

Manipulation 1

Le calorimètre de Junkers et la mesure de la masse moléculaire par effusiométrie

Consignes de sécurité

- Soyez prudent en utilisant le gaz naturel.
- Dans le cas d'une odeur de gaz, fermez la vanne de gaz immédiatement et avertissez l'assistant.
- Faites attention à la flamme du Bunsen. Risque de brûlures.
- Ne jamais placer le Bunsen dans le calorimètre vous-même.
- N'allumez jamais le Bunsen vous-même ! Appelez l'assistant si la flamme du Bunsen s'est éteinte.
- Ne pas toucher l'eau sortant du calorimètre : chaud !
- Ne jamais toucher les vannes/robinets d'eau, ni du calorimètre, ni du réseau.
- **En cas d'accident, avertissez immédiatement l'assistant. Si une intervention des urgences est nécessaire, appelez le "7" (téléphones ULB) ou le "112".**

1.1 But de l'essai

La manipulation proposée consiste à déterminer la chaleur de combustion du gaz naturel dans des conditions données. Ces conditions sont : une combustion isotherme et isobare, les produits de combustion étant le CO_2 et l'eau vapeur.

On déterminera également la masse moléculaire du gaz naturel à l'aide d'un effusiomètre de Bunsen-Shilling.

1.2 Rappels

Le pouvoir calorifique P_c est la chaleur de réaction à température et pression constante, rapportée à l'unité de combustible et dans des conditions standards.

L'unité que l'on utilisera ici (comme cela se fait couramment dans le cas des gaz) est le mètre cube normal (Nm^3), c'est-à-dire 1 m^3 de gaz dans les conditions standards de température de 0°C et de pression de 1 atmosphère $\approx 760 \text{ mmHg}$ (conditions normales).

Lorsque l'eau formée par la combustion est sous forme vapeur, le pouvoir calorifique est le pouvoir calorifique inférieur. Lorsque l'eau est sous forme liquide, il s'agit de pouvoir calorifique supérieur.

On a :

$$P_{cs} - P_{ci} = L_v(\text{H}_2\text{O}) \cdot m(\text{H}_2\text{O}) \quad (1.1)$$

substance	composition [%V]	$r_{(T,p)}$ [kJ/Nm ³]
CO ₂	1	0
N ₂	14	0
CH ₄	81,5	39890
C ₂ H ₆	2,9	70420
C ₃ H ₈	0,4	100150
C ₄ H ₁₀	0,2	129750

TABLE 1.1. la composition moyenne du gaz naturel de Slochteren.

où m_{H_2O} est la masse d'eau provenant de la combustion de l'unité de gaz combustible et $L_v(H_2O)$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à l'état de référence.

Si le gaz combustible peut être considéré comme un mélange de gaz parfaits, le P_{cs} est égal à la somme pondérée des chaleurs de combustion des constituants séparés.

$$P_{cs} = \sum_j y_j \cdot r_{(T,p,j)} \quad (1.2)$$

où y_j est la fraction molaire du constituant j .

1.3 Description de l'installation

1.3.1 Principe du calorimètre

Le calorimètre de Junkers est un système adiabatique ouvert à deux entrées et deux sorties. Il est schématisé à la Figure 1.1. Entre l'entrée 1 et la sortie 2, le gaz est brûlé; en d'autres termes, en 1, à

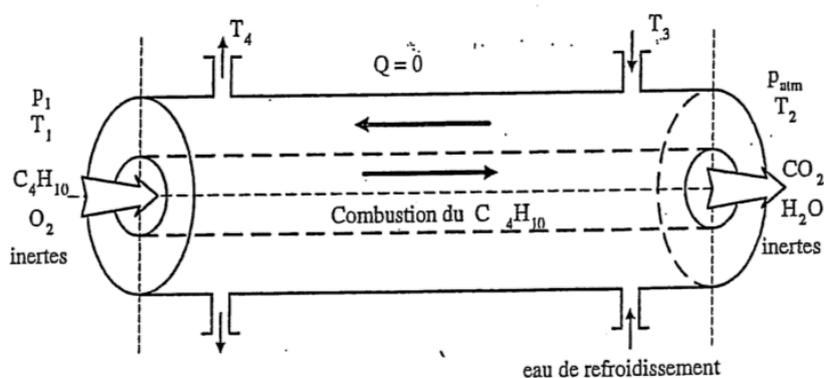


FIGURE 1.1. Le calorimètre de Junkers.

la température T_1 , entrent le gaz naturel saturé en eau et l'air comburant, en 2, la combustion étant supposée complète, sortent, à la température T_2 , le CO₂, l'eau de la combustion condensée et les gaz inertes (azote, oxygène en excès, vapeur d'eau). On suppose le système adiabatique et que les produits sont saturés en eau à la sortie et à l'entrée.

