

## 1 La voiture à pile à combustible à dihydrogène

Le transport est devenu l'une des premières sources de pollution.

Parmi les problèmes environnementaux posés, on peut citer la production de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, qui n'a pas de toxicité directe mais qui est partiellement responsable du réchauffement climatique à l'échelle planétaire. Ce réchauffement laisse craindre, à moyen terme, une catastrophe écologique de très grande ampleur.

L'utilisation de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible consommant du dihydrogène constitue donc une alternative intéressante (figure 1).



FIG. 2 – Un véhicule utilisant une pile à combustible.



FIG. 1 – La Honda FCX Clarity, première voiture commercialisée avec une pile à combustible.

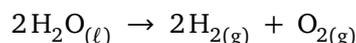
Ainsi, de nombreux constructeurs automobiles développent actuellement des véhicules à pile à combustible (figure 2). Mercedes par exemple réalise des essais avec sa « Classe B », qui affiche une consommation de 1,14 kg de dihydrogène aux 100 km, contre 6,5 L d'essence aux 100 km pour une voiture à motorisation classique.

## 2 Les sources de dihydrogène

La plupart des voitures actuelles consomment de l'essence. Celle-ci est principalement constituée d'octane, alcane liquide de formule  $C_8H_{18}$ . La réaction de combustion de l'octane se déroule dans le moteur. Si celui-ci est correctement réglé, la combustion avec le dioxygène de l'air produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Avec une voiture possédant une pile à combustible utilisant du dihydrogène, le seul rejet est de l'eau.

Seulement, le dihydrogène n'existant pas à l'état naturel sur Terre, utiliser ce gaz comme carburant implique donc de le produire. Actuellement, 96 % de la production de dihydrogène est réalisée à partir de carburants fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon, voir la figure 3) et cette production libère du  $CO_2$ .

Le dihydrogène peut être produit par électrolyse de l'eau, dont l'équation est la suivante :



L'énergie chimique à fournir pour former une mole de dihydrogène est  $286 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Cette électrolyse nécessite de l'énergie électrique, et seuls 60 % de l'énergie électrique nécessaire à cette électrolyse sont transformés en énergie chimique, utilisable par la réaction chimique.

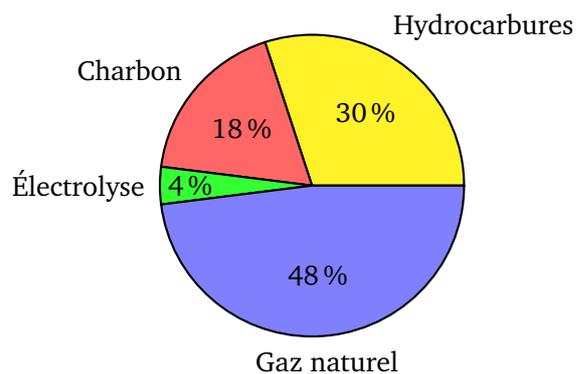


FIG. 3 – Origine du dihydrogène produit.

### 3 Le stockage du dihydrogène dans le véhicule

Un problème épineux concerne le stockage du dihydrogène dans le véhicule. Chez Mercedes, le dihydrogène est stocké à l'état gazeux sous une pression de 350 bar dans un réservoir de 100 L placé à l'arrière du véhicule (figure 4). Cette capacité de stockage confère au véhicule une autonomie qui n'est pas précisée.

À l'intérieur du réservoir, le volume occupé par une mole de dihydrogène gazeux, appelé volume molaire, est égal à  $V_m = 0,070 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$  lorsque le réservoir est plein.



FIG. 4 – Réservoir de dihydrogène sous pression à l'arrière du véhicule.

### 4 Les panneaux photovoltaïques pour produire l'énergie électrique



FIG. 5 – Panneaux photovoltaïques sur un toit.

Le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique des cellules photovoltaïques (figure 5) est de l'ordre de 20 %.

La puissance solaire moyenne reçue par unité de surface de panneau est  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

L'énergie  $E$  en joule (J), la puissance  $P$  en watt (W) et le temps  $t$  en seconde (s) sont reliés par la relation suivante :

$$E = P \cdot t$$

### 5 Problème à résoudre

Madame D., dirigeante d'une société de dépannage à domicile, est soucieuse de l'impact que son entreprise peut avoir sur l'environnement. Afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et ainsi améliorer le bilan carbone de son entreprise, elle envisage d'installer  $70 \text{ m}^2$  de panneaux solaires sur le toit de ses bâtiments et elle se demande si son installation solaire permettrait de générer l'électricité nécessaire au rechargement du véhicule à hydrogène de sa société qui parcourt en moyenne  $20\,000 \text{ km}$  par an.

