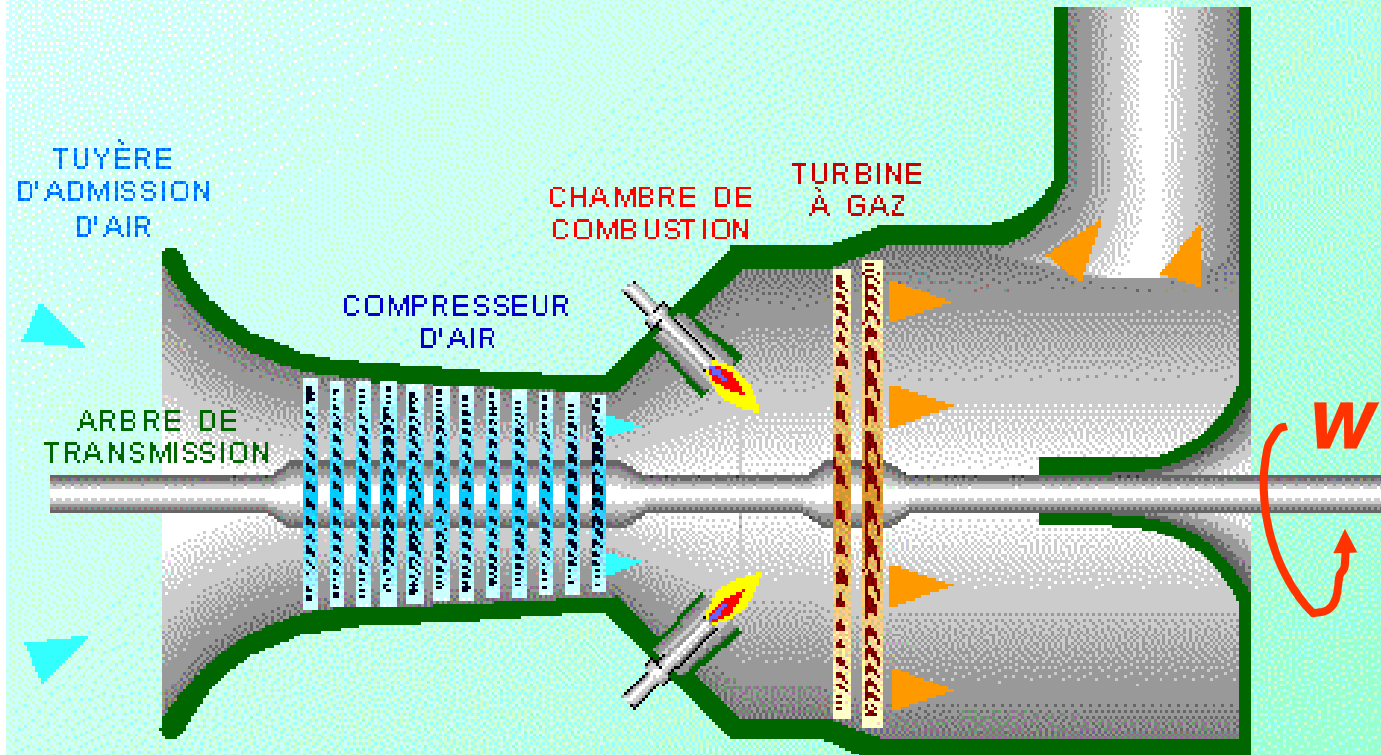


Remarques: Le travail nécessaire à l'entraînement du compresseur peut atteindre **50% du travail produit au niveau de la turbine**

