

# Cours de combustion

---

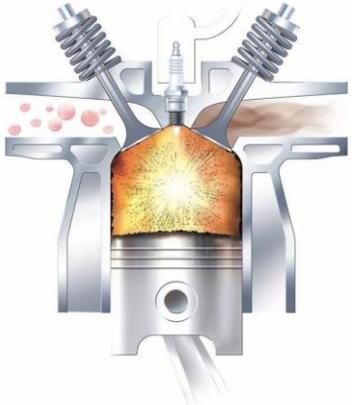
PHD. A. BELKADI

NIVEAU DE MASTER 1

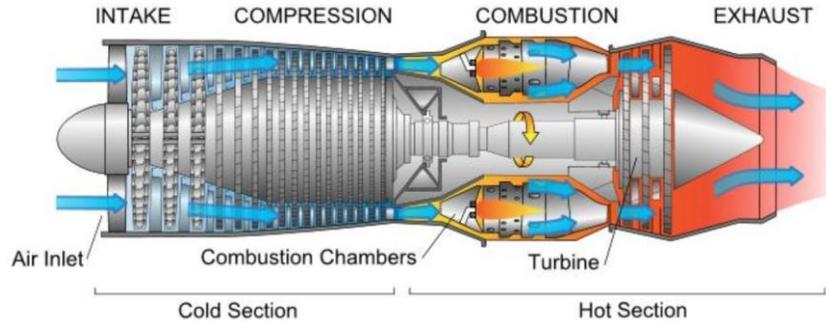
UNIVERSITÉ DE TIZI OUZOU (UMMTO) – 2016-2017

Chapitre I :  
Rappels et  
notions  
fondamentales  
sur la combustion

# 1. Introduction à la combustion



Moteur à combustion interne



Turbine à gaz

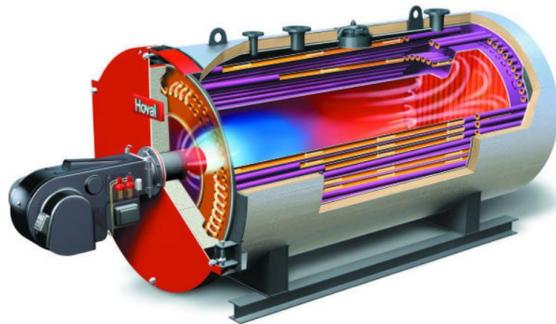


Réacteur

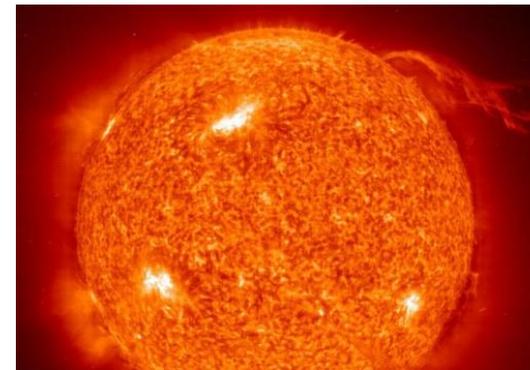


Moteur vulcain (fusée)