**Vous rédigerez un rapport argumenté et critique répondant à l'interrogation de Madame D. (20 lignes maximum).**

**L'ensemble des calculs nécessaires sera présenté séparément, à la suite du rapport.**

## Grille DS4 Spé

### Discussion critique

.../8

- Idée 1 : il faut utiliser l'électrolyse pour un bilan carbone neutre
- Idée 2 : possibilité de 11 000 km avec 70 m<sup>2</sup>
- Idée 3 : avec 130 m<sup>2</sup> au lieu de 70 m<sup>2</sup> indépendance énergétique
- Idée 4 : stock dihydrogène quotidien de 30 km
- Idée 5 : réservoir du véhicule qui permet 246 km
- Critique 1 : ensoleillement moyen inconnu
- Critique 2 : orientation des panneaux inconnue
- Critique 3 : coût financier et écologique

### Calculs

.../12

- Ensoleillement  $t = 8$  h
- Panneaux photovoltaïques  $P_{reçue} = 14$  kW
- $\eta_{panneaux} = P_{elec}/P_{reçue}$
- Panneaux photovoltaïques  $P_{elec} = 2,8$  kW
- Panneaux photovoltaïques  $E = 81$  MJ
- $\eta_{electrolyseur} = E_{chim}/E_{elec}$
- Électrolyseur  $E_{chim} = 49$  MJ par jour
- $n_{electrolyseur} = E_{chim}/\Delta_r G$
- $m = n \cdot M = 0,34$  kg de H<sub>2</sub> par jour
- Possible 30 km ou 11 000 km, besoin moyen 55 km ou 20 000 km
- $n_{réservoir} = V/V_m = 1,4$  kmol
- Autonomie maximale 246 km

## Grille DS4 Spé

### Discussion critique

.../8

- Idée 1 : il faut utiliser l'électrolyse pour un bilan carbone neutre
- Idée 2 : possibilité de 11 000 km avec 70 m<sup>2</sup>
- Idée 3 : avec 130 m<sup>2</sup> au lieu de 70 m<sup>2</sup> indépendance énergétique
- Idée 4 : stock dihydrogène quotidien de 30 km
- Idée 5 : réservoir du véhicule qui permet 246 km
- Critique 1 : ensoleillement moyen inconnu
- Critique 2 : orientation des panneaux inconnue
- Critique 3 : coût financier et écologique

### Calculs

.../12

- Ensoleillement  $t = 8$  h
- Panneaux photovoltaïques  $P_{reçue} = 14$  kW
- $\eta_{panneaux} = P_{elec}/P_{reçue}$
- Panneaux photovoltaïques  $P_{elec} = 2,8$  kW
- Panneaux photovoltaïques  $E = 81$  MJ
- $\eta_{electrolyseur} = E_{chim}/E_{elec}$
- Électrolyseur  $E_{chim} = 49$  MJ par jour
- $n_{electrolyseur} = E_{chim}/\Delta_r G$
- $m = n \cdot M = 0,34$  kg de H<sub>2</sub> par jour
- Possible 30 km ou 11 000 km, besoin moyen 55 km ou 20 000 km
- $n_{réservoir} = V/V_m = 1,4$  kmol
- Autonomie maximale 246 km

## Solution

Chère Madame D.,

L'installation que vous envisagez va vous permettre de parcourir 11 000 km avec un bilan carbone neutre, en disposant d'un véhicule avec une autonomie de 250 km au maximum, et de 30 km au minimum, selon le stock de dihydrogène dont vous disposez à un instant  $t$ . Dans le cas où vous envisageriez d'éliminer totalement la consommation de carburant ordinaire, il faudrait hausser la surface de capteurs solaires à 130 m<sup>2</sup>, et constituer un stock suffisant de dihydrogène pour palier à toute variation dans l'utilisation de votre véhicule ou dans la production de dihydrogène.

Ces chiffres ne tiennent pas compte du facteur météorologique, ni de l'orientation des panneaux, facteurs pour lesquels nous ne disposons pas d'éléments lors de cette étude préliminaire. Une seconde étude peut nous être commandée, qui tiendrait compte du nombre d'heures d'ensoleillement moyen pour chaque jour, basé sur les observations météorologiques passées, et sur l'orientation du toit de votre entreprise. En l'absence de données, nous nous sommes basés sur un cas idéal type d'une orientation idéale et d'un ensoleillement constant et régulier chaque jour de l'année.

J'attire aussi votre attention sur le coût de l'installation, coût financier et coût écologique, puisqu'il faut bien fabriquer et installer les panneaux solaires, à comparer aux 1 950 € de carburant fossile consommés par an par un véhicule dans l'usage envisagé. On peut estimer que l'installation a une durée de vie supérieure à une vingtaine ou une trentaine d'années, donc tout est une question de perspective.

Bien cordialement, l'élève de Spécialité physique-chimie lambda.