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

PRINCIPE D'UNE TURBINE À GAZ

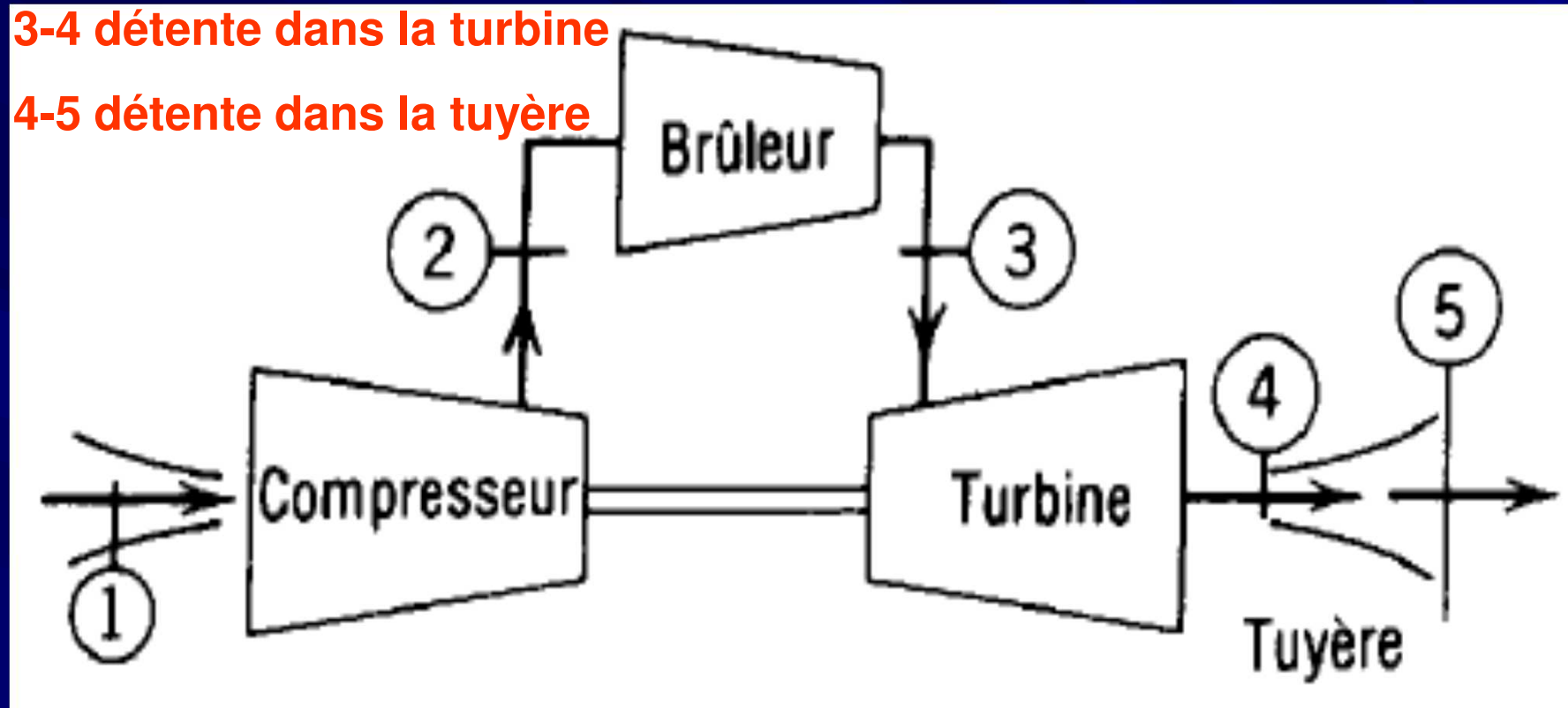
T° peut atteindre
500°C
ECHAPPEMENT



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

Source : Intergovernmental Panel on climate change

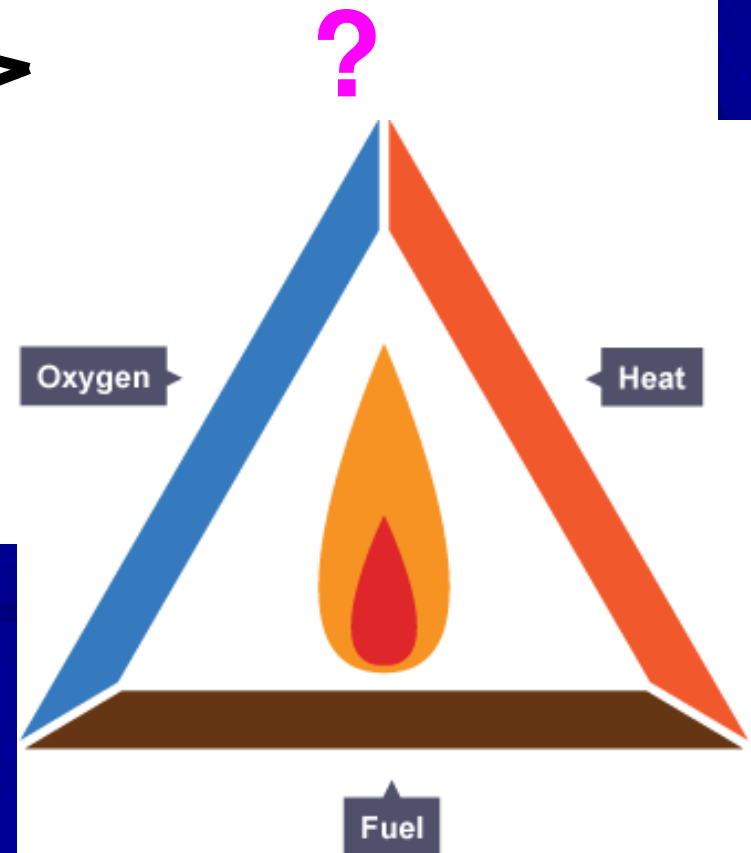
Quelles sont les conditions pour avoir une combustion?

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}

CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀

■ **Les cyclanes :** C_nH_{2n}

C₅H₁₀ : le cyclopentane

C₆H₁₂: les cyclohexane

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

Éthylène: C₂H₄

Isobutène: C₄H₈.

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

méthane	CH₄	:	95,3%	(principal constituant)
éthane	C ₂ H ₆	:	3,4%	
propane	C ₃ H ₈	:	0,7%	
butane	C ₄ H ₁₀	:	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 ³
	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	
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

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 m³ (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:

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

ΔH_{fj} : enthalpie de formation (tables de **Janaf**)

Exemple de réactions de formations

- La réaction de formation de H_2O :



- La réaction de formation de CO_2 :



- La réaction de formation de CO :



- **Remarque:**



Enthalpie de formation

TABLE 5.3 Standard Enthalpies of Formation, ΔH_f° , at 298 K

Substance	Formula	ΔH_f° (kJ/mol)	Substance	Formula	ΔH_f° (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>$CH_4(g)$</u>	-74.8
Calcium oxide	$CaO(s)$	-635.5	Methanol	$CH_3OH(l)$	-238.6
Carbon dioxide	<u>$CO_2(g)$</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>$H_2O(g)$</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	θ
		Exprimées en volume dans l'air (%)		Inflammation (°C)
Hydrogène	H ₂	4,0	74,5	570
Oxyde de carbone	CO	12,5	74	630
Méthane	CH ₄	5,0	15,0	580
Propane	C ₃ H ₈	2,25	9,4	480
<i>n</i> - et isobutane	C ₄ H ₁₀	1,85/1,8	8,4	420/480
<i>n</i> - et néopentane	C ₅ H ₁₂	1,45/1,4	7,8/7,5	(290)/450
Heptanes	C ₇ H ₁₆	(1,10)	6,7	(220)
<i>n</i> - octane	C ₈ H ₁₈	(1,0)	(6)	(240)
Isooctane	C ₈ H ₁₈	(1,0)	(6)	(670)
Ethylène	C ₂ H ₄	(3,1)	(32)	520
Propylène	C ₃ H ₆	(2,2)	10,5	460
Butène-1	C ₄ H ₈	1,6	9,35	385
Butène-2	C ₄ H ₈	1,8	9,7	435
Butadiène	C ₄ H ₆	2,0	11,5	420
Acétylène	C ₂ H ₂	2,5	(81)	320
Benzène	C ₆ H ₆	1,4	(7,1)	(620)
Toluène	C ₆ H ₅ CH ₃	(1,4)	(6,7)	(585)
Naphtalène	C ₁₀ H ₈	(0,9)	(5,9)	575
Méthanol	CH ₃ OH	(6,7)	(36)	(510)
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	(3,3)	(19)	(490)
Acétaldéhyde	CH ₃ CHO	4,0	56	230
Acétone	CH ₃ COCH ₃	(2,6)	12,8	(560)

