

DM7 à rendre le 14/11/25

Le Blue Fire

Le *Blue Fire* est l'une des montagnes russes du parc d'attraction Europa-Park, situé à Rust, en Allemagne. Elle est en service depuis le 4 avril 2009. Le nom de l'attraction a été choisi en référence à la couleur de la flamme émise par la combustion du gaz naturel, vecteur énergétique important.



Figure 1 – Vue d'ensemble du *Blue Fire*

Cette montagne russe fait partie de la famille des montagnes russes lancées (*launched coaster*) : en effet, l'accélération principale du train a lieu dans la zone de départ, à l'aide d'une longue zone accélératrice rectiligne.

Ce sujet propose de suivre pas à pas le trajet d'un passager du *Blue Fire* pour étudier quelques aspects physiques et chimiques liés à cette attraction. Des données numériques utiles ainsi que quelques formules sont regroupées en fin d'énoncé, quand elles ne sont pas redonnées directement dans le texte.

Partie A – Origines du Blue Fire

I – Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement dans les roches poreuses du sous-sol, exploité par l'Homme pour répondre à une partie de ses besoins énergétiques. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité, le chauffage, et comme carburant.

Le terme « gaz naturel » fait spécifiquement référence à un mélange d'hydrocarbures gazeux principalement composé de méthane (CH_4) mais contenant aussi d'autres alcanes (butane, propane...), et parfois un faible pourcentage de dioxyde de carbone (CO_2), de diazote (N_2), de sulfure d'hydrogène (H_2S) ou d'hélium (He).

Q1. Donner les formules de Lewis de la molécule de méthane, de la molécule de diazote et de la molécule de dioxyde de carbone.

Dans la suite, pour simplifier, on pourra assimiler le « gaz naturel » à du méthane pur. Au cours de la combustion du méthane, celui-ci réagit avec le dioxygène de l'air pour former de l'eau et du dioxyde de carbone, supposés à l'état de vapeur.

Q2. Établir l'équation de réaction modélisant la combustion du méthane.

Q3. Déterminer la valeur de l'enthalpie standard de réaction de cette réaction, et commenter son signe.

Q4. Déterminer la valeur de l'énergie thermique libérée par la combustion complète d'un mètre cube de méthane pur assimilé à un gaz parfait, à la température initiale $T = 0\text{ °C}$ sous une pression fixée de 1,013 bar. Cette quantité est nommée *pouvoir calorifique inférieur* (ou PCI). Comparer à sa valeur tabulée pour le gaz naturel commercial, comprise entre 9,2 et 10,2 kW · h · m⁻³ suivant le type de gaz et l'altitude.

En 2023, la France a consommé 33,9 milliards de m³ de gaz naturel tous usages confondus - volume calculé dans les conditions de la question **Q4** - la quasi-totalité étant importée. Par ailleurs, son empreinte carbone totale est estimée pour 2023 par l'INSEE à 644 millions de tonnes équivalent CO₂. L'empreinte carbone de la France représente la quantité de gaz à effet de serre (GES) induite par la demande finale intérieure d'un pays.

Q5. Estimer la proportion due à la consommation de gaz naturel dans l'empreinte carbone totale de la France en 2023.

On cherche maintenant à estimer la température dans la flamme bleue produite par la combustion du méthane qui a donné son nom au **Blue Fire**. Celle-ci peut être modélisée en première approche comme un réacteur adiabatique fermé dans laquelle se déroule la transformation. Ce réacteur est constitué initialement d'air d'une part - de composition molaire de 80 % de N₂ et 20 % de O₂ - et de méthane d'autre part. Les réactifs sont supposés en proportions stoechiométriques dans ce réacteur, et le mélange gazeux avant combustion est initialement à la température de $T_i = 20\text{ °C}$.

Les capacités thermiques à pression constante des différents gaz seront supposées indépendantes de T , de valeurs précisées dans les données numériques.

Q6. Proposer une estimation numérique de la température de la flamme bleue en détaillant la démarche.