### Détail des calculs

- Supposons pour simplifier que les panneaux solaires peuvent fonctionner 8 heures par jour, et qu'il fait beau plus de 230 jours par an (300 jours de beau temps dans les Alpes du Sud...). On a donc, avec ces données très optimistes :

$$t = 8 \text{ h}$$

- Le document 4 indique une puissance par unité de surface de 200 W · m<sup>-2</sup> donc pour une surface totale de  $S = 70 \text{ m}^2$  la puissance reçue par l'ensemble de l'installation sera de :

$$P_{\text{reçue}} = 200 \times 70 = 14 \text{ kW}$$

- Le document 4 indique un rendement de  $\eta_1 = 20\%$ , donc la puissance électrique disponible sera de :

$$\eta_1 = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{\text{reçue}}} \Leftrightarrow P_{\text{élec}} = \eta_1 \cdot P_{\text{reçue}}$$

$$\Rightarrow P_{\text{élec}} = 0,20 \times 14 = 2,8 \text{ kW}$$

- Finalement, l'énergie électrique disponible sur une journée entière de fonctionnement des panneaux solaires est de :

$$E_{\text{élec}} = P_{\text{élec}} \cdot t$$

$$E_{\text{élec}} = 2,8 \times 8 \times 3600 = 81 \text{ MJ}$$

- Cette énergie électrique est utilisée dans des électrolyseurs pour produire du dihydrogène. Tout autre mode de production serait contraire à l'objectif initialement fixé, car le document 2 indique que les autres sources possibles de dihydrogène sont basées sur des combustibles fossiles.
- Le document 2 indique que cette électrolyse a un rendement de  $\eta_2 = 60\%$ , donc il est possible de récupérer une énergie chimique de :

$$\eta_2 = \frac{E_{\text{chim}}}{E_{\text{élec}}} \Leftrightarrow E_{\text{chim}} = \eta_2 \cdot E_{\text{élec}}$$

$$\Rightarrow E_{\text{chim}} = 0,60 \times 81 = 49 \text{ MJ}$$

- Cette énergie chimique permet de produire une certaine quantité de dihydrogène chaque jour, notons la  $n$ , en moles (mol). Le document 2 indique que l'énergie nécessaire pour produire une mole de dihydrogène est de  $286 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ , donc avec 49 MJ on peut produire chaque jour :

$$n = \frac{49 \times 10^6}{286 \times 10^3} = 1,7 \times 10^2 \text{ mol}$$

- La masse  $m_{\text{dispo}}$  de dihydrogène correspondante est facile à calculer :

$$n = \frac{m_{\text{dispo}}}{M} \Leftrightarrow m_{\text{dispo}} = n \cdot M$$

$$\Rightarrow m_{\text{dispo}} = 1,7 \times 10^2 \times 2,00$$

$$\Rightarrow m_{\text{dispo}} = 0,34 \text{ kg}$$

- La voiture de société doit parcourir 20 000 km par an, et le dihydrogène est produit et stocké toute l'année, donc seul le kilométrage moyen par jour est intéressant :

$$\frac{20\,000}{365,25} = 55 \text{ km}$$

- Le document 1 indique une consommation de dihydrogène de 1,14 kg au 100 km, donc pour 55 km la masse de dihydrogène nécessaire est de :

$$m_{\text{nécessaire}} = \frac{1,14}{100} \times 55 = 0,63 \text{ kg}$$

- On constate  $m_{\text{nécessaire}} > m_{\text{dispo}}$ , l'équipement initialement envisagé est sous-dimensionné, il faut une plus grande surface de panneaux solaires, que l'on peut calculer par proportionnalité :

$$S_{\text{nécessaire}} = \frac{m_{\text{nécessaire}}}{m_{\text{dispo}}} \cdot S$$

$$S_{\text{nécessaire}} = \frac{0,63}{0,34} \times 70 = 130 \text{ m}^2$$

Alternativement un autre calcul pertinent consiste à trouver combien de kilomètre le véhicule peut parcourir avec l'installation envisagée, par jour puis par an :

$$d_{\text{quotidien}} = \frac{0,34}{1,14} \times 100 = 30 \text{ km}$$

$$d_{\text{annuel}} = 30 \times 365,25 \simeq 11\,000 \text{ km}$$

- La voiture de société doit parcourir 20 000 km par an, en comptant 5 jours de travail par semaine et 52 semaines par an, et en soustrayant 6 semaines de congés, on arrive à un total de  $(52 - 6) \times 5 = 230$  jours travaillés. Le kilométrage quotidien sera donc de :

$$\frac{20\,000}{230} = 87 \text{ km}$$

- Le document 3 indique un réservoir pour le véhicule de volume  $V = 100 \text{ L}$ , dans des conditions de pression et de température telles que le volume molaire du gaz vaut  $V_m = 0,070 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ , donc le réservoir peut contenir une quantité de dihydrogène de :

$$n_{\text{réservoir}} = \frac{V}{V_m} = \frac{100}{0,070} = 1,4 \text{ kmol}$$

- La masse de dihydrogène correspondante et l'autonomie en kilomètre s'en déduisent facilement :

$$m_{\text{réservoir}} = n_{\text{réservoir}} \cdot M = 1,4 \times 2,00 = 2,8 \text{ kg}$$

$$\frac{2,8}{1,14} \times 100 = 246 \text{ km}$$

L'autonomie du véhicule réservoir plein est suffisante pour l'usage envisagé.

- Calculons pour terminer le coût en carburant fossile pour le véhicule présenté au document 1 : 6,5 L d'essence aux 100 km, 20 000 km par an, pour un carburant à 1,5 € environ :

$$6,5 \times \frac{20\,000}{100} \times 1,5 = 1\,950 \text{ €}$$

Ce coût relativement modeste nous permet d'étayer la discussion critique demandée.