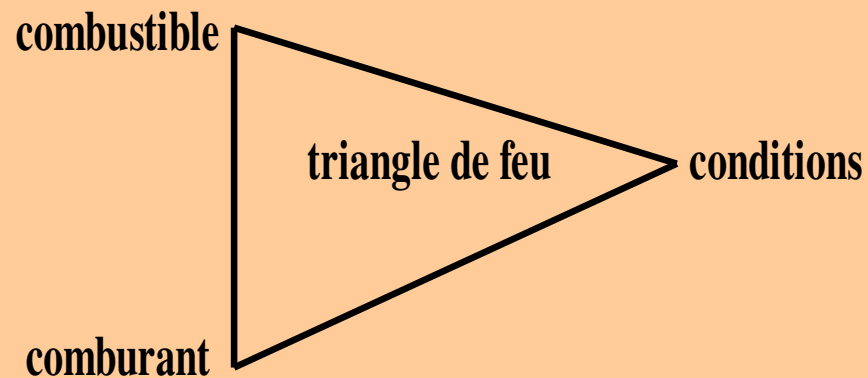
Ce tableau est tiré du volume : Oxydations et Combustions, de A. Van Tiggelen, Tome I,

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 % (CO₂, Krypton...)
 - Composition en % **massique**:
 - Azote: 77%
 - Oxygène: 23
- la densité est **1,29 Kg/m³** 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'O₂, 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 m³ 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 stœchiométrie 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 :
 - $Va=(1+x)*(n+m/4)$ 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:

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

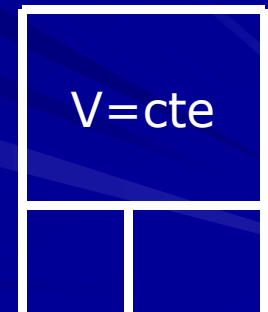
C/C:

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,

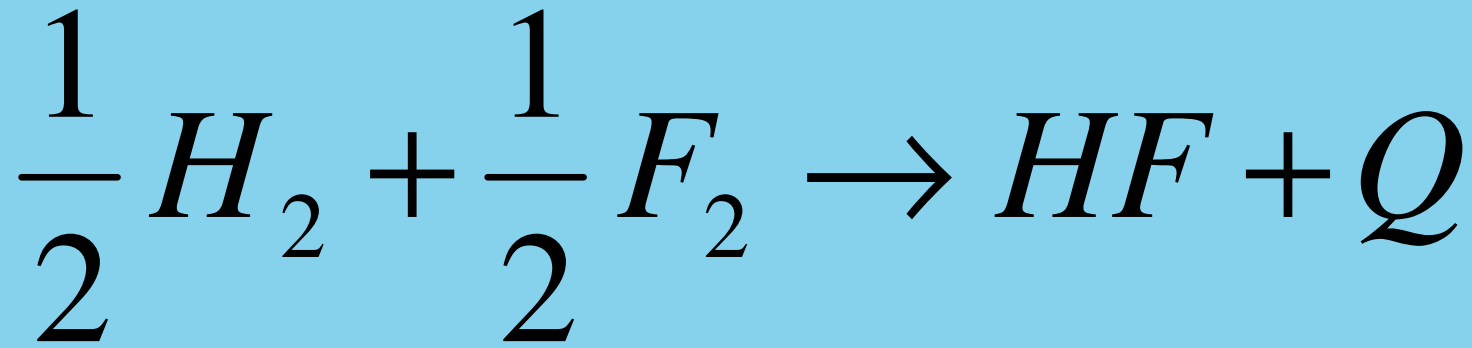
$$Q_p = \Delta H$$

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**;

