

## Exercices d'application sur le chapitre « Diagramme d'Ostwald »

### ■ Exercice 1 : (partie combustion du bac STI Energétique 2004)

Le générateur fioul haut-rendement est placé dans le local chaufferie prévu à cet effet. On se propose d'étudier la combustion du fioul dans les conditions nominales de fonctionnement dans le but de déterminer les besoins en combustible et air comburant.

- rendement utile du générateur : 93 %
- puissance utile générateur : 18 kW
- excès d'air : 50 %
- température de l'air : 10 °C et pression d'air 101325 Pa
- température des fumées : 130 °C et pression en sortie de conduit 101325 Pa
- caractéristiques de la combustion stœchiométrique ( $T = 273 \text{ K}$  et  $P = 101325 \text{ Pa}$ ) du fioul :

Caractéristiques	Pouvoir comburivore $\text{m}^3 / \text{kg}$ de combustible	Pouvoir fumigène humide $\text{m}^3 / \text{kg}$ de combustible
Fioul domestique	10,8	10,2

- P.C.I. fioul : 41992 kJ / kg
- Loi des gaz parfaits :  $\frac{P V}{T} = \text{cste}$

**1° question** : Déterminer le débit nominal de fioul.

**2° question** : Déterminer le volume d'air nécessaire à la combustion dans les conditions réelles de fonctionnement.

**3° question** : A partir de l'extrait de la réglementation sur la ventilation des chaufferies (ci-dessous), déterminer la vitesse de circulation de l'air comburant au niveau de la bouche d'entrée dans les conditions nominales de fonctionnement du brûleur.

Pour un appareil d'une puissance utile inférieure ou égale à 70 kW, le local doit être muni d'une amenée d'air neuf d'une section libre non condamnable d'environ  $50 \text{ cm}^2$  débouchant en partie basse et d'une évacuation d'air vicié d'une section libre non condamnable d'au moins  $100 \text{ cm}^2$  placée en partie haute et débouchant directement à l'extérieur.

**4° question** : Déterminer le volume réel de fumée humide dégagé en fonctionnement normal.

### ■■■ Exercice n° 2 : (Problème de niveau BTS)

Une chaudière de puissance utile 60 kW est alimentée par un brûleur fonctionnant avec un combustible gazeux. Les pertes par les parois sont négligeables. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est  $L_v = 2500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

**1° question** : Déterminer le P.C.I. de ce combustible.

**2° question** : Déterminer son P.C.S..

**3° question** : Calculer son pouvoir *comburivore*.

**4° question** : Calculer son pouvoir *fumigène sec*.

**5° question** : Déterminer la teneur maximale en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ).

**6° question** : L'analyse des fumées sèches a donné 5,5 % de dioxygène ( $\text{O}_2$ ) en *combustion oxydante*.

Déterminez, pour  $1 \text{ m}^3$  de gaz brûlé et après avoir tracé la *droite de Grebel* :

- le pourcentage de dioxyde de carbone  $\gamma_{\text{CO}_2}$ .
- le volume de dioxyde de carbone  $V_{\text{CO}_2}$  dans les fumées sèches puis la masse  $m_{\text{CO}_2}$  correspondante.
- le volume des fumées sèches  $V_{f,\text{sec}}$ .
- le volume de dioxygène dans les fumées sèches puis la masse correspondante  $m_{\text{O}_2,\text{excès}}$ .
- le volume d'excès d'air  $V_E$ .
- le volume de diazote ( $\text{N}_2$ ) dans les fumées sèches puis la masse correspondante  $m_{\text{N}_2,\text{total}}$ .
- l'excès d'air et le facteur d'air  $\lambda$ .

**7° question** : En déduire la masse volumique des fumées sèches  $\rho_{f,\text{sec}}$  en combustion oxydante.

**8° question** : Les fumées sèches sont évacuées à  $180^\circ\text{C}$ , l'air comburant qui alimente le brûleur est à  $20^\circ\text{C}$ .

Calculez, en  $\text{kJ} / \text{m}^3$ , les pertes de chaleur par les fumées sèches.

\* Pour cette question, prendre (si nécessaire)  $1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  pour la masse volumique des fumées sèches.

**9° question** : En déduire le *rendement par rapport au P.C.I.*.

**10° question** : Déterminez le débit en volume du combustible, dans les conditions normales de température et de pression.

