



ACADEMIE DE  
BORDEAUX  
EPREUVE  
COLLABORATIVE DE  
SELECTION REGIONALE  
DE NOUVELLE  
AQUITAINE  
Chimie verte



SESSION  
2026  
18 mars 2026

42<sup>ème</sup> OLYMPIADES DE LA CHIMIE

## « Le dihydrogène, une solution d'avenir ? »

Le dihydrogène est actuellement utilisé en raison de ses propriétés chimiques dans l'industrie pétrolière (raffinage) et dans l'industrie chimique (production d'ammoniac). Cette molécule présente cependant un intérêt énergétique majeur qui reste peu exploité aujourd'hui. Le dihydrogène, comme vecteur énergétique, pourrait contribuer à décarboner certains secteurs industriels, alimenter le secteur des transports ou assurer le stockage de l'électricité. Il représente ainsi un enjeu scientifique, environnemental et économique.

Aujourd'hui dans de nombreuses villes comme Pau, des bus à hydrogène sont en circulation. Ces véhicules « zéro émission » n'émettent ni dioxyde de carbone ni oxydes d'azotes lors de leur utilisation.

Toutefois, la production de dihydrogène est quant à elle souvent émettrice de CO<sub>2</sub> et toujours énergivore. Il est donc nécessaire d'étudier ces méthodes de production pour juger de la pertinence de ce mode de transport.

Dans cette épreuve, nous analyserons quelques procédés de production du dihydrogène puis nous étudierons un mode de stockage du dihydrogène dans un véhicule.

### Travail à faire :

Question 1 : Dans un premier temps, à partir de vos connaissances et des documents fournis, vous complétez le tableau ci-dessous.

Puis vous présenterez, de façon argumentée, le procédé de fabrication du dihydrogène qui vous semble le plus en accord avec les principes de la chimie verte.

Procédé de production	Sources d'hydrogène	Coût final (€/GJ)	Contraintes énergétiques	Émissions secondaires	Facteur environnement E	Utilisation atomique UA (%)
Vaporeformage	Méthane (gaz naturel)	22 – 30				
Thermolyse et gazéification	Biomasse	33 – 40				
Électrolyse	Eau	35 – 40				
Électrolyse à haute température	Eau					

Question 2 : À partir de vos connaissances et des documents fournis, répondre aux questions suivantes :

- Un bus à hydrogène est équipé de 10 galettes d'hydrure de magnésium. Quelle serait la durée d'autonomie de ce véhicule si un courant d'intensité moyenne  $I = 300 \text{ A}$  est nécessaire pour alimenter son moteur ?
- Expliquer l'intérêt de ce type de stockage en particulier en termes de volume.

## **Document 1 : Vaporeformage du méthane**

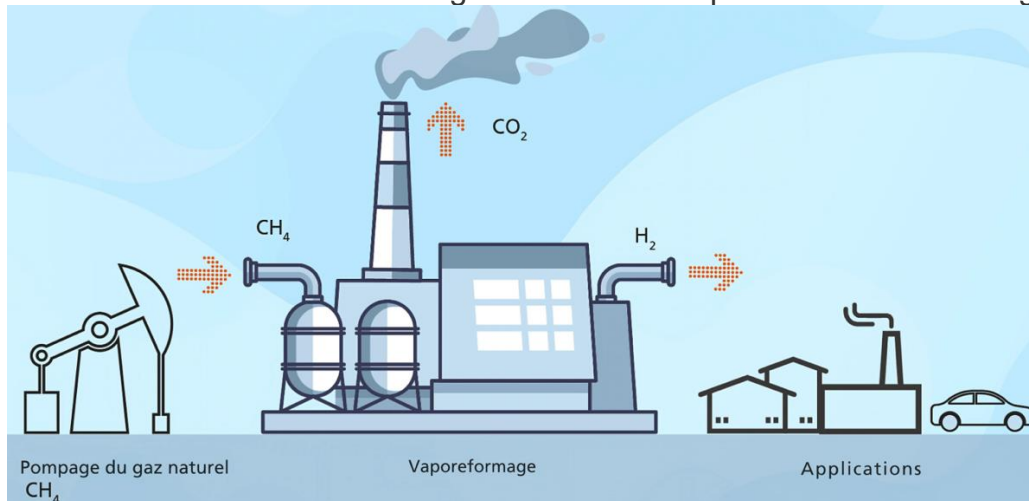
Le vaporeformage est un procédé de production du dihydrogène basé sur la dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur. C'est le procédé qui est aujourd'hui le plus utilisé au niveau industriel.