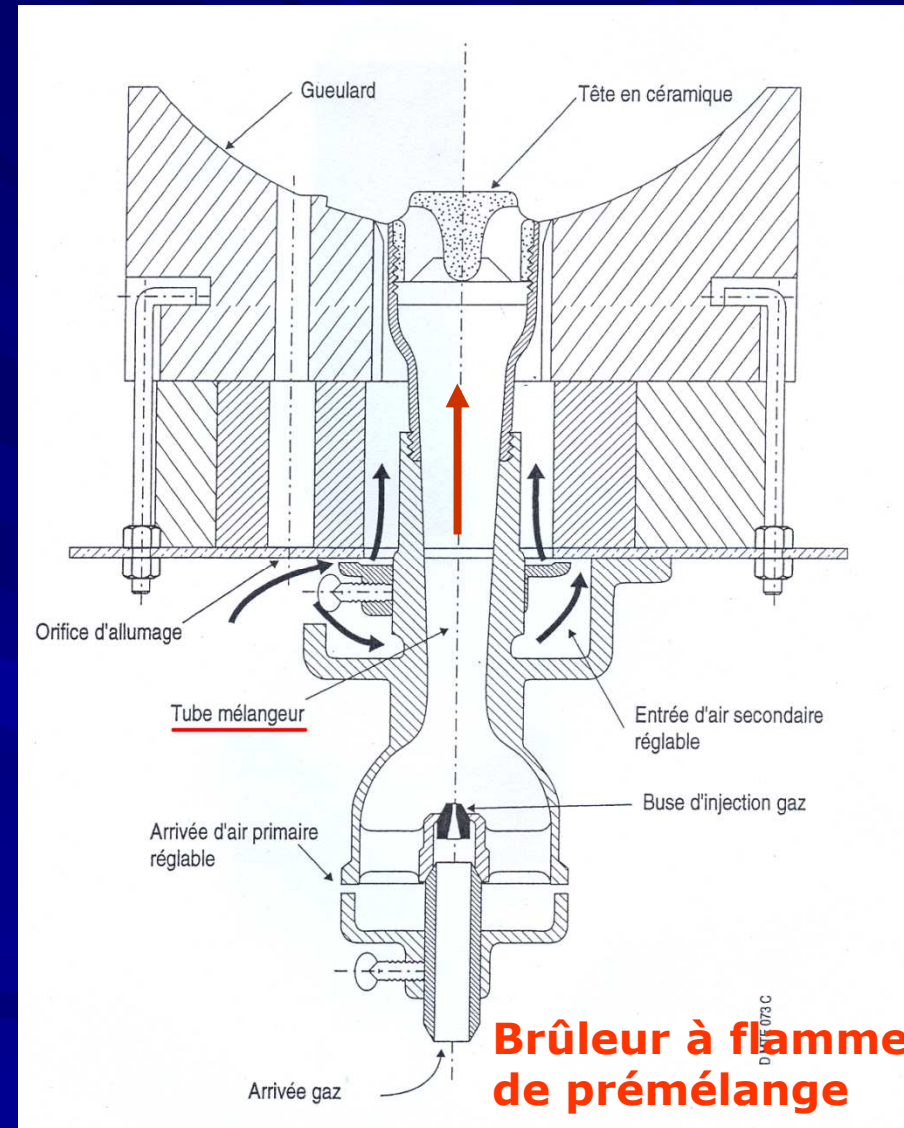
– Flamme de **diffusion**

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

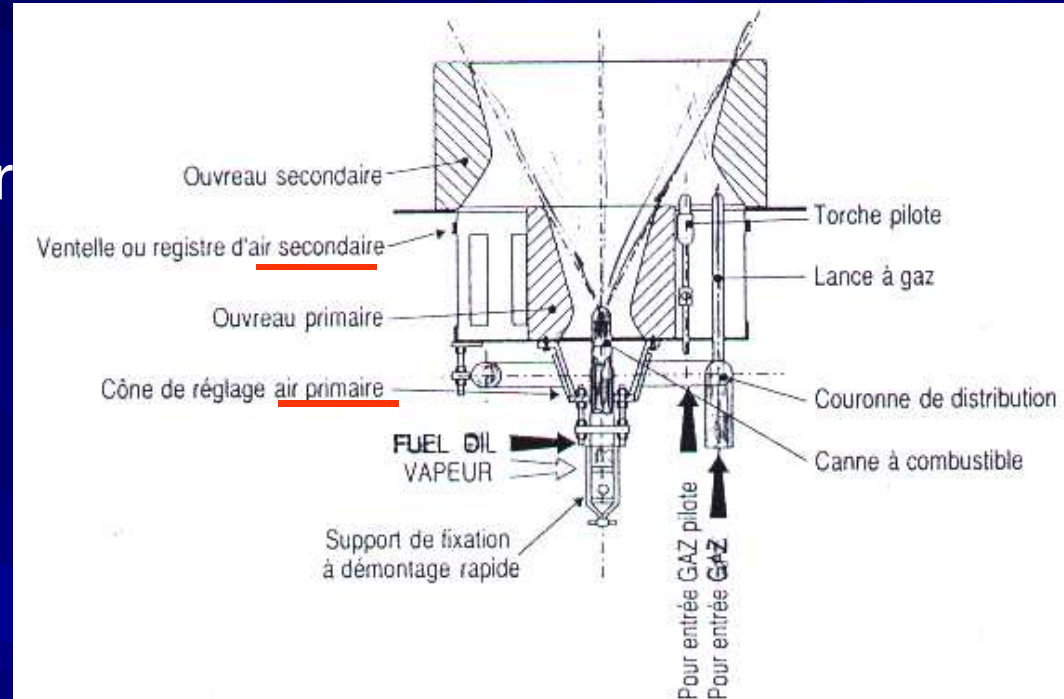


Flamme de diffusion

- 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** :
 - CO_2 , H_2O , SO_2 : oxydation de C, H et S
 - CO , H_2 : imbrûlés
 - O_2 : excès d'air ou combustion incomplète
 - NO_x : oxydation de l'azote
 - 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

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

Le pouvoir comburivore

Définition:

Le pouvoir comburivore est le volume d'air nécessaire à la combustion **complète** et **stoechiométrique** d'un m³ 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

Fl. E. AFFAD

Oxygène relatif à la combustion stoechio de chaque constituant du gaz

Fl 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 m³ 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:

$$V'_{f0} = (\text{CO}_2) + (\text{N}_2) + (\text{SO}_2) + (\text{H}_2\text{O})$$

➤ le pouvoir **fumigène sec** V_{f0} comme étant le volume: $V_{f0} = (\text{CO}_2) + (\text{N}_2) + (\text{SO}_2)$

➤ **Exemple: pour le méthane?**



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

$V_{f0} = 1 + 7,52 + 0 = 8,52 \text{ m}^3$ de fumées sèches/ 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
Total (m^3)	236,48		160,53	151,2	0,35

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 m³ de CO₂
- 1,51 m³ d'eau
- 0,0035 m³ de SO₂
- 8,95 m³ de N₂

Soit

■ un total de : 12,014 m³ / 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 m³ 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 CO₂ dans les fumées sèches

- A partir de V_{f0} et (CO_2) , on définit la teneur maximale de CO₂ 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 ³
	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	
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 m³ de butane commercial
- Le volume de fumées dégagé lors de la combustion 1 m³ 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 CO₂ pour les différents combustibles

En général, le paramètre α_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, H₂)

Notations

On désigne par :

