I Enthalpie standard de formation

1. On considère la réaction (1) se déroulant à la température de 298 K

$$CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} = CO_{2(g)}$$

telle que $\Delta_r H_1^\circ = -283\,kJ \cdot mol^{-1}$. Calculer $\Delta_f H^\circ(CO_{(g)})$. Commenter.

2. Calculer l'enthalpie standard de formation de l'éthane $C_2H_{6(g)}$ à 298 K.

Données à 298 K : $\Delta_f H^\circ(CO_{2(g)}) = -394\,kJ \cdot mol^{-1}$, $\Delta_f H^\circ(H_2O_{(l)}) = -286\,kJ \cdot mol^{-1}$ et

$$C_2H_{6(g)} + \frac{7}{2}O_{2(g)} = 2\,CO_{2(g)} + 3\,H_2O_{(l)} \quad \Delta_r H_2^\circ = -1561\,kJ \cdot mol^{-1}$$

II Température de flamme

On étudie la combustion du zinc dans l'air, qu'on suppose réalisée en réacteur fermé dans les proportions stœchiométriques à partir de n mol de zinc. La transformation est supposée totale.

1 - Écrire l'équation de réaction modélisant la combustion.

2 - Calculer l'enthalpie standard de la réaction à 300 K.

3 - En supposant la transformation réalisée dans un réacteur isobare fermé, déterminer la température maximale atteinte par le système partant d'une température $T_0 = 300\,\mathrm{K}$.

4 - On souhaite modérer cette température en ajoutant une quantité de matière xn de diazote dans le réacteur. Déterminer la valeur minimale de x pour atteindre une température finale ne dépassant pas 3000 K ?

Données thermodynamiques :

	$Zn_{(s)}$	$O_{2(g)}$	$ZnO_{(s)}$	$N_{2(g)}$
$\Delta_f H^\circ$ ($kJ \cdot mol^{-1}$, 298 K)			−348,1	
$C_{P,m}^\circ$ ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)	25,4	29,4	40,3	29,3

III Production électrique

À l'échelle mondiale, la production d'énergie est très largement dominée par la combustion de ressources fossiles, voir figure 1, fortement émettrices de gaz à effet de serre et donc responsables du réchauffement climatique. En termes de secteur d'activité, et toujours à l'échelle mondiale, la production d'électricité cause à elle seule 40 % des émissions de CO_2 dues à la combustion fossile. Les technologies utilisées dans les centrales électriques sont donc des facteurs clés de la lutte contre le réchauffement.

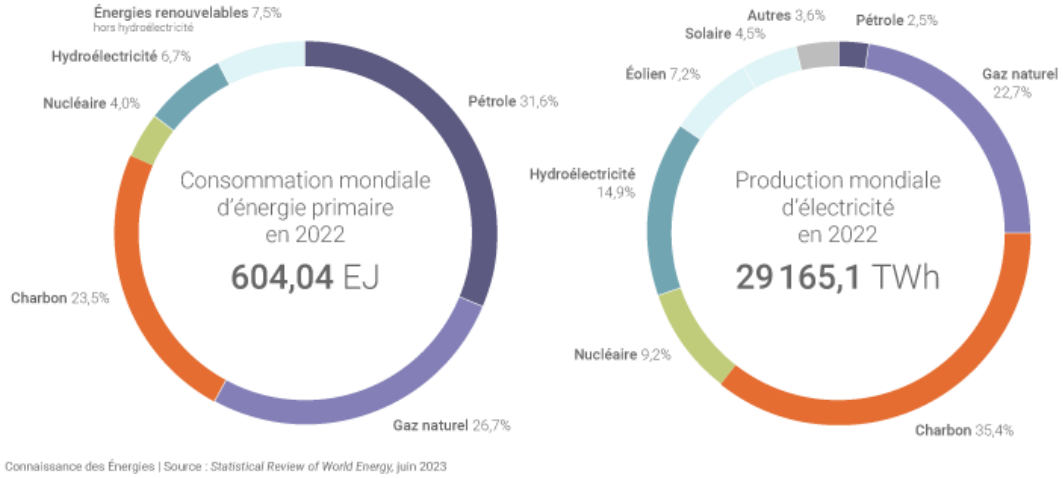


Figure 1 – Mix énergétique mondial.