A partir du premier principe appliqué à tous les constituants, on peut écrire (démontrer) :

$$P_{cs}(T_2) = \dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} \frac{T_4 - T_3}{\dot{V}_N} + \text{termes correctifs} \quad (1.3)$$

avec :

- \dot{m}_{H_2O} : débit massique de l'eau de refroidissement.

- \dot{V}_N : débit volumique du gaz naturel rapporté à l'état normal.
- $C_{p_{H_2O}}$: chaleur massique de l'eau à pression constante.

L'équation 1.1 permet d'écrire :

$$P_{ci}(T_2) = P_{cs}(T_2) - \dot{m}_{H_2O_c} \frac{L_v(T_2)}{\dot{V}_N} \quad (1.4)$$

où :

- $\dot{m}_{H_2O_c}$: débit de l'eau de combustion (condensée).

1.3.2 Dispositif de mesure

L'appareil du laboratoire est représenté à la Figure 1.2. Le gaz y entre après son passage dans un compteur à gaz où il est saturé (de vapeur d'eau), à la température T_1 (lue au compteur) et à la pression $p_1 = p_{atm} + p_{compteur}$.

On détermine le pouvoir calorifique d'un combustible gazeux ou d'un liquide combustible léger (essence, pétrole) au moyen du calorimètre à gaz. Ce calorimètre est un réservoir à double paroi en forme de cloche renversée, en dessous duquel se trouve un brûleur à gaz ou un brûleur à mèche pour liquide. De l'eau circule entre les deux parois de cette cloche, et les produits de la combustion du combustible circulent dans des tubes verticaux en laiton situés entre les deux parois.

On calcule le pouvoir calorifique du combustible brûlé à l'aide de la quantité d'eau qui passe pendant l'essai, de la différence entre les températures d'entrée.

Les gaz brûlés sortent à une température T_2 . L'eau de refroidissement entre avec une température T_3 et sort avec une température T_4 . Le débit de gaz est mesuré par un compteur à eau qui donne le débit en volume du gaz saturé d'eau mesuré à la température du compteur (T_1) et à la pression du compteur (p_1). La pression partielle du gaz dans le mélange de gaz et d'eau sortant vaut donc :

$$p_g = p_1 - p_{v_s}(T_1) \quad (1.5)$$

où $p_{v_s}(T_1)$ est la pression de vapeur saturante de l'eau à T_1 .

La loi des gaz parfaits permet alors aisément de calculer le débit de gaz en Nm^3/s .

1.3.3 Manipulation

Lorsque l'installation est en régime, faites les mesures suivantes :

1. débit d'eau de refroidissement \dot{m}_{H_2O} par empottement en tournant de 1/4 de tour vers la gauche la vanne 6.
2. débit de l'eau de condensation $\dot{m}_{H_2O_c}$ par empottement.
3. débit du gaz \dot{V} .
4. températures : T_1 (voir compteur), $T_2 \rightarrow$ Fig. 1.2 [9], $T_3 \rightarrow$ Fig. 1.2 [3], $T_4 \rightarrow$ Fig. 1.2 [4].
5. p_{atm} (baromètre du laboratoire).
6. pression dans le compteur p_1 via le manomètre à eau.

1.4 Principe et mesure à l'effusiomètre

Cette mesure est basée sur le phénomène d'effusion, c'est-à-dire le passage d'un gaz à travers un orifice de très faible diamètre (ordre de grandeur du libre parcours moyen) séparant deux enceintes à des pressions différentes.

La théorie cinétique des gaz montre que le flux du gaz effusé dépend de la nature du gaz par un facteur multiplicatif $\frac{1}{\sqrt{M}}$, toutes autres conditions de température, pression, restant égales (M est la masse molaire).