α : la teneur du dioxyde de carbone CO₂ dans les fumées

δ : la teneur de l'azote dans les fumées

ω : 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 CO₂ et celle de O₂ (cas de combustion oxydante complète)

1m³ 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

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

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

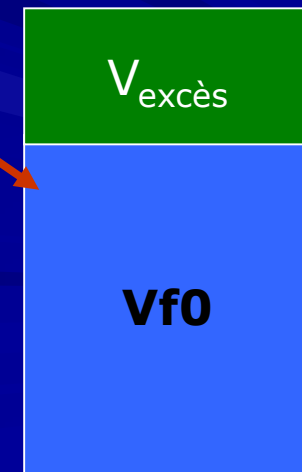
$$V_f = V_{f_0} + V_{excès}$$

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

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

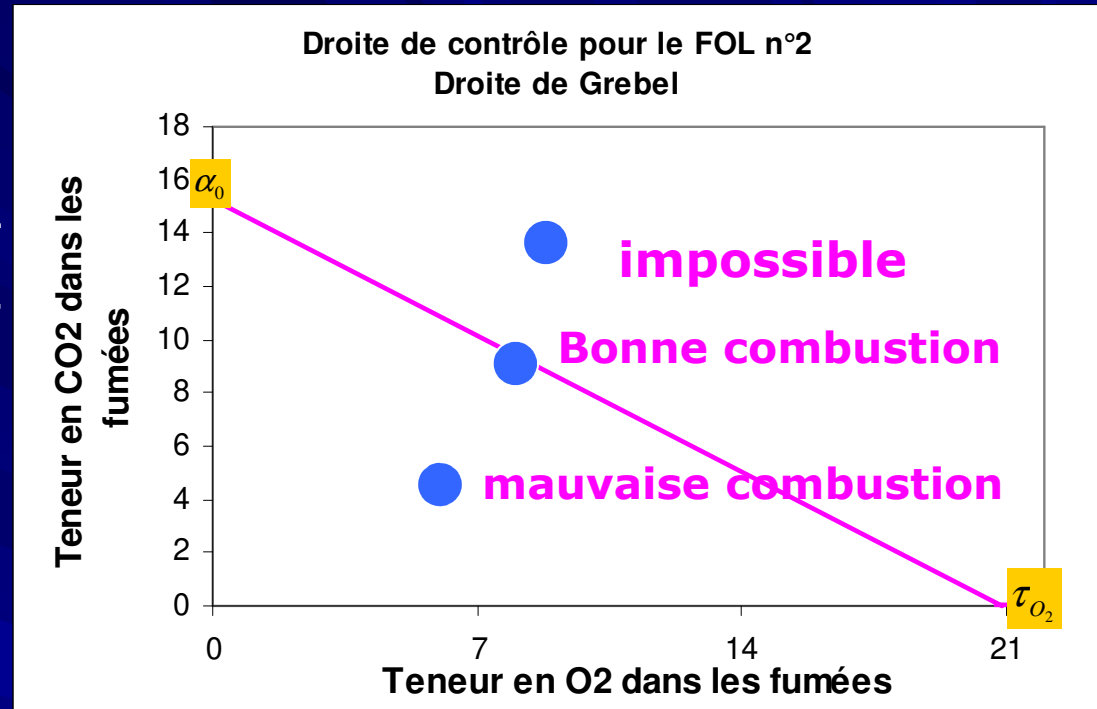
$$\frac{V_{f_0}}{V_f} = 1 - \frac{\omega}{\tau_{O_2}}$$

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



Vérification des analyses des fumées

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



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

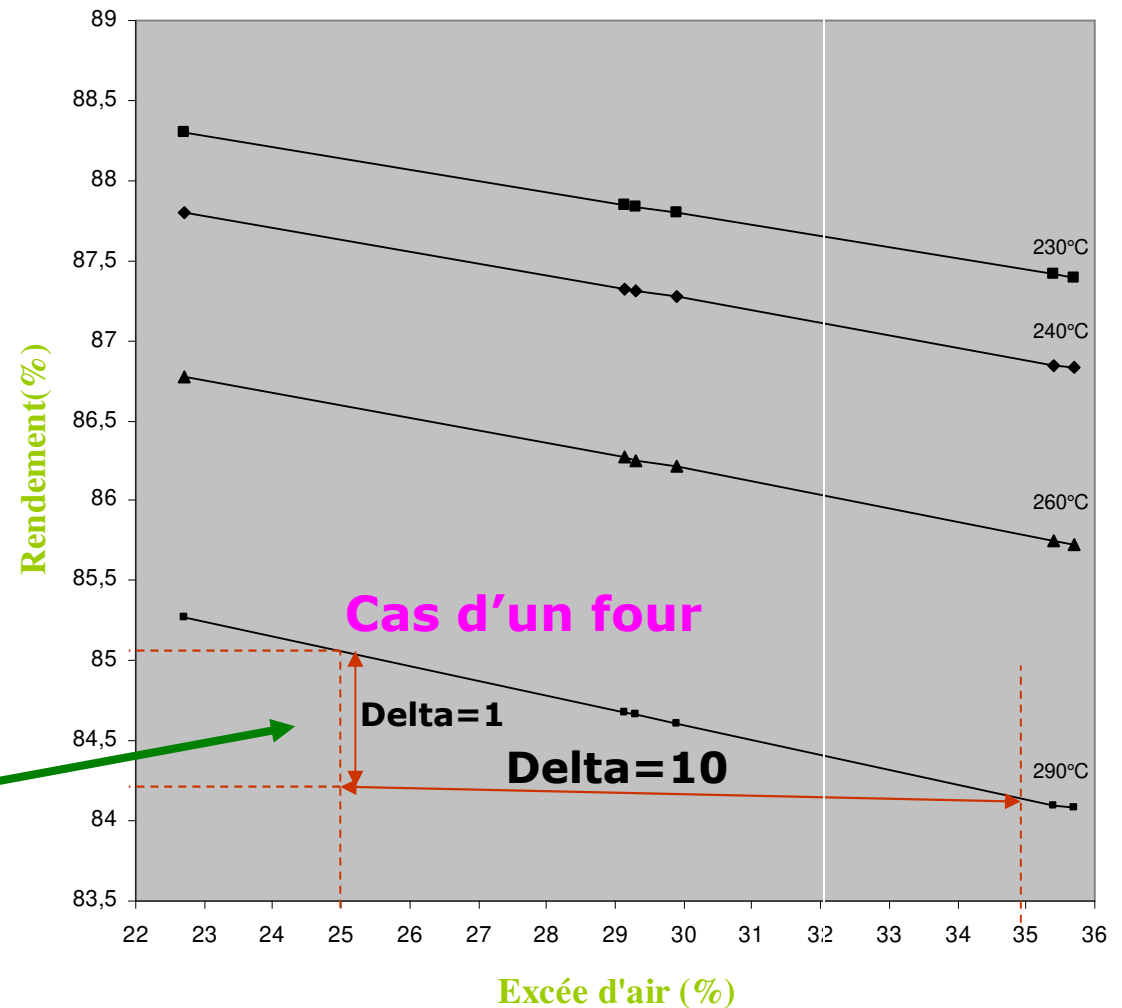
$$\omega = 100 \frac{V_{O_2}}{V_{fumées}}$$