90 % de l'énergie produit sur terre est généré par combustion



Chaudière



Astre solaire

## 2. Les combustibles



### • Solides



**Bois**



**Charbon**



**Propergol**



**Boues**



**Fumier**



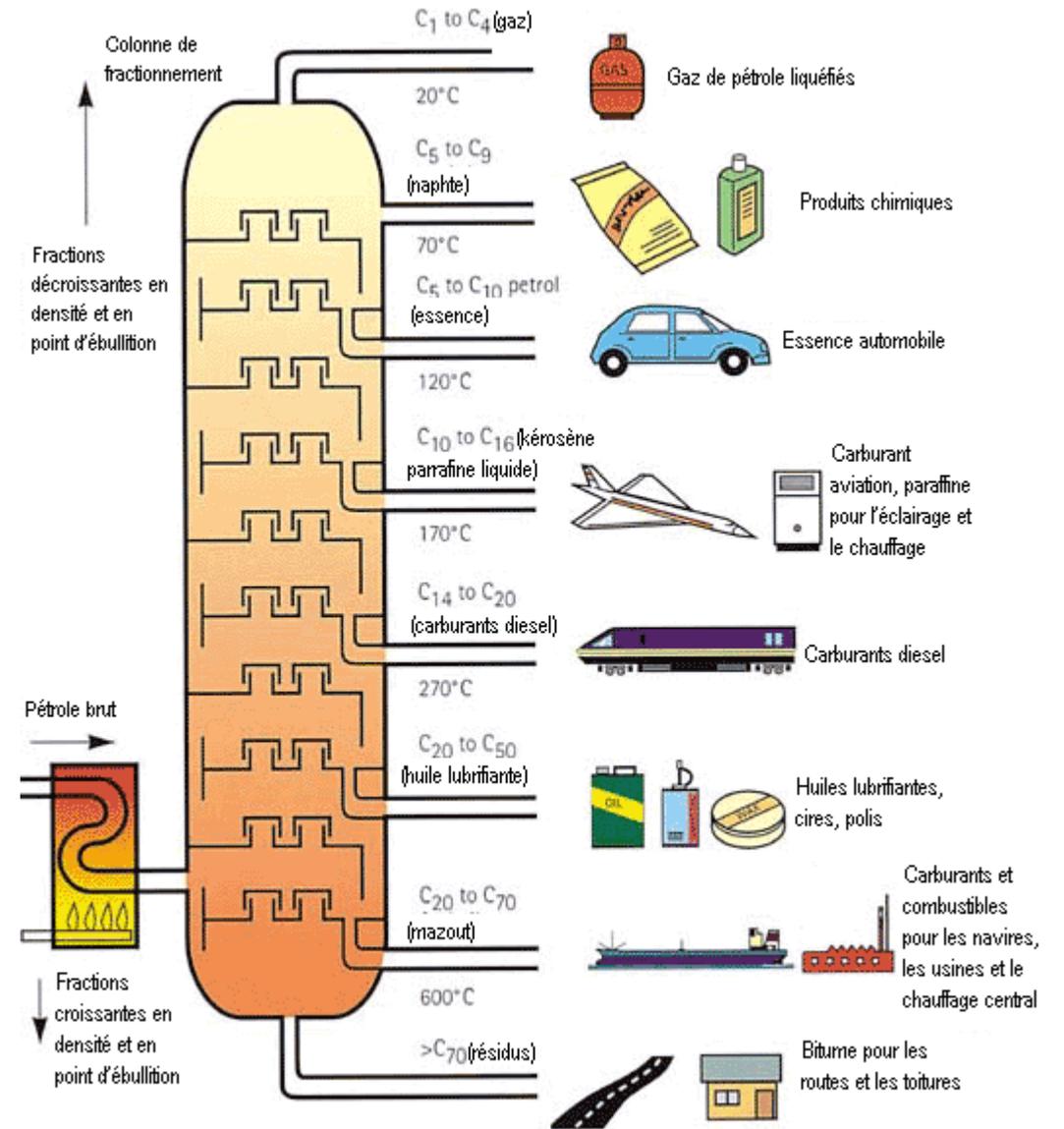
**Grignon  
d'olives**

**Biomasse**

### • Liquides

Produits issus du raffinage  
du pétrole brut.

# Colonne de distillation



# 2. Les combustibles



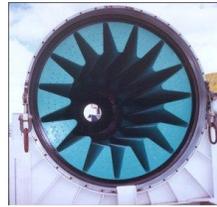
## • Solides



Bois



Charbon



Propergol



Boues



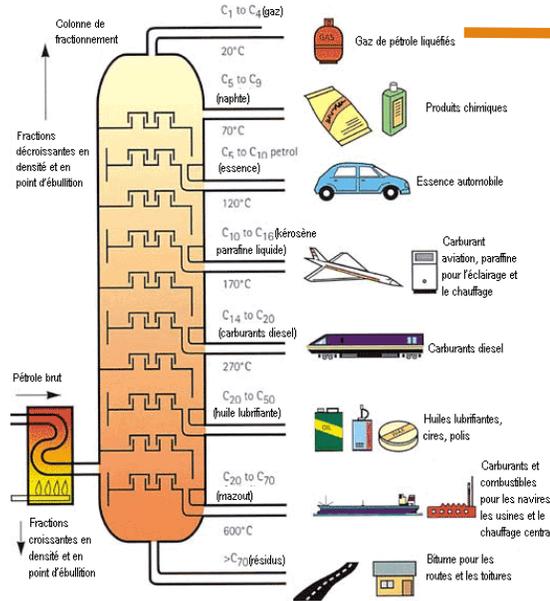
Fumier



Grignon  
d'olives

Biomasse

## • Liquides



## • Gaz



- Les produits suivant :
- Le GPL
  - l'Essence
  - Le Gasoil
  - Le Fuel lourd

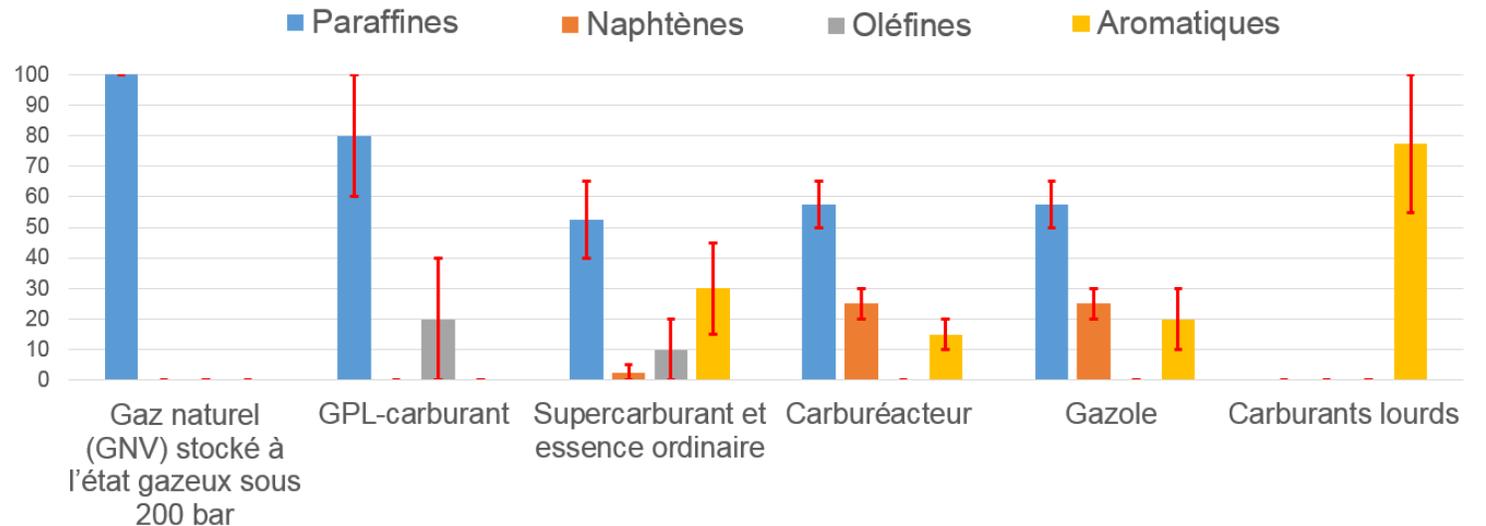
**sont considérés comme des carburants et des combustibles**