- Dans une première étape, on fait réagir le gaz naturel (méthane) sur de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900 °C et à une pression de 20 à 30 bars, en présence d'un catalyseur au nickel. Après la réaction, on obtient un mélange de monoxyde de carbone et de dihydrogène. Cette étape est fortement endothermique : + 190 KJ/mole.
- Dans une deuxième étape, le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone qui réagit avec la vapeur d'eau pour former du dioxyde de carbone et du dihydrogène. Cette étape est faiblement exothermique : - 40 KJ/mole

Au total, pour une molécule de méthane, on obtient par ce procédé 4 molécules de dihydrogène.

À la sortie du vaporéacteur, l'hydrogène pur est séparé du CO<sub>2</sub> qui peut être capturé, et d'un mélange en excès de CO, de méthane et de vapeur d'eau qui est utilisé pour fournir la chaleur nécessaire au vaporeformage.

Le vaporeformage est associé à une très lourde émission de CO<sub>2</sub> : pour une tonne de H<sub>2</sub> produite, 10 à 11 tonnes de CO<sub>2</sub> sont produites et en général émises dans l'atmosphère. Le procédé nécessite une désulfuration du gaz naturel et d'importants besoins énergétiques.



## **Document 2 : Thermolyse et gazéification**

La production de dihydrogène peut se faire à partir de la biomasse : ensemble des matières organiques végétales et animales constituées de molécules à base de carbone et d'hydrogène qui se sont formées par photosynthèse de la lumière solaire.

La première étape consiste donc à sécher la matière. Ensuite, on chauffe à 600 °C, pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse.

Après cette étape, les produits sont à 70 % gazeux, sous forme de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30 % solides restants sont essentiellement composés de carbone.

On continue donc à élever la température jusqu'à 1000 °C pour gazéifier le carbone. On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le monoxyde de carbone par une réaction avec de l'eau.

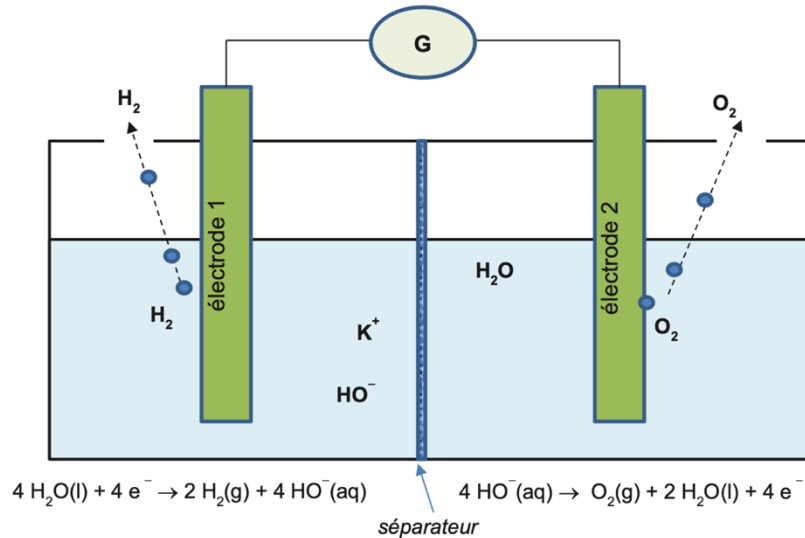
Étape 1 :  $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$