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

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

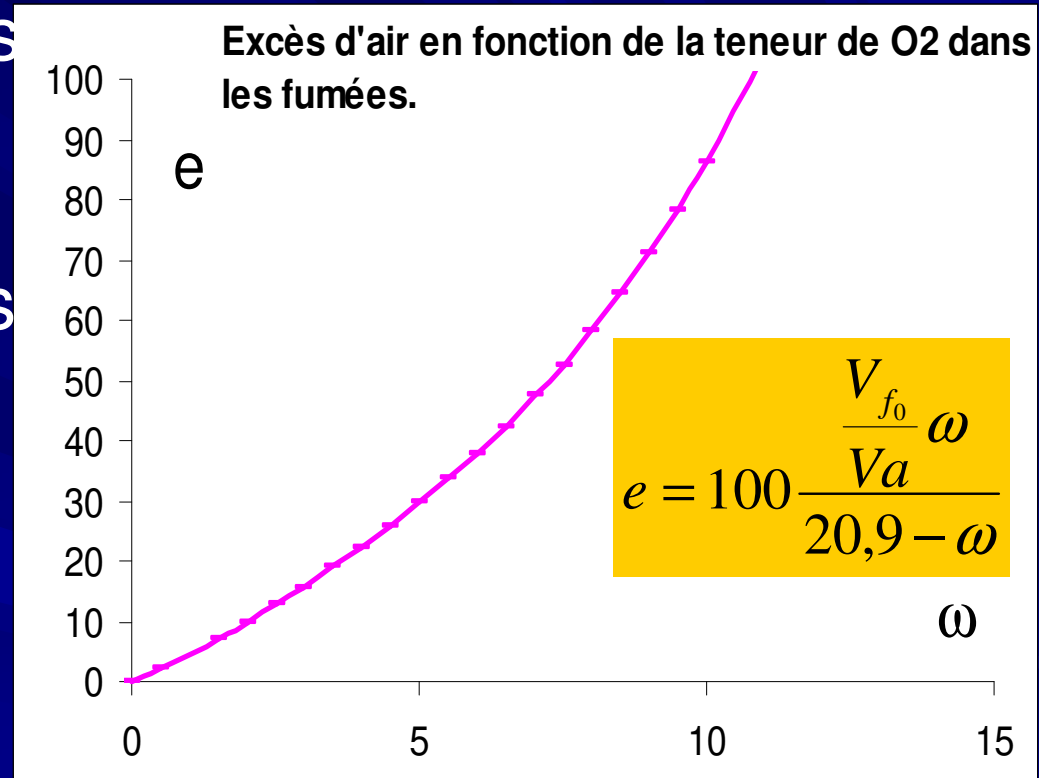
DÉTERMINATION DE L'EXCES D'AIR

- 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 O₂ 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.