Si τ est le temps nécessaire pour faire passer par effusion un volume donné V de gaz d'une enceinte 2 sous une différence de pression p , la propriété précédente permet d'affirmer que :

$$\tau = C^{te} \sqrt{M} \quad (1.6)$$

une relation qui est indépendante du type de gaz. La constante C^{te} est déterminée en effectuant la mesure avec un gaz connu.

L'appareil du laboratoire est l'effusiomètre de Bunsen-Shilling (Figure 1.4). Le principe de fonctionnement de l'appareil est le suivant :

- au moyen de la vanne trois voies, on admet de l'air ou gaz (sous pression) dans le vase A. Le niveau d'eau dans ce vase descend et remonte dans le vase B.
- lorsque le niveau dans le vase A est passé sous le repère inférieur, on change la position de la vanne (communication avec l'extérieur) ; l'effusion s'effectue (le niveau dans le vase A remonte).
- on mesure le temps nécessaire pour que ce niveau passe entre les deux repères.

Le gaz d'étalonnage sera bien entendu de l'air ($M_{air} = 28,9$ g/mole).

1.4.1 Manipulation

1. remplir et purger plusieurs fois l'appareil avec de l'air
2. chronométrer le passage du niveau d'eau entre les deux repères
3. répéter les mêmes opérations avec le gaz naturel

1.5 Préparations, mesures, résultats

1. Prédéterminations et calculs théoriques :
 - (a) Démontrer la relation 1.3
 - (b) Déterminer la valeur théorique de P_{cs} et P_{ci} via Tableau 1.1 [kJ/Nm³] (conditions standards!)
2. Valeurs à mesurer :
 - (a) La pression atmosphérique (p_a)
 - (b) La température atmosphérique (T_a)
 - (c) Débit volumique du gaz naturel (\dot{V})
 - (d) Température d'entrée du gaz naturel (T_1)
 - (e) La pression dans le débitmètre (p_1)
 - (f) La température des gaz brûlés (T_2)
 - (g) La température d'entrée de l'eau de refroidissement (T_3)

- (h) La température de sortie de l'eau de refroidissement (T_4)
- (i) Le débit massique de l'eau de refroidissement (\dot{m}_{H_2O})
- (j) Le débit massique d'eau condensée ($\dot{m}_{H_2O_c}$)

3. Résultats expérimentaux :

- (a) Calculez le P_{cs} et P_{ci} sur base de vos mesures expérimentales, en [kJ/Nm³] **et** [kcal/Nm³]
- (b) Déterminez la masse moléculaire du gaz naturel par l'essai à l'effusiomètre. En déduire les valeurs expérimentales des pouvoirs calorifiques en [kJ/kg] **et** [kcal/kg]
- (c) Discutez les termes correctifs
- (d) Discutez les différentes sources d'erreur introduit sur le calcul du P_{cs}

