

## CHAP 04-ACT PB/DOC Electrolyse de l'eau

**Mots clés :** Piles à combustible ; Production de dihydrogène

**Objectifs :**

- Résolution de problème scientifique
- Extraire l'information utile
- Reasonner
- Calculer

**1. ALIMENTATION ELECTRIQUE D'UNE NAVETTE SPATIALE****1.1. Enoncé**

L'alimentation électrique d'une navette spatiale (doc1) est réalisée par trois modules « piles à combustibles » Hydrox (doc. 2). Chacun de ces modules est composé de 32 piles à combustible branchées en série, chacune étant alimentée en dihydrogène à une électrode et en dioxygène à l'autre électrode. Son électrolyte est constitué par une solution aqueuse concentrée d'hydroxyde de potassium,  $K^+_{(aq)} + HO^-_{(aq)}$ , basique. La tension aux bornes d'une pile est égale à  $U = 0,875 \text{ V}$ , l'intensité du courant produit peut varier entre 50 et 400 A.

L'eau produite par la réaction de fonctionnement de la pile est filtrée, stockée et peut être consommée par l'équipage.

Un module Hydrox suffit à l'alimentation de la navette, mais trois sont présents pour assurer la sécurité : lorsqu'un module est actif, un autre est en veille, prêt à prendre le relais si nécessaire.

**Données**

**Couples rédox mis en jeu :**  $H_2O_{(l)}/H_{2(g)}$  et  $O_{2(g)}/H_2O_{(l)}$ .

**Charge électrique correspondant à l'échange d'une mole d'électrons aux électrodes :**  $F = 96,5 \text{ kC}$ .

**Intensité du courant délivré, en moyenne :**  $I = 250 \text{ A}$ .

**Volume d'eau consommé quotidiennement par personne :**  $2,0 \text{ L}$ .

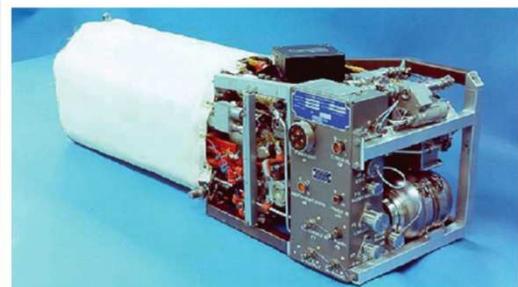
**Masse volumique de l'eau :**  $\mu = 1,0 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

**1.2. problème**

Quelle est l'énergie fournie par un module lors d'un vol de 10 jours? L'eau alors produite suffit-elle à la consommation pour un équipage de 5 astronautes?



**Doc. 1** La navette spatiale américaine.



**Doc. 2** La pile à combustible Hydrox.

### 1.3. Aide à la résolution

#### Quel problème pose l'énoncé? Quelles pistes suivre pour y répondre?

- L'énoncé demande de déterminer l'énergie fournie par un module et le volume d'eau formé
- Déterminer la tension aux bornes d'un module, exploiter la définition de l'énergie é la charge électrique qui a circulé puis établir les équations des réactions aux électrodes et de la réaction de fonctionnement de la pile constitue une piste pour résoudre ce problème.

#### Quelles sont les étapes de la résolution ?

Une façon de faire	Comment le faire ?
1 Déterminer la tension existant aux bornes d'un module en fonctionnement.	▶ Traduire le fait que les piles constituant le module sont branchées en série.
2 Exprimer l'énergie délivrée par le module.	▶ Utiliser la définition de l'énergie et la valeur de l'intensité moyenne du courant qui est donnée.
3 Établir les équations des réactions électrochimiques (oxydation à l'anode et réduction à la cathode) et de la réaction de fonctionnement de la pile.	▶ Utiliser les couples fournis dans les données et équilibrer les équations en utilisant des ions hydroxyde car le milieu est basique.
4 Relier la charge électrique ayant circulé à l'énergie électrique libérée par la pile d'une part et à la quantité d'eau formée.	▶ Relier la quantité d'électrons échangés à une électrode à la quantité de dihydrogène consommée, puis la quantité d'eau formée à la quantité de dihydrogène consommée. Relier ces quantités à l'énergie fournie par la pile.
5 Déterminer le volume de l'eau formée.	▶ Exploiter les relations entre quantité de matière, masse et volume pour déterminer le volume d'eau formé.

## 2. PRODUCTIONS DE DIHYDROGENE

### 2.1. Enoncé

#### Document 1

### Électrolyse de l'eau



Un électrolyseur.

■ Lors de l'électrolyse de l'eau, comme lors de sa dissociation thermique, il faut fournir une énergie  $\mathcal{E} = 282 \text{ kJ}$  pour dissocier une mole d'eau en dihydrogène et dioxygène.