**11° question** : Donner la valeur de ce débit dans les conditions réelles à  $20^\circ\text{C}$  et 25 mbar.

*Données* :

✦ Composition volumique du combustible gazeux et PCI de chacun des constituants :

Constituants	méthane	éthane	éthylène
Formules	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_4$
P.C.I. (en $\text{kJ} / (\text{n})\text{m}^3$ )	$55 \times 10^3$	$75 \times 10^3$	$85 \times 10^3$
% (en volume)	90 %	7 %	3 %
Masses molaires (en $\text{g} / \text{mol}^{-1}$ )	16	30	28

✦ Le volume molaire normal est égal à :  $V_m = 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

✦ L'air contient, en volume, 21 % de dioxygène et 78 % de diazote.

✦ Les conditions normales de température et de pression sont : c'est à dire  $0^\circ\text{C}$  et 101325 Pa.

✦ Capacités calorifiques utiles :

Gaz	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$
Capacités calorifiques massiques (en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0,8	1,0	0,9
Masses molaires (en $\text{g} / \text{mol}^{-1}$ )	44	32	28

## Corrigés

### Exercice 1 :

#### 1° question :

La puissance utile du générateur est désignée par  $P_{ut}$  et son rendement par  $\eta$  :  $\eta = \frac{P_{ut}}{P_{cal}}$

■ On détermine d'abord la puissance  $P_{cal}$  fournie par la combustion du fioul (conditions nominales) :  $P_{cal} = \frac{P_{ut}}{\eta}$

■ La puissance calorifique fournie par la combustion du fioul s'écrit :

$$P_{cal} = q_n \times P.C.I. \quad \text{avec } q_n : \text{débit (massique) nominal du fioul.}$$

On en déduit :  $q_n = \frac{P_{ut}}{\eta \times P.C.I.}$     A.N. :  $q_n \cong 4,6 \times 10^{-4} \text{ kg / s}$     ou    A.N. :  $q_n \cong 1,65 \text{ kg / h}$

#### 2° question :

Le volume d'air « stœchiométrique », volume mesuré dans les conditions normales :  $T = 273 \text{ K}$  et  $P = 101325 \text{ Pa}$ , est désigné par  $V_{air, norm}$ . Le pouvoir comburivore désigne le volume d'air sec strictement nécessaire à la combustion complète d'un kilogramme de fioul. Le pouvoir comburivore du fioul domestique est fourni par l'énoncé mais dans les conditions normales :  $V_{air, norm} = 10,8 \text{ m}^3 / \text{kg}$ .

Le volume d'air cherché (conditions réelles :  $T_1 = 283 \text{ K}$  et  $P = 101325 \text{ Pa}$  et excès d'air de 50 %) est désigné par :  $V_{air, réel}$ .

Ici, dans les conditions réelles de fonctionnement, l'excès d'air est de 50 % ; le volume d'air qui serait utilisé dans les conditions normales serait :  $\frac{3}{2} V_{air, norm} = \frac{3}{2} \times 10,8 \text{ m}^3 / \text{kg}$ . Dans les conditions réelles de fonctionnement, ce volume devient :

$$V_{air, réel} = \frac{3}{2} \times V_{air, norm} \times \frac{T_1}{T_0} \quad \text{A.N. : } V_{air, réel} \cong 16,8 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

#### 3° question :

■ La combustion d'un kilogramme de fioul domestique nécessite, dans les conditions réelles de fonctionnement du générateur un volume d'air de  $16,8 \text{ m}^3 / \text{kg}$ .

Le débit volumique de l'air appelé pour la combustion  $V_{air, arrivée}$  (à l'arrivée d'air neuf) s'écrit :

$$q_{air, arrivée} = V_{air, réel} \times q_n$$

■ La section de l'amenée d'air neuf est désignée par  $S_{arrivée}$  et la vitesse de l'air neuf par  $v_{arrivée}$ .

En régime permanent, on a :  $q_{air, arrivée} = S_{arrivée} \times v_{arrivée}$  avec  $S_{arrivée} = 50 \text{ cm}^2 = 50 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

■ On obtient donc :  $v_{arrivée} = \frac{V_{air, réel} \times q_n}{S_{arrivée}}$     A.N. :  $v_{arrivée} \cong 1,55 \text{ m / s}$

#### 4° question :

Le pouvoir fumigène du fioul domestique est fourni par l'énoncé mais dans les conditions normales. Dans les conditions normales et si la combustion du fioul était « stœchiométrique », le volume de fumées humides serait :  $V_{f,norm} = 10,2 \text{ m}^3 / \text{kg}$  (par kg de fioul brûlé).