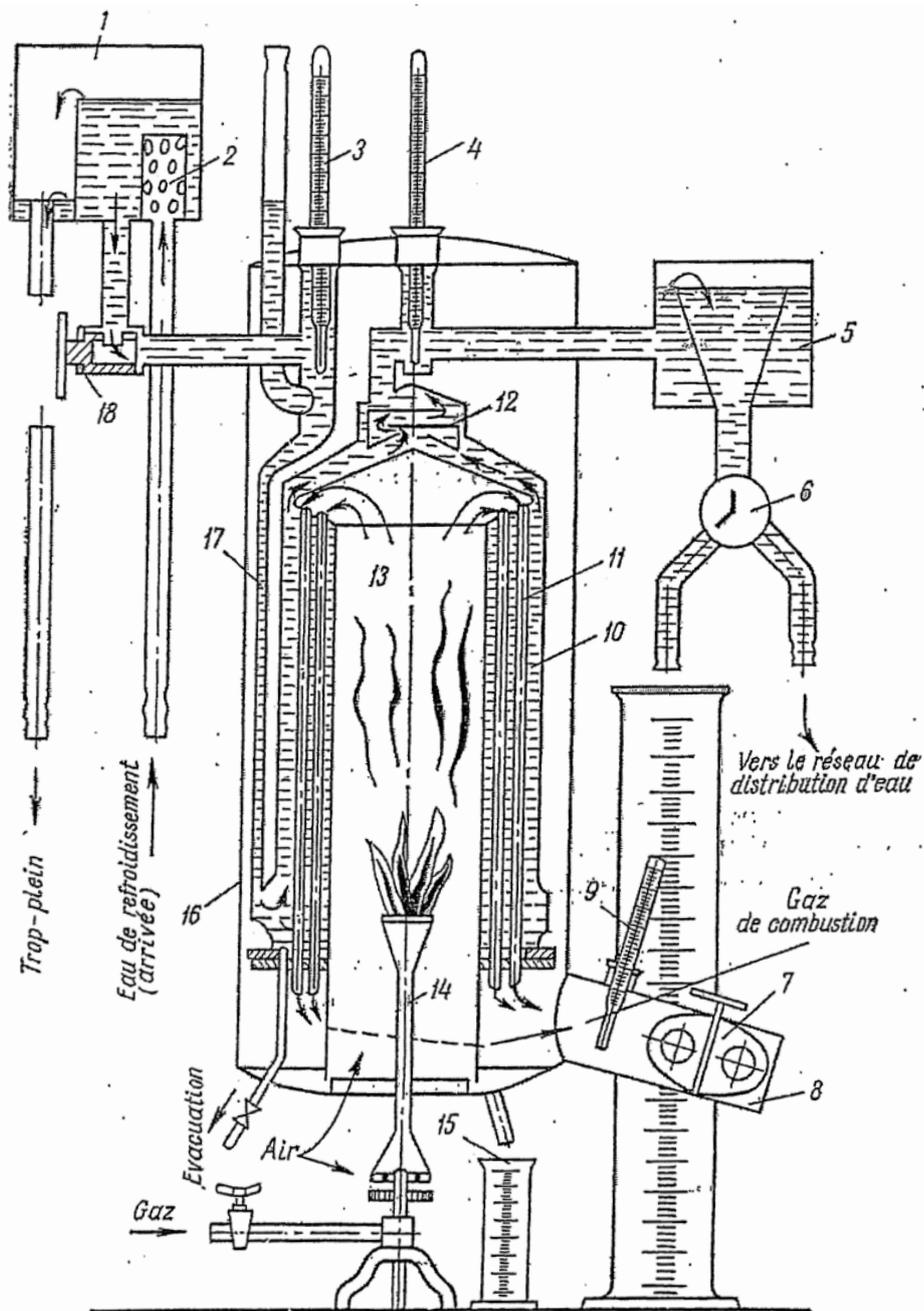


FIGURE 1.2. 1- réservoir distribution d'eau; 2- tranquillisateur de l'arrivée de l'eau; 3 et 4 - thermomètres d'entrée de l'eau de refroidissement; 5- déversoir de trop-plein; 6- robinet d'évacuation d'eau; 7- évacuation à diaphragme; 8- évacuation des produits de combustion; 9- thermomètres de sortie des gaz; 10- enveloppe d'eau; 11- tubes de laiton parcourus par les produits de combustion; 12- chambre de brassage de l'eau; 13- cloche de la chambre de combustion; 14- brûleur à gaz; 15- tube d'évacuation servant à mesurer la quantité de vapeur condensée provenant des produits de combustion; 16- enveloppe du calorimètre; 17- arrivée d'eau; 18- robinet de réglage.



FIGURE 1.3. Le calorimètre de Junkers.

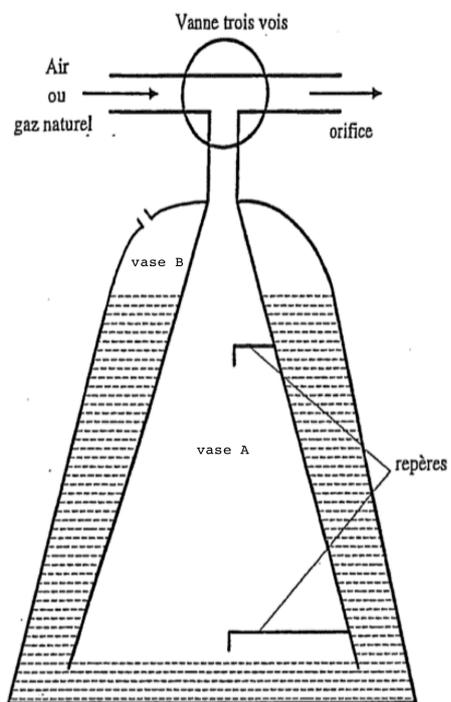


FIGURE 1.4. L'effusiomètre de Bunsen-Shilling.