## 2. Comparaison entre les combustibles

	<b>Solides</b>	<b>Liquides</b>	<b>Gaz</b>
<b>Transport</b>	Très facile	Facile	Très dur
<b>Stockage</b>	Très facile	Facile (dangereux)	Dur (très dangereux)
<b>Densité d'énergie</b>	Grande densité	Moyenne densité	Densité faible
<b>Facilité à la combustion</b>	Très dur (contraignante)	Dur	Très facile

Caractéristiques générales et composition globale des différents types de carburants

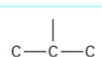
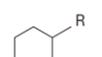
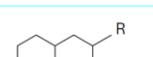
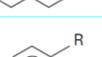


**Tableau 7 – Exemple d'analyse simplifiée d'une essence commerciale classique par chromatographie en phase gazeuse. Répartition des constituants par nombre d'atomes de carbone et par familles chimiques**

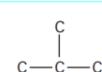
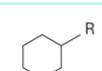
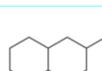
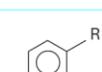
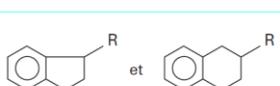
Nombre d'atomes de carbone	Teneurs massiques (%)						
	n-Paraffines	Isoparaffines	Naphtènes	Aromatiques	Oléfines	Produits oxygénés	Total
4	5,14	0,30			1,49		5,93
5	1,26	7,84			10,11	0,50	19,71
6	0,64	6,34	1,19	1,23	5,07	3,00	17,47
7	0,65	3,22	1,05	8,11	1,56		14,59
8	0,48	11,47	0,43	13,61	0,34		26,33
9	0,11	1,12	0,16	9,49	0,07		10,95
10	0,01	0,09	0,09	2,80	0,02		3,01
11		0,10		0,25			0,35
12		0,61					0,61
13		0,01					0,01
<b>Total</b>	8,29	31,10	2,92	35,49	18,66	3,50	99,96 (1)

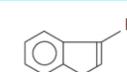
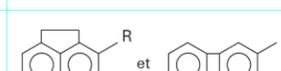
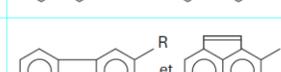
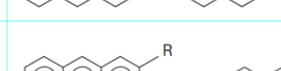
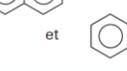
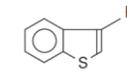
(1) Constituants non identifiés : 0,04 % (masse)

**Tableau 4 – Exemple de compositions par familles chimiques d'un carburéacteur commercial (analyse par spectrométrie de masse)**

Famille chimique	Type de motif structural	Teneur massique (%)
Paraffines		58,30
Naphtènes non condensés		23,85
Naphtènes bicycliques		2,40
Aromatiques simples		13,40
Indanes et tétralines		1,70
Naphtalènes		0,35
<b>Total</b>		100,00

**Tableau 5 – Exemple de composition par familles chimiques d'un gazole commercial. Analyse par spectrométrie de masse (1)**

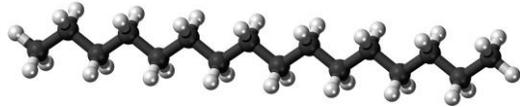
Famille chimique	Type de motif structural	Teneur massique (%)
Paraffines		30,90
Naphtènes non condensés		23,70
Naphtènes condensés		15,10
Alkylbenzènes		9,20
Indanes et tétralines		6,40

Indènes		1,80
Naphtalènes		5,50
Acénaphtènes et diphényles		2,75
Fluorènes et acénaphthylènes		1,50
Anthracènes et phénanthrènes		1,30
Benzothiophènes		1,60
Dibenzothiophènes		0,25
<b>Total</b>		100,00

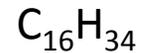
(1) Valeurs fournies par l'Institut Français du Pétrole (IFP)

## 2. Indice de cétane et indice d'octane

Le **gazole** doit présenter **une forte tendance à l'auto-inflammation** exprimée par l'**indice de cétane**

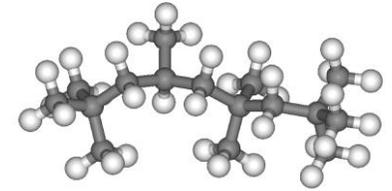


n-cétane

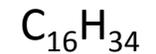


$$CN = (\% \text{ n-cetane}) + 0,15(\% \text{ d'iso-cetane})$$

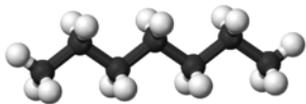
En Europe le nombre de cétane : **CN = 49-55**



iso-cétane



L'essence doit présenter **une forte résistance à l'auto-inflammation** exprimée par l'**indice d'octane**.



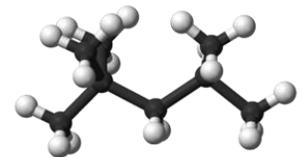
n-heptane



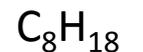
Essence Super : indice d'octane 96 (**4% de n-heptane** et **96% d'iso-octane**)

Essence sans plomb : indice d'octane 95 (**5% de n-heptane** et **95% d'iso-octane**)

Essence Normale : indice d'octane 90 (**10% de n-heptane** et **90% d'iso-octane**)



iso-octane



[WAUQUIER1994] WAUQUIER Jean-Pierre, Raffinage du pétrole (Le). Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication, 1994