L'excès d'air ( $\frac{1}{2} V_{air,norm}$ ) se retrouve dans le volume de fumées humides. Dans les conditions normales ( $T = 273 \text{ K}$  et  $P = 101325 \text{ Pa}$ ), le volume de fumées humides serait donc :  $V_{f,norm} + \frac{1}{2} V_{air,norm}$ .

Dans les conditions réelles, à la sortie des fumées, ( $T_2 = 403 \text{ K}$  et  $P = 101325 \text{ Pa}$ ), ce volume devient :

$$V_{f,r\u00e9el} = \left( V_{f,norm} + \frac{1}{2} V_{air,norm} \right) \times \frac{T_2}{T_0} \quad \text{A.N.: } V_{f,r\u00e9el} \cong 23,0 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

#### Exercice 2 :

1° question : Le P.C.I. du mélange gazeux s'écrit :  $P.C.I. = \sum_i x_i P.C.I._i$

avec :  $x_i$  : fraction molaire (ou volumique) du gaz « i » dans le mélange

et P.C.I.<sub>i</sub> : Pouvoir calorifique de chaque constituant gazeux « i » du mélange.

Application numérique :

$$P.C.I. = \left( \frac{90}{100} \times 55 + \frac{7}{100} \times 75 + \frac{3}{100} \times 85 \right) \times 10^3 \text{ kJ} / (\text{n})\text{m}^3 \quad P.C.I. \cong 57 \times 10^3 \text{ kJ} / (\text{n})\text{m}^3$$

#### 2° question :

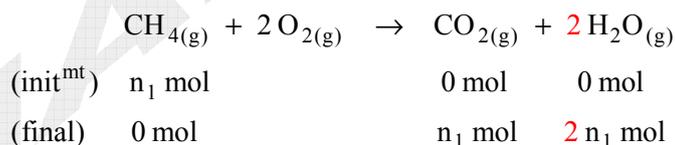
◆ Le P.C.S. du mélange est relié à son P.C.I. par la relation :  $P.C.S. = P.C.I. + m_{eau} \times L_v$

$m_{eau}$  : masse d'eau formée lors de la combustion de  $1(\text{n})\text{m}^3$  du mélange gazeux.

◆ Pour calculer cette masse d'eau, il faut d'abord calculer la quantité d'eau recueillie.

☛ Bilans des réactions de combustion complète de chaque constituant du mélange :

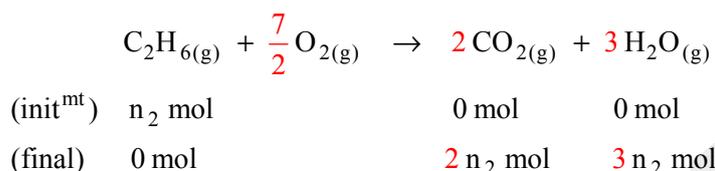
#### Méthane :



$n_1$  : quantité de méthane contenue dans  $1(\text{n})\text{m}^3$  du mélange gazeux :  $n_1 = \frac{1}{V_m} \times \frac{90}{100} \times 1 \text{ m}^3$

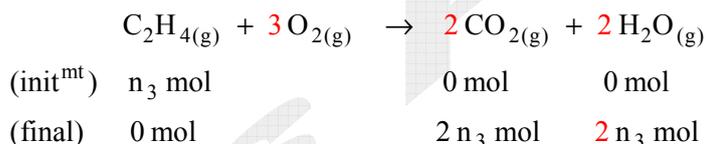
Cette relation suppose que le gaz méthane est considéré comme un gaz parfait.

### Ethane :



$n_2$  : quantité d'éthane contenue dans  $1(n)\text{m}^3$  du mélange gazeux :  $n_2 = \frac{1}{V_m} \times \frac{7}{100} \times 1 \text{ m}^3$

### Ethylène :



$n_3$  : quantité de méthane contenue dans  $1(n)\text{m}^3$  du mélange gazeux :  $n_3 = \frac{1}{V_m} \times \frac{3}{100} \times 1 \text{ m}^3$

**Remarque** : Il est impératif d'écrire **un bilan par réaction** et ne pas chercher à établir un seul bilan pour la réaction de combustion du mélange gazeux.