Étape 2 :  $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$

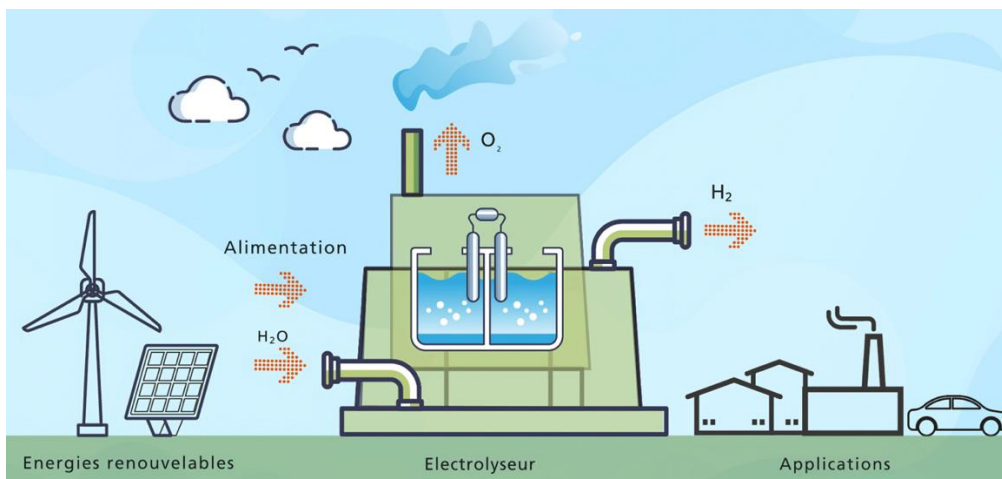
Après cette opération, on élève la température jusqu'à 1100 °C afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer le dihydrogène.

### Document 3 : L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un procédé qui permet de décomposer l'eau en dioxygène et en dihydrogène gazeux sous l'action d'un courant électrique. C'est un moyen de production de dihydrogène très pur qui peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. L'électrolyseur est un assemblage de plusieurs cellules d'électrolyse. Une de ces cellules est représentée ci-dessous. Elle est constituée de deux électrodes plongées dans l'eau, en milieu basique (présence d'ions  $K^+$  et  $HO^-$ ). Le générateur impose un transfert d'électrons entre les électrodes. Le séparateur évite aux deux gaz formés d'être en contact mais laisse passer l'eau et les ions.



Cependant, pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courants électriques à très faible coûts car actuellement, ce mode de production coute beaucoup plus cher que la production par reformage du gaz naturel. Il souffre de plus d'un mauvais rendement global. L'électrolyse à haute température, qui est une amélioration de l'électrolyse classique, permettrait d'obtenir de meilleurs résultats.



#### **Document 4 : La chimie verte**

Accidents d'usines chimiques, épuisement des ressources énergétiques, nombreuses pollutions nuisibles pour l'homme et l'environnement ... Autant de maux qui ont obligé l'industrie chimique à réagir. Face à l'urgence de sa mutation exigée par la société, les chercheurs doivent trouver des solutions nouvelles pour créer une chimie plus propre et plus sûre mais qui reste compétitive.

Paul Anastas, directeur du Green Chemistry Institute Washington DC, a été l'un des premiers à proposer à la fin des années quatre-vingt-dix les douze principes de base pour développer une chimie qui utilise et produise moins de substances dangereuses et soit, de fait, plus respectueuse de l'environnement.