## 2. Protection de l'environnement :

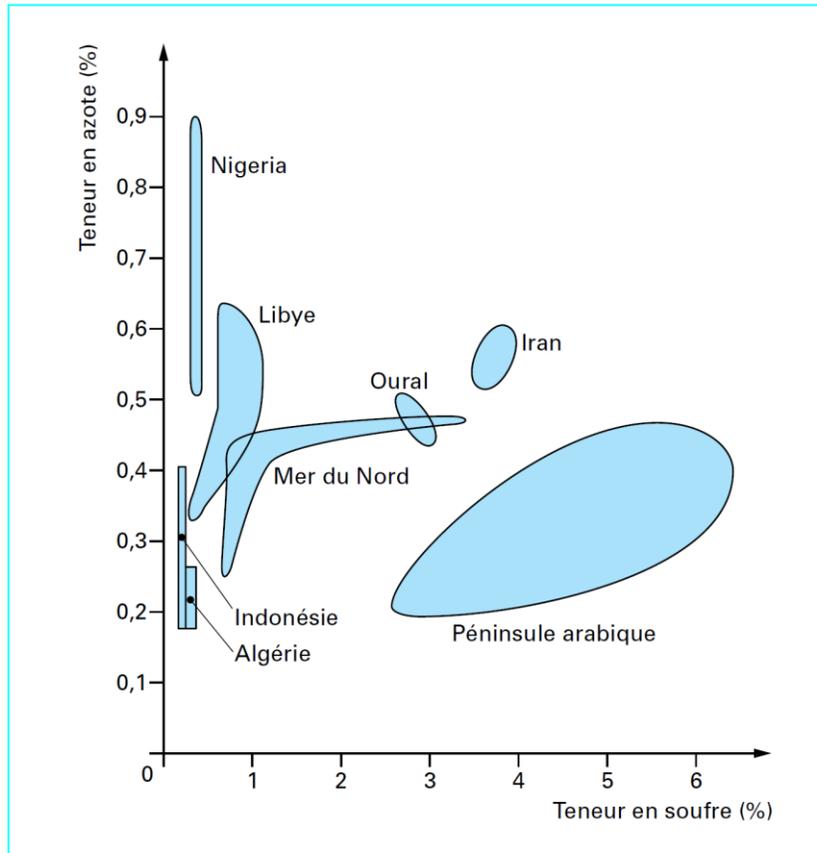
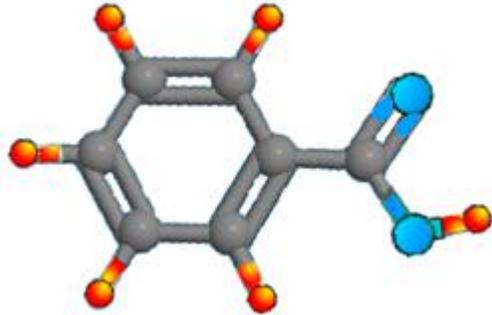


Figure 6 - Teneur en soufre et en azote des résidus sous vide distillant au-dessus de 550 °C (Source Total)

les pétroles bruts les plus intéressants seraient ceux qui présenteraient à la fois des faibles teneurs en **soufre** et en **azote** afin de **minimiser les rejets de polluants (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>)**

### 3. Enthalpie standard de réaction

Acide benzoïque

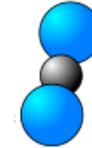


+

O<sub>2</sub>

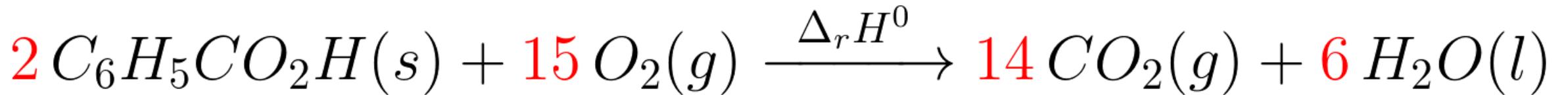


CO<sub>2</sub>



+

H<sub>2</sub>O

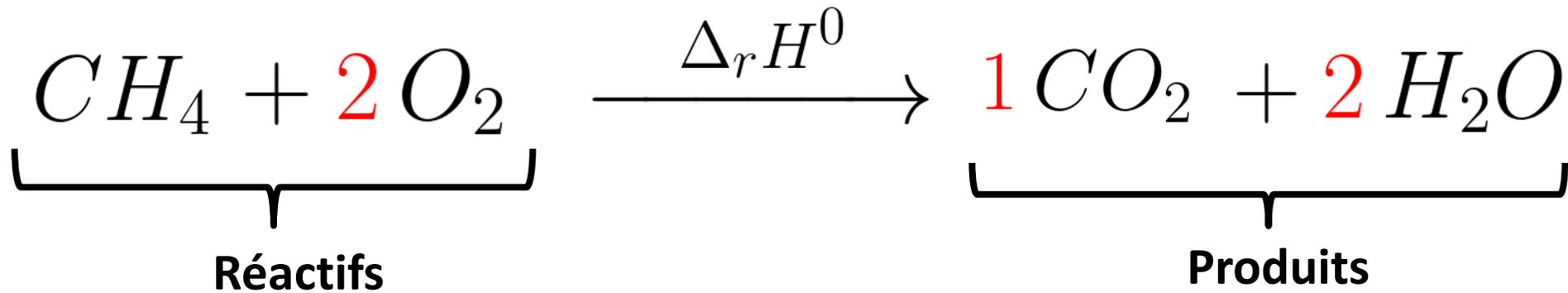
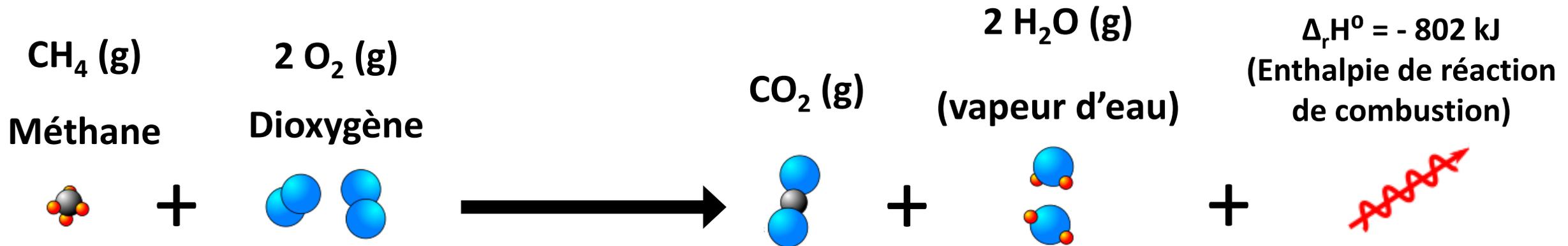