#### Document 2

### Conversion du méthane

■ Elle se fait en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre le méthane,  $\text{CH}_4$ , et l'eau,  $\text{H}_2\text{O}$ , avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone,  $\text{CO}$ ; elle nécessite l'apport de 244 kJ par mole de méthane consommée;
- **étape 2** : réaction entre le monoxyde de carbone formé lors de l'étape 1 et l'eau avec formation de dihydrogène et de dioxyde de carbone. Cette réaction libère de l'énergie.

#### Document 4

### Transformation de la biomasse

■ La cellulose ou la lignine des végétaux ont la même composition que celle d'une molécule A de formule  $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$ . Le traitement thermo-chimique de la biomasse se fait en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre A et l'eau avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone,  $\text{CO}$ ; elle nécessite l'apport de 880 kJ par mole de A consommée;
- **étape 2** : identique à la seconde étape de la conversion du méthane.

D'après G. CLAUDET, « Mémento de l'Hydrogène », fiche 3.3.1, site AFH2, 2003.

#### Document 3

### Réaction dite du gaz à l'eau

■ Le charbon est traité en deux étapes :

- **étape 1** : réaction entre le carbone constituant le charbon et l'eau,  $\text{H}_2\text{O}$ , avec formation de dihydrogène et de monoxyde de carbone,  $\text{CO}$ ; elle nécessite 170 kJ par mole de carbone consommée;
- **étape 2** : identique à la seconde étape de la conversion du méthane.

## 2.2. problème

Parmi les quatre méthodes de production du dihydrogène présentées, quelle est la méthode la plus économique en énergie? Est-ce la plus écologique?

## 2.3. Aide à la résolution

### Quel problème pose l'énoncé? Quelles pistes suivre pour y répondre?

- L'énoncé demande de trouver la méthode de production du dihydrogène la moins coûteuse en énergie.
- Calculer l'énergie nécessaire pour former une mole de dihydrogène est une piste pour résoudre ce problème.

### Quelles sont les étapes de la résolution ?

Une façon de faire	Comment le faire ?
1 Écrire les équations des réactions envisagées	▶ Repérer la nature des réactifs et des produits.
2 Comparer les énergies nécessaires pour produire une mole de dihydrogène dans chaque procédé.	▶ Déterminer la quantité de dihydrogène formé pour une mole du réactif considéré en faisant le bilan des réactions.
3 Considérer la production globale du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre.	▶ Analyser la source du réactif traité et faire le bilan global de production du dioxyde de carbone.

## 3. PRODUCTION DE DIHYDROGENE

Sur Terre, l'hydrogène est presque toujours associé à un autre élément.

Il faut donc produire le dihydrogène pour pouvoir l'utiliser dans une pile à combustible.

### Doc 1 Les différents procédés

95 % du dihydrogène est aujourd'hui fabriqué à partir de bois et de sources d'énergie fossile, comme le gaz ou le pétrole. Le procédé le plus courant est le reformage du gaz naturel par de la vapeur d'eau surchauffée, aussi appelé vaporeformage.

On peut également utiliser la biomasse. De nombreuses matières organiques sont brûlées pour dégager du gaz. Si le bois, par l'intermédiaire du charbon, est le principal combustible, des déchets végétaux, comme la paille, peuvent aussi se révéler intéressants. En replantant la biomasse au fur et à mesure, on obtient un bilan faible en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

L'électrolyse de l'eau, encore peu développée, consiste quant à elle à décomposer l'eau en dioxygène et en dihydrogène à l'aide d'un courant électrique. Le dihydrogène contenu dans un litre d'eau permet ainsi de produire 2 kWh d'électricité.

Des procédés alternatifs sont à l'étude :

- les microbes photosynthétiques, microbes modifiés pouvant produire de l'hydrogène sous l'effet de la lumière du soleil ;

- la photoélectrolyse, qui consiste à immerger une cellule photoélectrochimique (composant électronique qui décompose l'eau sous l'effet de la lumière solaire en dihydrogène et en dioxygène) ;

- la décomposition thermo-chimique de l'eau, en portant à haute température (800 à 1 000 °C) des molécules d'eau qui se dissocient alors en dihydrogène et en dioxygène. Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de devoir recourir à l'énergie nucléaire pour chauffer l'eau à de telles températures.

### Doc 2 L'Europe accélère les recherches !

L'Union européenne et des sociétés européennes du secteur des piles à combustible et de l'hydrogène ont mis en place une initiative technologique commune (ITC). Cette association des secteurs public et privé intègre des activités de recherche, de développement technologique et de démonstration.

Son principal objectif est d'accélérer le développement de piles à combustible en Europe et de permettre leur commercialisation entre 2010 et 2020.

Cette initiative va rapidement placer l'Europe en tête de la course au développement et au déploiement de ces nouvelles technologies.