☛ La quantité d'eau recueillie est donc :  $n_{\text{eau}} = 2 n_1 + 3 n_2 + 2 n_3$  soit :

$$n_{\text{eau}} = \left( 2 \times \frac{90}{100} + 3 \times \frac{7}{100} + 2 \times \frac{3}{100} \right) \times \frac{1}{V_m} \times 1 \text{ m}^3$$

☛ La masse d'eau recueillie s'en déduit :  $m_{\text{eau}} = n_{\text{eau}} \times M(\text{H}_2\text{O})$

♦ On obtient, ensuite, le P.C.S. :  $\text{P.C.S.} \equiv 61 \times 10^3 \text{ kJ} / (n)\text{m}^3$

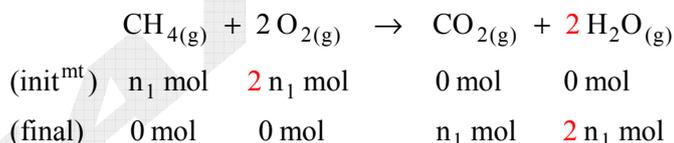
**Remarque** : La masse d'eau recueillie est de l'ordre de 1,7 kg.

**3° question** : Le pouvoir comburivore désigne le volume d'air sec strictement nécessaire à la combustion complète d'un mètre-cube du combustible, volume mesuré dans les conditions normales (volume désigné par  $1(n)\text{m}^3$ ).

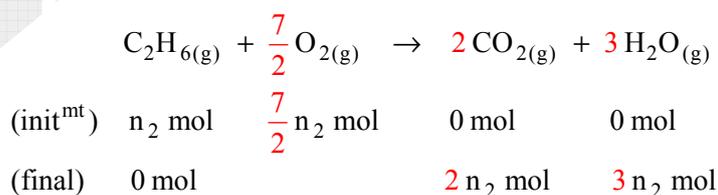
♦ Pour calculer ce volume, il faut d'abord calculer la quantité de dioxygène « stœchiométrique » c'est-à-dire la quantité juste nécessaire à la combustion complète de chaque constituant gazeux.

☛ Bilans des réactions de combustion complète des constituants gazeux du combustible :

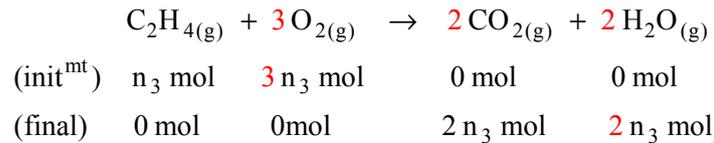
### Méthane :



### Ethane :



### Ethylène :



La quantité de dioxygène « stœchiométrique » s'écrit :  $n_{\text{O}_2} = \left( 2 \times \frac{90}{100} + \frac{7}{2} \times \frac{7}{100} + 3 \times \frac{3}{100} \right) \times \frac{1}{V_m} \times 1 \text{ m}^3$

Le volume de dioxygène « stœchiométrique » s'écrit :  $V_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2} \times V_m$  soit :

$$V_{\text{O}_2} = \left( 2 \times \frac{90}{100} + \frac{7}{2} \times \frac{7}{100} + 3 \times \frac{3}{100} \right) \times 1 \text{ m}^3$$

Le volume d'air « stœchiométrique » est donc :  $V_{\text{air}} = \frac{100}{21} \times V_{\text{O}_2}$

$$\text{A.N.: } V_{\text{air}} \cong 10 \text{ m}^3$$

### 4° question :

Le volume de fumées sèches constitue le pouvoir fumigène sec :

Si l'air est « stœchiométrique », les fumées sont constituées (essentiellement) par le diazote non utilisé et le dioxyde de carbone formé lors de la combustion.

$$\text{Volume de diazote non utilisé : } V_{\text{N}_2} = \frac{78}{100} \times V_{\text{air}}$$