Réactifs

Produits

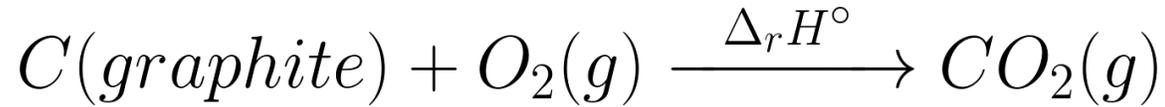
$$\Delta_r H^0 = -6459,5 \text{ kJ/mol}$$

### 3. Enthalpie standard de réaction



$$\Delta_r H^\circ = -802 \text{ kJ/mol}$$

### 3. Détermination de l'enthalpie standard de réaction



#### Méthode N° 1 :

$$\Delta_r H^\circ = \sum \Delta_f H_i^\circ (\textit{produits}) - \sum \Delta_f H_i^\circ (\textit{reactifs})$$

#### Méthode N° 2 (loi de Hess) :

$$\Delta_r H^\circ = \sum \Delta_r H_i^\circ$$

#### Méthode N° 3 :

Méthode des enthalpies de liens

C - H : 413,1 kJ/mol

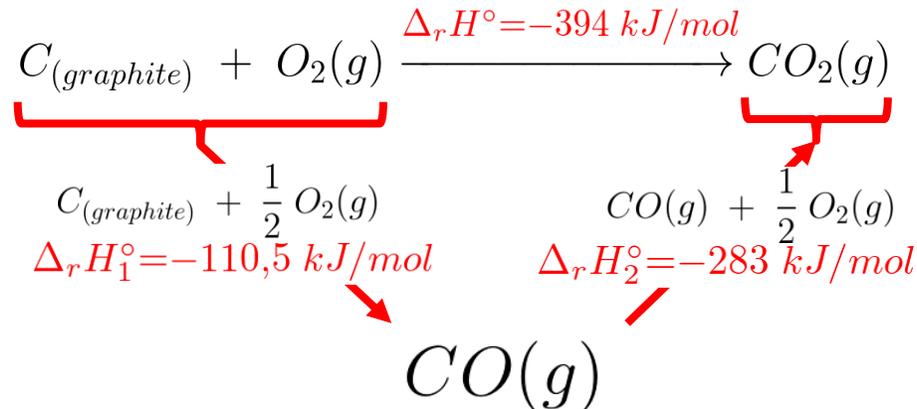
C = O : 803,5 kJ/mol

O = O : 498,4 kJ/mol

O - H : 462,9 kJ/mol

$$\begin{aligned} \Delta_r H^\circ &= \sum \Delta_f H_i^\circ (CO_2) \\ &- \sum \Delta_f H_i^\circ (C(\textit{graphite}) + O_2(g)) \\ &= -393,5 \text{ kJ/mol} \\ &- (0+0) \end{aligned}$$

$$\Delta_r H^\circ = -394 \text{ kJ/mol}$$



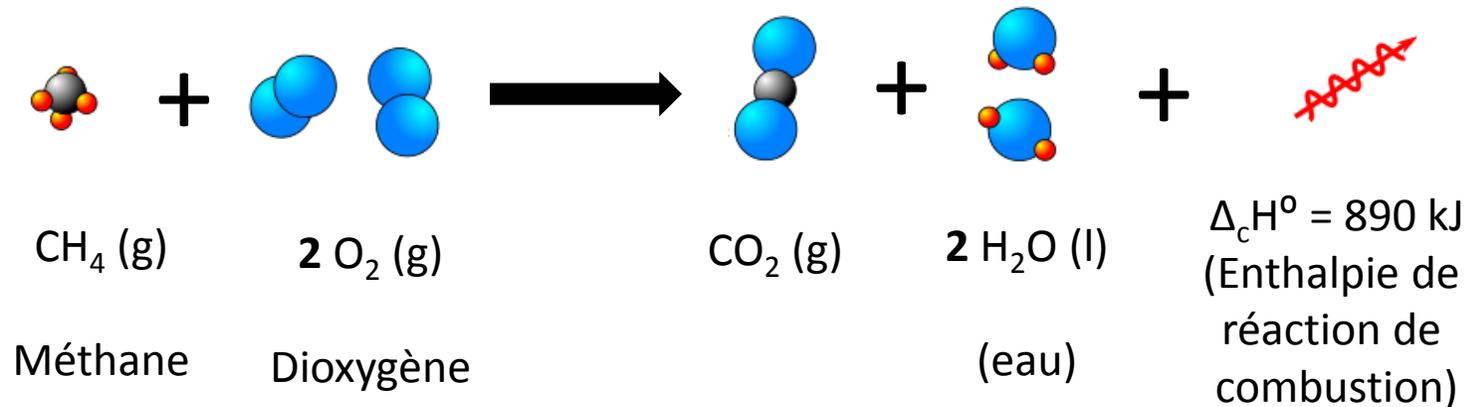
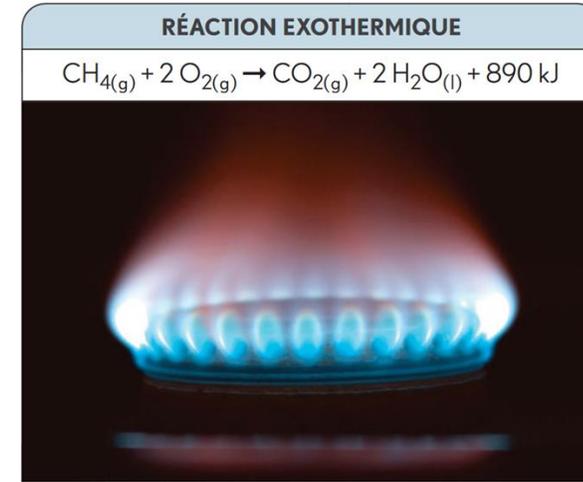
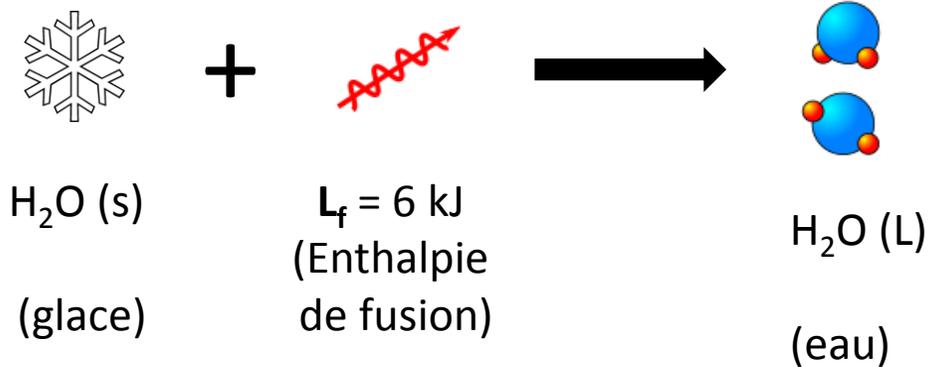
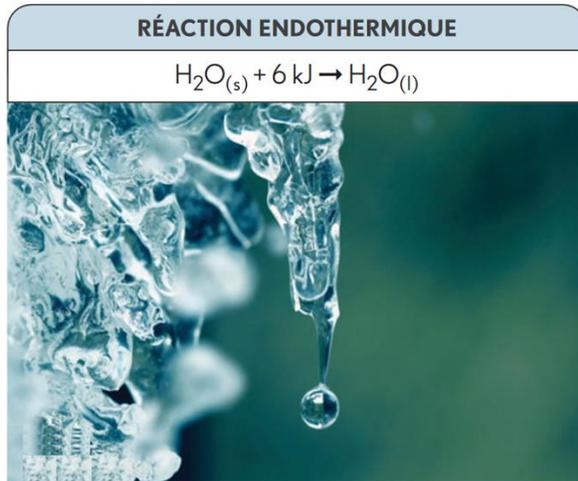
- Énergie absorbée par les ruptures de liaisons :