Cet exercice a pour objectif de comparer l'impact carbone de différents types de centrales électriques thermiques. Une telle centrale est une machine thermique dans laquelle la détente de vapeur d'eau au travers d'une turbine permet la mise en rotation d'un alternateur. Quelle que soit la source primaire d'énergie utilisée, le rendement de l'installation est classiquement de l'ordre de 30 %, valeur qu'on prendra pour la suite. Néanmoins, il existe des technologies récentes (cycle combiné à gaz, centrale à charbon ultra super critique) permettant d'atteindre des rendements de 50 % pour le charbon et 60 % pour le gaz.

Données :

Espèce chimique	$C_{(s)}$	$CH_{4(g)}$	$O_{2(g)}$	$CO_{2(g)}$	$H_2O_{(g)}$
$\Delta_f H^\circ$ $(kJ \cdot mol^{-1})$	0	$-74,4$	0	$-393,5$	$-241,8$
M $(g \cdot mol^{-1})$	12,0	16,0	32,0	44,0	18,0

On étudie dans un premier temps à une centrale à gaz, fonctionnant par combustion de gaz naturel assimilé à du méthane pur.

1 - Écrire l'équation bilan de la combustion du méthane.

2 - Déterminer la quantité de matière de méthane nécessaire pour produire 1 kWh d'énergie électrique.

3 - En déduire la masse de CO_2 libérée par la réaction de combustion.

4 - Reprendre ces questions pour une centrale au charbon, que l'on modélise par du carbone pur (la teneur en carbone du charbon est de 80 à 90 %).

Une spécificité française est le recours massif au nucléaire dans le mix électrique : c'est près de 65 % de l'électricité française qui a été produite par ce biais en 2023. Le gaz et le charbon cumulés ne sont la source que de 6,6 % de la production électrique nette.

5 - Cette large utilisation de l'énergie nucléaire est-elle un atout ou un inconvénient en termes de bilan carbone ?

IV Production de ciment

L'industrie cimentière est aujourd'hui responsable de 5 à 7 % des émissions de CO_2 à l'échelle mondiale. La fabrication d'une tonne de ciment rejette en moyenne l'équivalent de 0,6 tonne de CO_2 dans l'atmosphère. Cet exercice a pour objectif de retrouver cet ordre de grandeur en procédant à un (rapide) bilan carbone de la production.

L'élaboration des ciments se fait à haute température dans un four à partir d'un mélange de 80 % de calcaire $CaCO_3$ et de 20 % d'argile, composé d'alumine Al_2O_3 et de silice SiO_2. Le composé majoritaire obtenu est le silicate de calcium Ca_3SiO_5, noté C_3S par les cimentiers.

1 - Écrire l'équation de réaction notée (R_1) qui modélise la formation de Ca_3SiO_5 solide à partir des seuls réactifs silice et calcaire. Quel autre produit est formé pendant la réaction ?

2 - Rappeler en quoi consiste l'approximation d'Ellingham. Pourquoi est-elle nécessaire pour utiliser la table thermodynamique donnée ? On se place dans ce cadre pour la suite.

3 - Calculer l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H_1^\circ$ de la réaction (R_1). Est-elle endo ou exothermique ?

4 - Calculer la masse de calcaire $CaCO_3$ nécessaire pour obtenir une tonne de $Ca_3SiO_{5(s)}$ par la réaction (R_1) et la chaleur qu'il faut lui fournir à pression constante et température constante.

Les fours utilisés sont généralement des fours à gaz, dans lesquels l'énergie est apportée par la combustion du méthane $CH_{4(g)}$. On donne l'enthalpie standard de la réaction (R_2) de combustion du méthane, écrite conventionnellement avec un nombre stoëchiométrique -1 pour le méthane : $\Delta_r H_2^\circ = -690\,\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

5 - Écrire l'équation bilan de la réaction (R_2).

6 - Quelle masse de méthane faut-il brûler pour apporter l'énergie nécessaire à la transformation d'une tonne de $CaCO_{3(s)}$ en $Ca_3SiO_{5(s)}$ à la pression p° et à température constante ?

7 - Quelle est la masse totale de dioxyde de carbone produite au cours du processus ?

Données :

▷ Extrait de table thermodynamique à 298 K :

	$CaCO_{3(s)}$	$SiO_{2(s)}$	$Ca_3SiO_{5(s)}$	$CO_{2(g)}$
$\Delta_f H^\circ$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	-1206	$-910{,}0$	-2876	$-393{,}1$

▷ Masses molaires :

$M_H = 1{,}0\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ $M_C = 12{,}0\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ $M_O = 16{,}0\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ $M_{Si} = 28{,}1\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ $M_{Ca} = 40{,}1\,\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$