Volume de dioxyde de carbone formé :

$$\text{La quantité de dioxyde de carbone formé est égale à : } n_{\text{CO}_2} = \left( 1 \times \frac{90}{100} + 2 \times \frac{7}{100} + 2 \times \frac{3}{100} \right) \times \frac{1}{V_m} \times 1 \text{ m}^3$$

*Remarque* : Reprendre les bilans molaires des réactions pour déterminer cette quantité.

$$\text{On en déduit : } V_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \times V_m$$

Le volume de fumées sèches  $V_{f,\text{sec}}$  s'écrit :  $V_{f,\text{sec}} = V_{\text{N}_2} + V_{\text{CO}_2}$

$$\text{A.N.: } V_{f,\text{sec}} \cong 9,0 \text{ m}^3$$

*Remarque* : Calculs intermédiaires :  $V_{\text{CO}_2} \cong 1,1 \text{ m}^3$  et  $V_{\text{N}_2} \cong 7,9 \text{ m}^3$ .

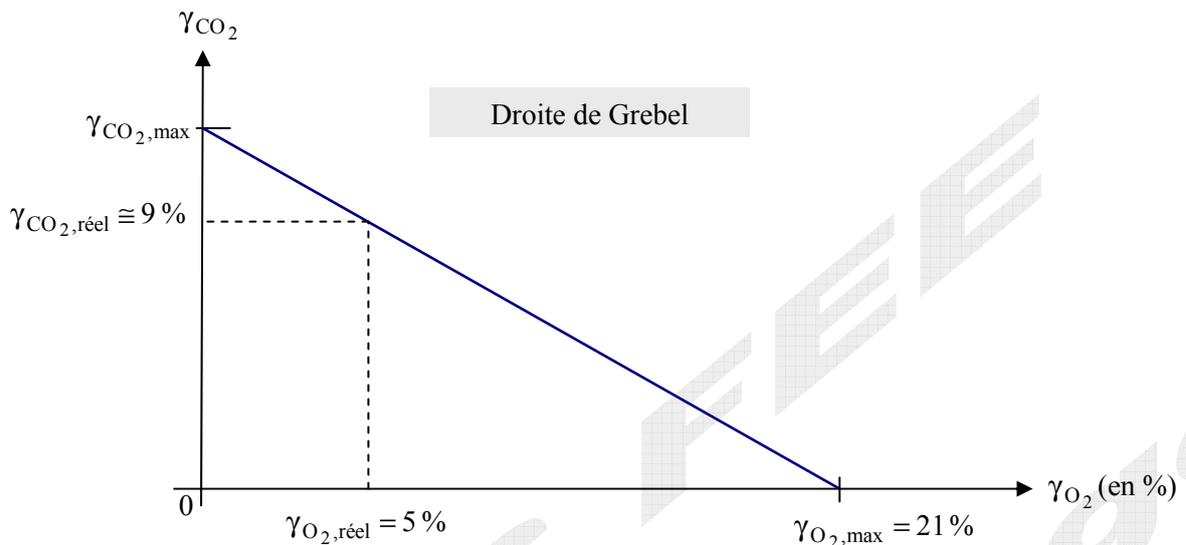
5° question : La teneur maximale en dioxyde de carbone  $\gamma_{\text{CO}_2,\text{max}}$  des fumées (\*) sèches rejetées est donnée

$$\text{par le rapport : } \gamma_{\text{CO}_2,\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{f,\text{sec}}}$$

$$\text{A.N.: } \gamma_{\text{CO}_2,\text{max}} \cong 12 \%$$

6° question : La combustion *oxydante* est une combustion qui se produit avec un excès d'air. L'air en excès se retrouve, évidemment, dans les fumées sèches. Le taux de dioxyde de carbone dans les fumées sèches est alors plus faible que la teneur maximale  $\gamma_{\text{CO}_2,\text{max}}$  calculée précédemment.

$$\text{La fonction } \gamma_{\text{CO}_2} = f(\gamma_{\text{O}_2}) \text{ est donnée par la droite de Grebel : } \gamma_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{O}_2,\text{excès}}}{V_{f,\text{sec}}}$$



a) L'exploitation de cette courbe fournit :  $\gamma_{O_2,réel} \approx 9\%$

b)

◆ Le volume de dioxyde de carbone formé est le volume maximal de ce gaz que l'on peut obtenir par combustion d'un normomètre-cube de combustible puisque l'air est en excès.