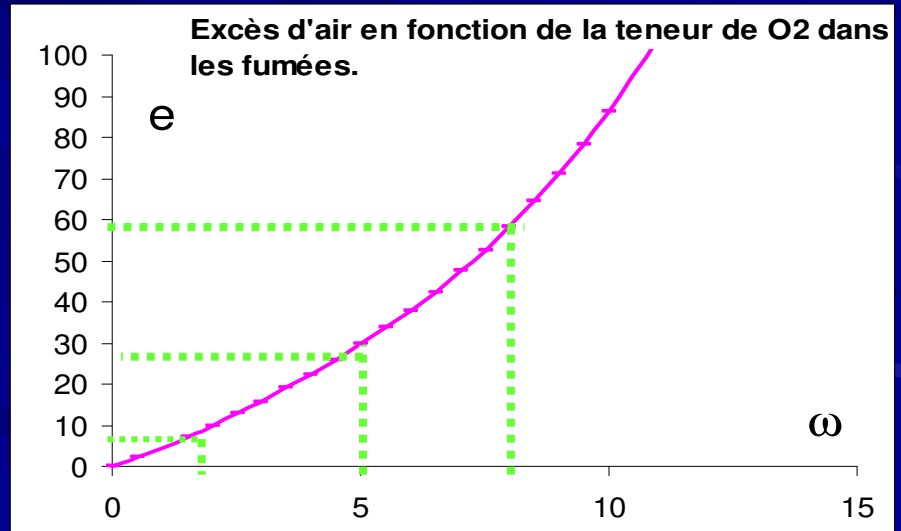
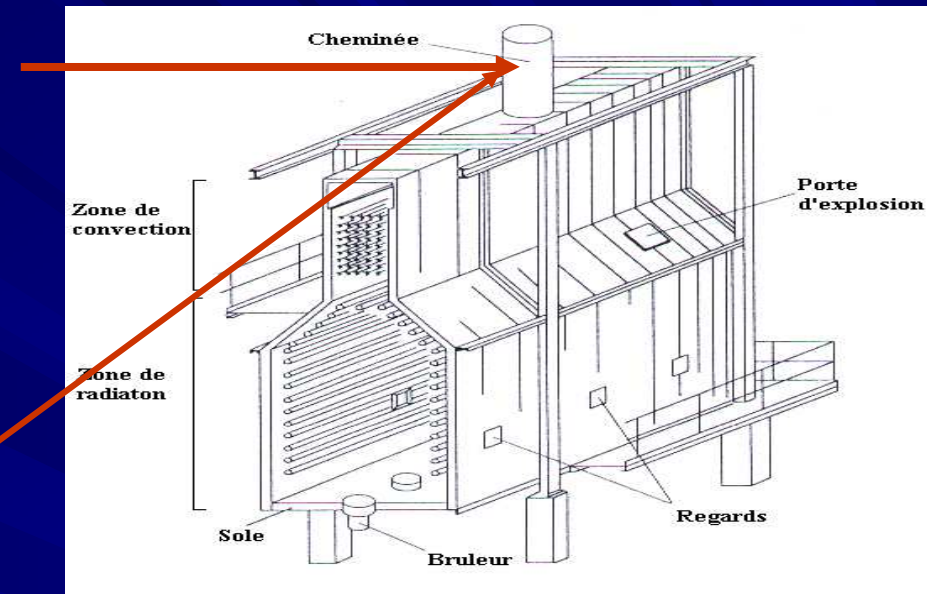
Exemple de calcul de l'excès d'air

■ 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 $e=60$

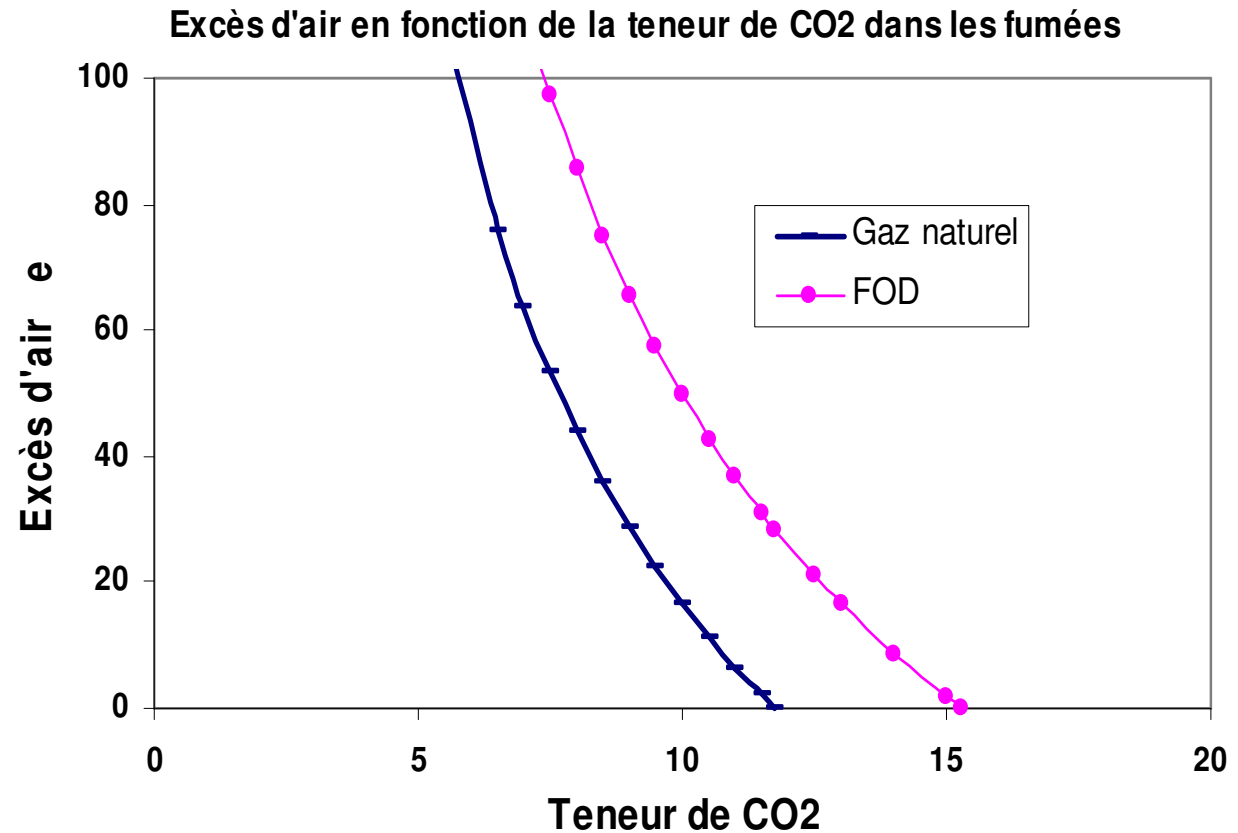


Détermination par le dosage de CO_2 dans les fumées

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

Le combustible intervient par les paramètres:

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



Détermination par le dosage simultané de CO₂ et O₂ dans les fumées

■ Exemple

combustible : le fioul lourd n°2

l'analyse des fumées :

(O₂) = 4%

(CO₂) = 13 %

on trouve, e=22 %

■ En règle générale :

- pour le gaz (e#10) par la mesure de O₂;
- pour le fioul oil (e <30%) par la mesure de CO₂ (et par O₂ 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 CO₂: 13,4
 - La teneur de O₂: 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 CO₂ et O₂