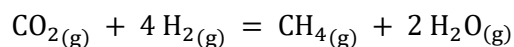
II – Le Power to Gas

Le *power to gas* est une technologie qui permet de convertir l'électricité excédentaire, souvent issue de sources renouvelables comme l'éolien ou le solaire, en gaz. Ce procédé se déroule en plusieurs étapes :

1. **Électrolyse de l'eau** : L'électricité est utilisée pour décomposer l'eau en dihydrogène et en dioxygène.

2. **Méthanation** : L'hydrogène produit est ensuite combiné avec du dioxyde de carbone pour produire du méthane.

La réaction modélisant la transformation ayant lieu au cours de la méthanation est la réaction de Sabatier :



Les conditions opératoires pour la méthanation sont cruciales pour optimiser le rendement de la réaction. Généralement, la réaction se déroule à des températures entre 200 °C et 400 °C, et sous une pression comprise entre 20 et 30 bars.

Le *power to gas* présente plusieurs avantages, tant sur le plan industriel qu'environnemental :

- **Stockage de l'énergie** : Il permet de stocker l'électricité excédentaire sous forme de gaz, qui peut être utilisé ultérieurement pour produire de l'électricité ou comme carburant.
- **Réduction des émissions de CO₂** : En utilisant le CO₂ capturé dans l'atmosphère ou issu de procédés industriels, le *power to gas* contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- **Intégration des énergies renouvelables** : Cette technologie facilite l'intégration des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire) dans le réseau électrique, en offrant une solution de stockage flexible.
- **Diversification des sources énergétiques** : Le méthane produit peut être injecté dans le réseau de gaz naturel existant, diversifiant ainsi les sources d'approvisionnement en énergie.

- Q7.** Déterminer les valeurs de l'enthalpie standard de réaction et l'entropie standard de réaction pour la réaction de Sabatier à 298 K.
- Q8.** On suppose les enthalpies et entropies standard de réaction indépendantes de la température. Déterminer la valeur de la constante d'équilibre de cette réaction à $T = 400\text{ °C}$. Commenter.
- Q9.** En s'appuyant sur la loi de Van't Hoff fournie dans les données, déterminer si une augmentation de température favorise ou défavorise le rendement de cette réaction. En déduire que le choix de la température du milieu réactionnel résulte d'un compromis que l'on précisera.
- Q10.** En notant p la pression du milieu, établir l'expression du quotient réactionnel Q_r en fonction des quantités de matière en chaque gaz, de la pression p et de la pression standard p^0 .
- Q11.** En déduire l'effet d'une augmentation de la pression du milieu sur le rendement de cette réaction. Commenter le résultat obtenu.

Données utiles pour le traitement du sujet

- Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\text{ J} \cdot \text{K} \cdot \text{mol}^{-1}$
- $T(\text{°C}) = T(\text{K}) - 273$
- Définition du $\text{kW} \cdot \text{h}$: $1\text{ kW} \cdot \text{h}$ est l'énergie consommée par un dispositif de puissance 1 kW pendant une durée d'une heure.
- Masses molaires : $M(\text{H}) = 1,0 \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{C}) = 12,0 \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{O}) = 16,0 \cdot \text{mol}^{-1}$
- Données thermodynamiques à 298 K :

| | $\text{H}_{2(\text{g})}$ | $\text{N}_{2(\text{g})}$ | $\text{O}_{2(\text{g})}$ | $\text{CO}_{2(\text{g})}$ | $\text{CH}_{4(\text{g})}$ | $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| $\Delta_f H^0$ en $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ | 0 | 0 | 0 | -393,5 | -74,6 | -241,8 |
| S_m^0 en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ | 130,7 | 191,6 | 205,2 | 213,8 | 186,3 | 188,8 |

- Capacités thermiques moyennes à pression constante des différents gaz, calculées sur l'intervalle de température [298K, 3 500K].

| | $\text{H}_{2(\text{g})}$ | $\text{N}_{2(\text{g})}$ | $\text{O}_{2(\text{g})}$ | $\text{CO}_{2(\text{g})}$ | $\text{CH}_{4(\text{g})}$ | $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| $C_{p,n}$ en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ | 29,2 | 30,1 | 32,3 | 45,4 | 44,5 | 37,6 |

- Loi de Van't Hoff :

$$\frac{d \ln(K^0)}{dT} = \frac{\Delta_r H^0}{RT^2}$$