On a donc :  $V_{CO_2} = V_{CO_2,max} \approx 1,1 \text{ m}^3$  (voir remarque de la 4<sup>e</sup> question) comme dans le cas « stœchiométrique ».

**Attention !** On a bien entendu  $\gamma_{O_2,réel} \neq \gamma_{O_2,max}$  car le volume de fumées « sèches » a évolué par rapport à la 4<sup>e</sup> question ! On le notera  $V_{f,sec,réel}$  afin de le distinguer du volume de fumées sèches dans le cas stœchiométrique ! Le volume de fumées sèches  $V_{f,sec,réel}$  correspond à la somme du volume de fumées stœchiométrique ( $V_{f,sec}$ ) augmenté de l'excès d'air (dioxygène et diazote)

◆ La masse de dioxyde de carbone formé est donc :  $m_{CO_2} = n_{CO_2} \times M(CO_2)$  ( $n_{CO_2}$  a été calculé précédemment).

On obtient : A.N. :  $m_{CO_2} \approx 2,2 \text{ kg}$

c) **Rappel** : Définition du taux de dioxyde de carbone :  $\gamma_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{f,sec,réel}}$

On en déduit :  $V_{f,sec,réel} = \frac{V_{CO_2,max}}{\gamma_{CO_2,réel}}$  A.N. :  $V_{f,sec,réel} \approx 12 \text{ m}^3$

d)

◆ Le volume de dioxygène dans les fumées sèches est une donnée du texte :  $V_{O_2,excès} = \frac{5,5}{100} \times V_{f,sec,réel}$

On obtient :  $V_{O_2,excès} \approx 0,7 \text{ m}^3$

◆ La masse correspondante s'écrit :  $m_{O_2,excès} = \frac{V_{O_2,excès}}{V_m} \times M(O_2)$  A.N. :  $m_{O_2,excès} \approx 1,0 \text{ kg}$

e) Le volume de dioxygène  $V_{O_2,excès}$  calculé précédemment correspond à 21 % du volume d'air en excès :

$$V_E = \frac{100}{21} V_{O_2,excès}$$

$$\text{A.N. : } V_E \cong 3,2 \text{ m}^3$$

f) Le volume de diazote est constitué, de façon formelle, du volume de diazote « stœchiométrique » ( $V_{N_2}$ ) et de l'excès de diazote ( $V_{N_2,excès}$ ) contenu dans l'excès d'air.

◆ Volume d'air « stœchiométrique (3° question) :  $V_{air} = \frac{100}{21} \times V_{O_2}$  donc :  $V_{N_2} = \frac{78}{100} \times V_{air}$

◆ Volume de diazote excédentaire :  $V_{N_2,excès} = \frac{78}{100} \times V_E$

On obtient :  $V_{N_2,total} = V_{N_2,excès} + V_{N_2}$

$$V_{N_2,total} \cong 10,5 \text{ m}^3$$

g)

◆ L'excès d'air (le pourcentage en excès d'air) représente le rapport entre le volume d'air en excès ( $V_E$ ) et le volume d'air « stœchiométrique » ( $V_{air}$ ) :

$$e = \frac{V_E}{V_{air}}$$

$$\text{A.N. : } e \cong 31 \%$$

◆ Le facteur d'air  $\lambda$  (encore appelé taux d'aération) représente le rapport entre le volume d'air réellement admis et le volume d'air « stœchiométrique » ( $V_{air}$ ) :

$$\lambda = \frac{V_E + V_{air}}{V_{air}} = 1 + e$$

$$\text{A.N. : } \lambda \cong 1,3$$

**7° question :**

☛ Les fumées sèches sont constituées de

- Diazote qui occupe, dans les conditions normales, le volume  $V_{N_2,total}$ . La masse de diazote s'écrit :

$$m_{N_2,total} = \frac{V_{N_2,total}}{V_m} \times M(N_2)$$

$$m_{N_2,total} \cong 13,3 \text{ kg}$$

- Du dioxygène excédentaire dont la masse a été calculée précédemment (d) de la 6° question).