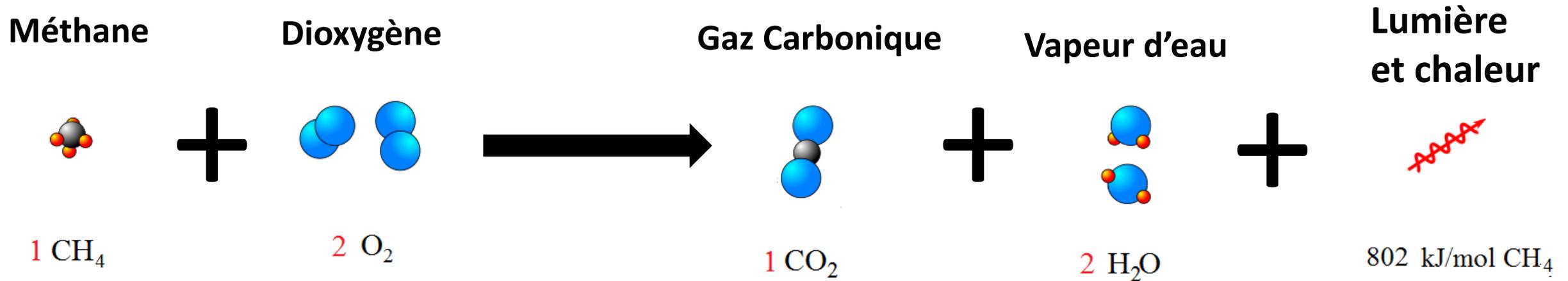
- Énergie dégagée par la formation des liaisons :  $O = C = O : 1607 \text{ kJ/mol}$

$$\begin{aligned} \Delta_r H^0 &= 1607 - (716,7 + 498,4) \\ &= -394,9 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

# Réactions endothermique et exothermique



### 3. Enthalpie standard de réaction de **combustion**



#### 4. Mélanges gazeux, Stoechiométrie, richesse et coefficient d'excès d'air

$$r = \left( \frac{m_a}{m_c} \right)_{st} = AFR_{st}$$

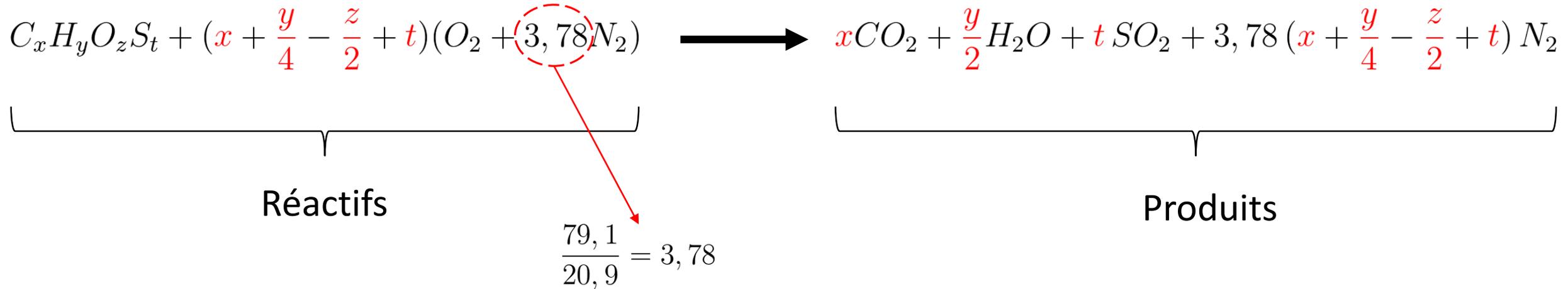
$$r^{-1} = \left( \frac{m_c}{m_a} \right)_{st} = FAR_{st}$$