Rappelons qu'une pile à combustible (PAC) est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique par le biais d'une réaction électrochimique entre le combustible, du dihydrogène, et le dioxygène de l'air avec production simultanée d'eau et de chaleur.

Ces PAC peuvent trouver des applications dans une grande diversité de produits tels que les téléphones mobiles, les ordinateurs portables, les voitures, les bus, les bateaux et les avions ainsi que les installations fixes de production de chaleur et d'électricité dans les secteurs domestique et industriel.

Mais leur coût et leur longévité, de même que la production, la distribution et le stockage sûr et efficace du dihydrogène, posent encore problème.

Florence Roussel, « Hydrogène et pile à combustible », *Actu-Environnement*, septembre 2008.

### Doc 3 Consommation d'eau en France

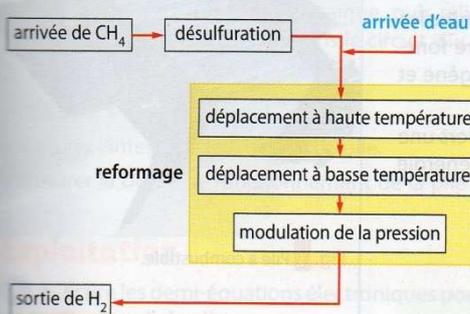
Année	Consommation domestique journalière (litres par jour et par habitant)
1998	157
2001	160
2004	165
2008	151
2011	137



### Doc 4 Démographie française en 2011



### Doc 5 Un cycle industriel de production



### Doc 6 Reformage

L'hydrogène est présent, associé au carbone, dans les carburants fossiles (produits pétroliers, gaz naturel...), les gaz issus de la biomasse, l'éthanol, etc.

Le reformage catalytique consiste à dissocier l'hydrogène du carbone. On peut produire du dihydrogène sous faible pression avec un rendement de 75 %, à une température de l'ordre de 900 °C, sans apport d'énergie autre que celle du carburant dissocié pour entretenir la réaction (Fig. 1).

Le reformage non catalytique permet d'obtenir du dihydrogène à partir des carburants contenant des impuretés, comme le soufre. Il est mis en œuvre à des températures plus élevées que celle utilisée pour le reformage catalytique (1 400 °C) et nécessite l'injection de dioxygène pour la conversion complète du carburant. Il permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 70 %.

« Hydrogène : production, stockage et conversion », N-GHY.

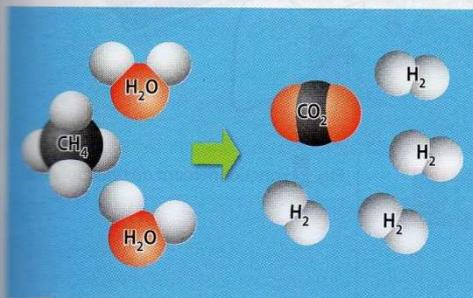


Fig. 1 Un exemple de reformage catalytique.

### 3.1. Extraire et exploiter des informations

- a) Quels sont les différents procédés de fabrication de dihydrogène ?
- b) Quel est celui qui est le plus utilisé ? En quoi consiste-t-il ?
- c) Selon ce procédé, quel(s) avantage(s) et quel(s) inconvénient(s) y a-t-il à produire du dihydrogène avec ou sans catalyseur ?
- d) Que signifie le terme désulfuration ? Auquel des deux procédés de la question a) correspond le document 5 ?
- e) Quel intérêt écologique présente l'utilisation de la biomasse en comparaison au procédé précédent ?
- f) Qu'a mis en place l'Union européenne pour accélérer ses recherches sur la production de dihydrogène ?
- g) Quel est son objectif ?
- h) Quels seront les problèmes rencontrés après la production de dihydrogène ?
- i) En considérant la production de dihydrogène par électrolyse, quelle est l'énergie électrique produite par un litre d'eau ?
- j) Dans l'hypothèse d'une énergie électrique entièrement fournie par le dihydrogène, calculer le volume d'eau nécessaire chaque jour pour alimenter en électricité un habitant de la France.
- k) Quelle serait la consommation journalière d'eau pour toute la population française ?

#### Donnée.

*Un Français consomme en moyenne 20 kWh en électricité par jour.*

- l) Dans quelle proportion la consommation journalière d'eau aurait-elle augmenté ? Conclure.
- m) Rédiger une synthèse argumentée sur les inconvénients de la production d'électricité à l'aide de dihydrogène.

## 4. ROULER EN LIMITANT LES EMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE

### 5.1. Situation problème

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 (Fig. 1).



**Fig. 1** La Honda FCX Clarity, première voiture commercialisée avec une pile à combustible.

## 4.2. Analyse du problème

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, le seul rejet est de l'eau.

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, Fig. 2) et cette production libère du  $CO_2$ .