$$m_{O_2,excès} \cong 1,0 \text{ kg}$$

- De dioxyde de carbone dont la masse a déjà été calculée (b) de la 6° question) :

$$m_{CO_2} \cong 2,2 \text{ kg}$$

☛ On en déduit la masse volumique des fumées sèches :

$$\rho_{f,sec} = \frac{m_{f,sec,réel}}{V_{f,sec,réel}} = \frac{m_{N_2,total} + m_{O_2,excès} + m_{CO_2}}{V_{f,sec,réel}}$$

$$\text{A.N. : } \rho_{f,sec} \cong 1,31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

**8° question :**

A pression constante, les chaleurs reçues par les gaz ne dépendent que de l'état initial et final de sorte que l'on peut imaginer que la combustion se fait à  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  dans un premier temps puis que les gaz issus de la combustion (l'eau, à  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  reste liquide) sont dans un deuxième temps, portés de la température  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  à la température  $\theta_f = 180^\circ\text{C}$ . Les capacités calorifiques des différents gaz sont fournies par l'énoncé.

**Remarque :** Le « chemin » imaginé importe peu du moment que l'on respecte l'état initial et final.

On a donc :

- $q_{N_2, \text{total}} = m_{N_2, \text{total}} \times c_{N_2} (\theta_f - \theta_i)$   $q_{N_2, \text{total}} \cong 1912 \text{ kJ}$
- $q_{O_2, \text{excès}} = m_{O_2, \text{excès}} \times c_{O_2} (\theta_f - \theta_i)$   $q_{O_2, \text{réel}} \cong 157 \text{ kJ}$
- $q_{CO_2} = m_{CO_2, \text{total}} \times c_{CO_2} (\theta_f - \theta_i)$   $q_{CO_2} \cong 277 \text{ kJ}$

Conclusion : •  $q_{f, \text{sec, réel}} = q_{O_2, \text{excès}} + q_{N_2, \text{total}} + q_{CO_2}$   $q_{f, \text{sec, réel}} \cong 2346 \text{ kJ}$

La combustion d'un normomètre-cube de gaz combustible fournit :  $2346 \text{ kJ} \cdot (\text{n}) \text{m}^{-3}$ .

**9° question :** Pour un normomètre-cube de combustible brûlé, on admet que la chaleur réellement utilisable s'écrit :  $q_{\text{utile}} = \text{P.C.I.} - q_{f, \text{sec, réel}}$  (puisque les pertes par les parois sont négligées)

Le rendement de la combustion, par rapport au P.C.I. s'écrit :  $\eta_{\text{PCI}} = \frac{q_{\text{utile}}}{\text{P.C.I.}} = \frac{\text{P.C.I.} - q_{f, \text{sec, réel}}}{\text{P.C.I.}}$

On obtient :  $\eta_{\text{PCI}} = 1 - \frac{q_{f, \text{sec, réel}}}{\text{P.C.I.}}$  A.N. :  $\eta_{\text{PCI}} \cong 96 \%$

**10° question :**

La puissance utile de la chaudière est donnée par l'énoncé ; on l'écrit ainsi :  $P_{\text{utile}} = q_{\text{utile}} \times q_{v, \text{combustible}}$

$q_{v, \text{combustible}}$  : débit volumique du gaz combustible, dans les conditions normales de température et de pression.

On en déduit :  $q_{v, \text{combustible}} = \frac{P_{\text{utile}}}{\eta_{\text{PCI}} \times \text{P.C.I.}}$  A.N. :  $q_{v, \text{combustible}} \cong 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

**Remarque :** Le débit volumique horaire est plus significatif :  $3,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

**11° question :**

Dans les conditions normales ( $P_0, T_0$ ), une quantité donnée de gaz combustible occupe le volume  $V_0$ .

Dans les conditions réelles ( $P_1, T_1$ ), cette quantité de gaz combustible occupe le volume  $V_1$ .

On a alors, le gaz étant considéré comme parfait :  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_0 V_0}{T_0} = n R$

On en déduit :  $\frac{V_1}{V_0} = \frac{P_0}{P_1} \times \frac{T_1}{T_0}$  et, enfin, le rapport des débits volumiques :  $\frac{q_{v, \text{combustible, réel}}}{q_{v, \text{combustible}}} = \frac{P_0}{P_1} \times \frac{T_1}{T_0}$

$q_{v, \text{combustible, réel}} = q_{v, \text{combustible}} \times \frac{P_0}{P_1} \times \frac{T_1}{T_0}$  A.N. :  $q_{v, \text{combustible, réel}} \cong 4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$