**La richesse :**  $\varphi = \frac{\left( \frac{m_c}{m_a} \right)_{re}}{\left( \frac{m_c}{m_a} \right)_{st}} = \frac{FAR_{re}}{FAR_{st}} = \left( \frac{m_a}{m_c} \right)_{re}^{-1} \cdot \left( \frac{m_a}{m_c} \right)_{st} = \frac{AFR_{st}}{AFR_{re}}$

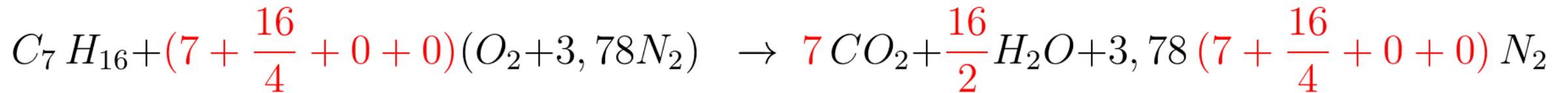
**Le Coefficient d'excès d'air :**  $\lambda = \frac{\left( \frac{m_a}{m_c} \right)_{re}}{\left( \frac{m_a}{m_c} \right)_{st}} = \frac{AFR_{re}}{AFR_{st}} = \left( \frac{m_c}{m_a} \right)_{re}^{-1} \cdot \left( \frac{m_c}{m_a} \right)_{st} = \frac{FAR_{st}}{FAR_{re}}$

**La relation entre la richesse et le coefficient d'excès d'air :**  $\lambda = \frac{1}{\varphi} \quad \varphi = \frac{1}{\lambda}$

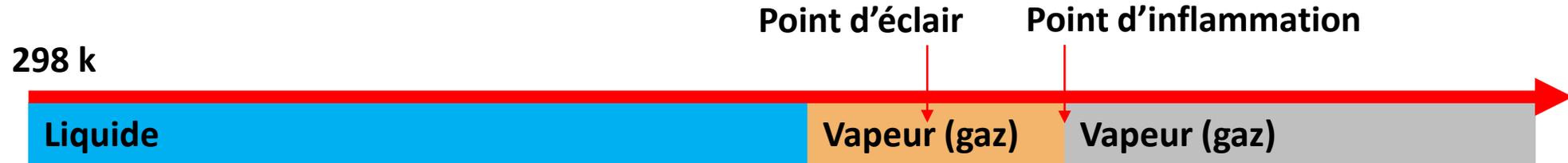
## 5. Réactions de combustion complète



### - Combustion de l'essence :



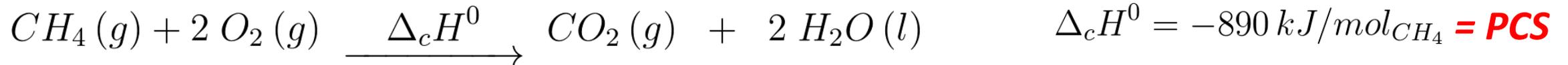
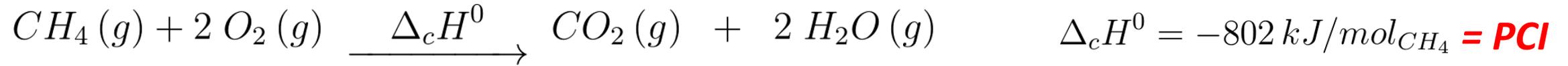
# Point d'éclair et point d'inflammation



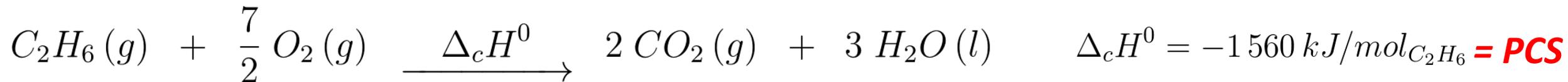
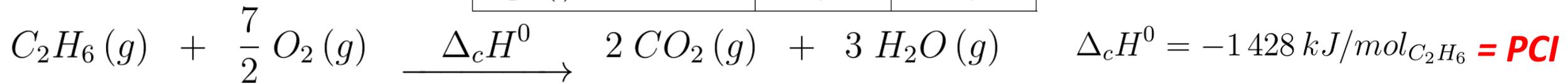
Gasoil	>55 °C	220 °C
Huile d'olive	191 – 242 °C	-
Huile de tournesol	316 °C	-
Essence	-40 °C	250 °C