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

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

$$\alpha_0 = ?$$

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

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

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

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

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

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

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

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, H₂)
- Combustion **réductrice incomplète**?
 - réductrice : avec un défaut de comburant
 - incomplète: présence d'imbrûlés de O₂

Notations

On désigne par :

β : 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 ϕ est un paramètre déterminé à partir :

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

ϕ 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/m³ désigne la concentration des du carbone libre dans les cendres

C : le pourcentage du carbone dans le combustible

γ : 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 :

H₂ : 4,6
O₂ : 0,3
N₂ : 77,2
CH₄ : 0,4
C₃H₈ : 0,4
CO : 7
CO₂ : 10,1
CL = 18 g/m³

h = 4,6
ω = 0,3
δ = 77,2
γ₁ = 0,4
γ₂ = 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 m³ d'air/Kg. L'analyse des fumées conduit au résultat suivant:

CO₂: 13 %, O₂: 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/m³

$CO : 7$

$CO_2 : 10,1$

$C_3H_8 : 0,4$

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 :

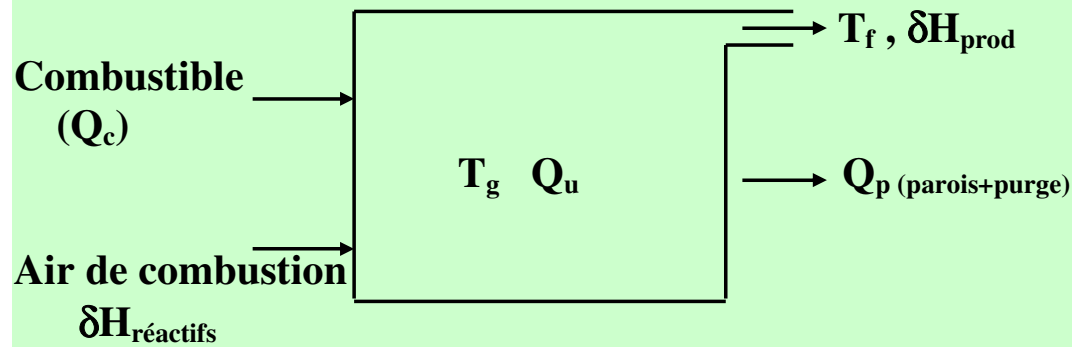
$$R_g = \frac{Q_u}{Q_e}$$

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

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

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

– Δh_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 **(CO₂)** dans les fumées : **11%**
- **Température des fumées** à la sortie de la cheminée **T_f=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.

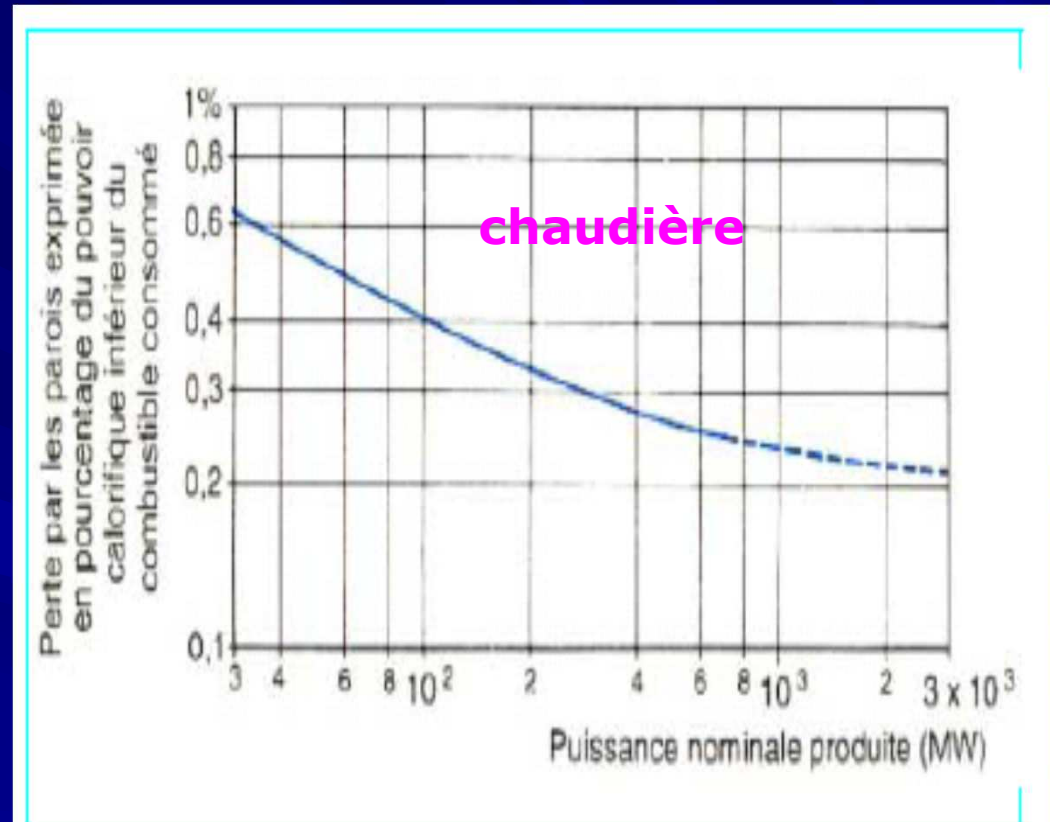


Figure 6 - Évaluation conventionnelle de la perte par les parois
(d'après NF E 32-131)

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 :
C₂H₄ : 3,2 %, C₃H₈ : 6,1 %, C₄H₈ : 21,8 %, C₄H₁₀ : 68,6 % et
C₅H₁₂ : 0,3 %

- 1- Quel serait le volume nécessaire à l'oxydation neutre de 1 m³ de ce gaz
 - 2- Quel serait le volume des fumées sèches dégagées lors de la combustion neutre de 1 m³ de ce gaz
 - 3- Calculer la teneur maximale en CO₂ 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