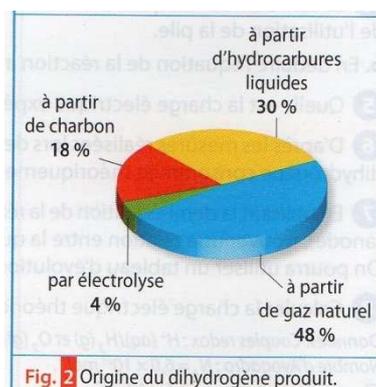


Fig. 2 Origine du dihydrogène produit.

## 4.3. Question scientifique à résoudre

**Comment comparer les bilans en dioxyde de carbone formé par un véhicule classique et un autre véhicule fonctionnant avec une pile à combustible ?**

## 4.4. Construction des étapes de la résolution

- Rappeler la formule générale d'un alcane.
- Écrire l'équation de la réaction de combustion complète de l'octane se produisant dans le moteur.
- Quel est le réactif limitant ? Pourquoi ?

**Le vaporeformage du gaz naturel est la méthode la plus courante pour produire du dihydrogène. On « casse » la molécule de méthane, qui possède quatre atomes d'hydrogène, avec de la vapeur d'eau à 900 °C, produisant ainsi du dihydrogène et du dioxyde de carbone.**

- Donner la formule brute du méthane.
- Écrire l'équation correspondant à la réaction de vaporeformage.

## 4.5. Mise en œuvre des étapes de la résolution

**De nombreux constructeurs automobiles développent actuellement des véhicules à pile à combustible (Fig. 3). Ainsi Mercedes 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.**

- En considérant que l'essence est constituée uniquement d'octane, quelle quantité de matière d'octane est consommée au bout de 100 km par une voiture à motorisation classique ?



Fig. 3 Un véhicule utilisant une pile à combustible.

- En utilisant l'équation de la question b), calculer l'avancement maximal  $x_{\max}$  de la réaction de combustion de l'octane.
- Quel volume de dioxyde de carbone a été produit par une voiture de motorisation classique au bout de 100 km ?
- Quelle quantité de matière de dihydrogène est consommée au bout de 100 km par une Mercedes Classe B équipée d'une pile à combustible ?

j) En considérant que le dihydrogène de cette voiture est entièrement produit par vaporeformage du méthane, et en utilisant l'équation établie à la question e), calculer la quantité de matière, puis le volume de dioxyde de carbone produit au bout de 100 km.

k) Du véhicule à essence ou de celui fonctionnant au dihydrogène, lequel produit finalement le moins de dioxyde de carbone ?

### Données.

**Masse volumique de l'octane :  $\rho = 810 \text{ g.L}^{-1}$ .**

**À 20°C et sous pression atmosphérique, le volume occupé par une mole de gaz est  $V=24 \text{ L}$ .**

### 4.6. Regard critique sur la résolution

Les énergies fossiles tendant à disparaître, on essaie de développer des alternatives au moteur à essence, qui doivent être économiquement viables et peu polluantes. Dans les années à venir, la production de dihydrogène devrait donc se développer. Pour ce faire, les industriels se tournent vers l'électrolyse.

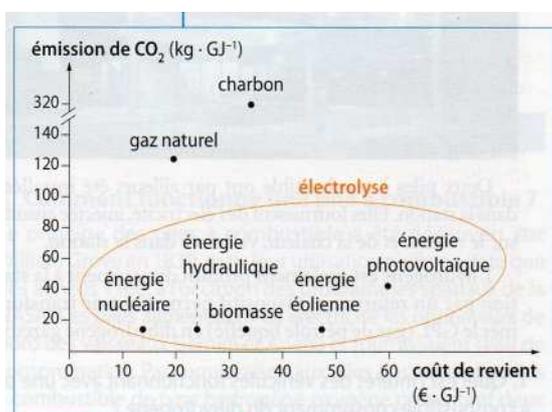
Actuellement, en France, la majeure partie de l'énergie électrique est fournie par les centrales nucléaires mais, à terme, on pourrait utiliser l'énergie solaire, hydraulique ou éolienne pour réaliser ces électrolyses (Fig. 4).

l) Pourquoi devrait-on essayer de se passer de l'énergie électrique issue du nucléaire pour réaliser les électrolyses ?

m) D'après la figure 4, quel est l'avantage de produire du dihydrogène avec des carburants fossiles ? Quel est l'avantage des énergies renouvelables ?

### 4.7. Pour conclure

n) Selon vous, peut-on espérer voir baisser de façon sensible la production de dioxyde de carbone si la fabrication de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible est réalisée à grande échelle ? Argumenter.



**Fig. 4** Estimation du coût de revient de l'hydrogène et bilan d'émission de CO<sub>2</sub> en fonction des sources d'énergie utilisées pour sa production.