Test empirique régulé par la norme ASTM E659

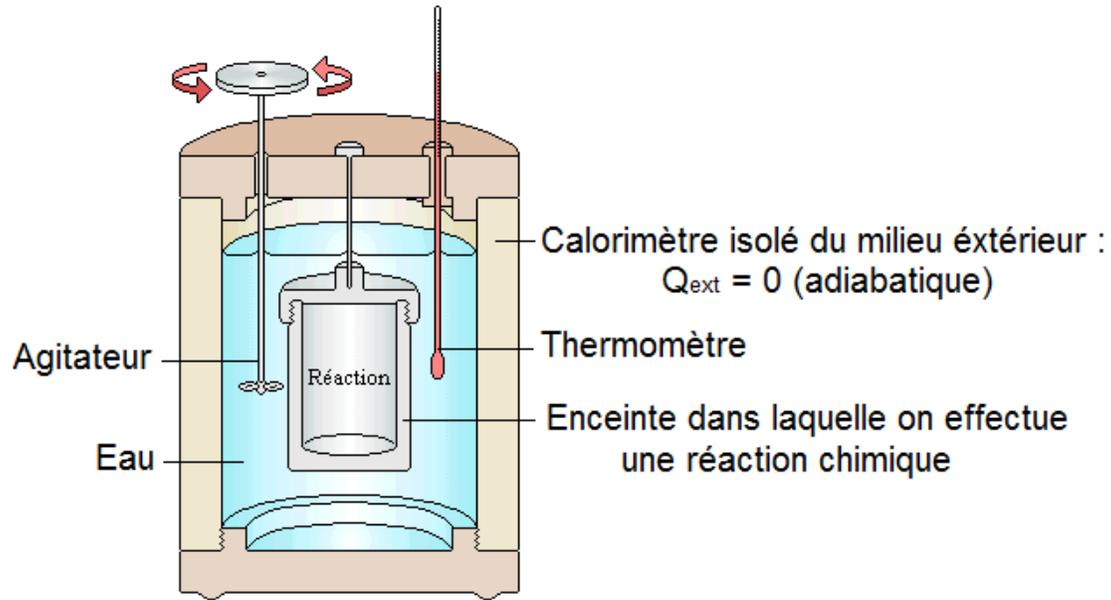
## 6. Différence entre PCI et PCS



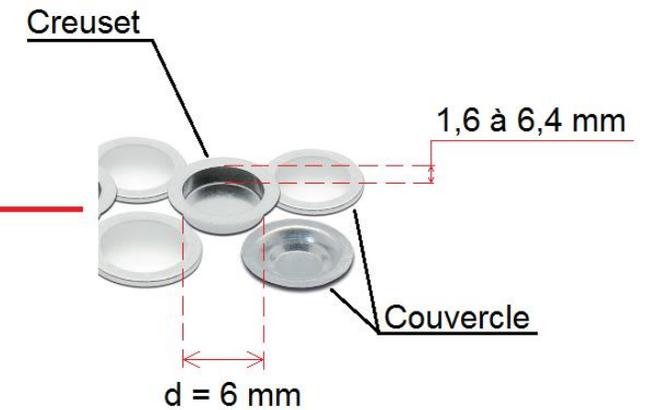
Composé chimique	M [ g/mol ]	$\Delta H_{f(298)}^0$ [ kJ/mol ]
H <sub>2</sub> O (g)	18,02	-241,8
H <sub>2</sub> O (l)	18,02	-285,10



# 6. Mesure du pouvoir calorifique



Calorimètre à enveloppe adiabatique.



Calorimètre différentielle à balayage  
(Differential Scanning Calorimetry - DSC)

Composé	PCI <sub>m</sub> (kJ · kg <sup>-1</sup> )	Composé	PCI <sub>m</sub> (kJ · kg <sup>-1</sup> )
<b>Paraffines</b>		<b>Acétyléniques</b>	
Méthane	50 009	Acétylène	48 241
Éthane	47 794	Méthylacétylène	46 194
Propane	46 357	But-1-yne	45 590
Butane	45 752	Pent-1-yne	45 217
Pentane	45 357		
Hexane	44 752		
Heptane	44 566		
Octane	44 427		
Nonane	44 311		
Décane	44 240		
Undécane	44 194		
Dodécane	44 147		
<b>Isoparaffines</b>		<b>Aromatiques</b>	
Isobutane	45 613	Benzène	40 170
Isopentane	45 241	Toluène	40 589
2-Méthylpentane	44 682	<i>o</i> -Xylène	40 961
2,3-Diméthylbutane	44 659	<i>m</i> -Xylène	40 961
2,3-Diméthylpentane	44 496	<i>p</i> -Xylène	40 798
2,2,4-Triméthylpentane	44 310	Éthylbenzène	40 938
		1,2,4-Triméthylbenzène	40 984
		Propylbenzène	41 193
		Cumène	41 217
<b>Naphtènes</b>		<b>Alcools</b>	
Cyclopentane	44 194	Méthanol	19 937
Méthylcyclopentane	43 636	Éthanol	28 865
Cyclohexane	43 450	<i>n</i> -Propanol	30 680
Méthylcyclohexane	43 380	Isopropanol	30 447
		<i>n</i> -Butanol	33 075
		Isobutanol	32 959
		Tertiobutanol	32 587
		<i>n</i> -Pentanol	34 727

Composé	PCI <sub>m</sub> (kJ · kg <sup>-1</sup> )	Composé	PCI <sub>m</sub> (kJ · kg <sup>-1</sup> )
<b>Oléfines</b>		<b>Éthers</b>	
Éthylène	47 195	Oxyde de diméthyle	28 703
Propylène	45 799	Oxyde de diéthyle	33 867
But-1-ène	45 334	Oxyde de dipropyle	36 355
But-2-ène cis	45 194	Oxyde de dibutyle	37 798
But-2-ène trans	45 124		
Isobutène	45 055		
Pent-1-ène	45 031		
2-Méthylbut-1-ène	44 799		
Hex-1-ène	44 426		
<b>Dioléfinés</b>		<b>Aldéhydes et cétones</b>	
Buta-1,3-diène	44 613	Formaldéhyde	17 259
Isoprène	44 078	Acétaldéhyde	24 156
		Propionaldéhyde	28 889
		Butyraldéhyde	31 610
		Acétone	28 548
<b>Dérivés nitrés</b>		<b>Carburants pétroliers</b> (valeurs moyennes)	
Nitrométhane	10 513	GPL-carburant	46 000
Nitropropane	20 693	Essence ordinaire	43 325
		Supercarburant	42 900
		Kérosène	42 850
		Gazole	42 600
		Fuel lourd	41 800
Carbone (graphite)	32 808	<b>Autres espèces chimiques</b>	
Hydrogène	120 971	Carbone	32 808
Oxyde de carbone	10 112	Hydrogène	120 971
Ammoniac	18 646	Oxyde de carbone	10 112
Soufre	4 639	Ammoniac	18 646
		Soufre	4 639

(1) Les composés sont pris dans leur état physique normal (solide, liquide ou gazeux) à pression atmosphérique et à 20 °C.