1. **La prévention de la pollution à la source** en évitant la production de résidus.
2. **L'économie d'atomes et d'étapes** en optimisant l'incorporation des réactifs dans le produit final.
3. **La conception de synthèses moins dangereuses** grâce à l'utilisation de conditions douces et la préparation de produits peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. **La conception de produits chimiques moins toxiques** avec la mise au point de molécules plus sélectives et non toxiques.
5. **La recherche d'alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse.**
6. **La limitation des dépenses énergétiques** avec la mise au point de nouveaux matériaux pour le stockage de l'énergie et la recherche de nouvelles sources d'énergie à faible teneur en carbone.
7. **L'utilisation de ressources renouvelables à la place des produits fossiles.**
8. **La réduction du nombre de dérivés** en minimisant l'utilisation de groupes protecteurs ou auxiliaires.
9. **L'utilisation des procédés catalytiques.**
10. **La conception des produits en vue de leur dégradation finale** dans des conditions naturelles ou forcées de manière à minimiser l'incidence sur l'environnement.
11. **La mise au point des méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution, en contrôlant le suivi des réactions chimiques.**
12. **Le développement d'une chimie fondamentalement plus sûre** pour prévenir les accidents, explosions, incendies et émissions de composés dangereux.

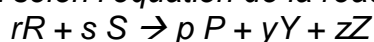
Source : cnrs le journal (article de Stéphanie Belaut) : la chimie passe au vert n°193 février 2006

Dans le cadre de la chimie verte, pour prendre en compte la minimisation des quantités de déchets, on définit les indicateurs suivants :

- **L'utilisation atomique UA :**

$$UA = \frac{M(\text{produit souhaité})}{\sum_j M_j(\text{réactif})}$$

Exemple : on synthétise le produit P par réaction entre R et S. Au cours de la transformation, il se forme aussi les espèces Y et Z selon l'équation de la réaction :



où r, s, p, y et z sont les nombres stœchiométriques.

L'utilisation atomique s'exprime par :  $UA = \frac{p \times M(P)}{r \times M(R) + s \times M(S)} \times 100$

Plus l'utilisation atomique UA est proche de 100 %, plus le procédé est économe en termes d'utilisation des atomes et moins la synthèse génère de déchets.

- **Le facteur environnement E**

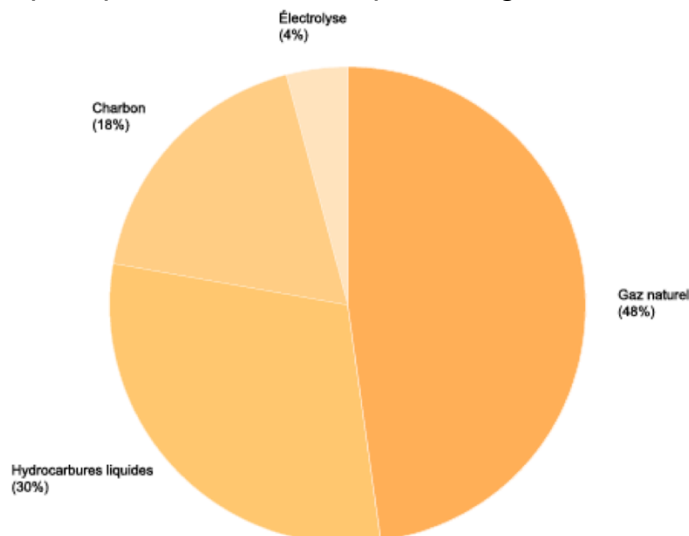
$$E = \frac{M(\text{déchets})}{M(\text{produit souhaité})} \times 100$$

Pour l'exemple précédent, le facteur environnement s'exprime par :  $E = \frac{y \times M(Y) + z \times M(Z)}{p \times M(P)}$

Plus le facteur environnement E est proche de 0, moins le procédé génère peu de déchets.

### **Document 5 : Les méthodes de production**

Actuellement, pour des raisons économiques, l'hydrogène est issu à 95% de la transformation d'énergies fossiles dont pour près de la moitié à partir du gaz naturel.



Chaque méthode de production est associée à une couleur selon son impact environnemental :

- L'hydrogène vert est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité provenant uniquement d'énergies renouvelables ;
- L'hydrogène gris est fabriqué par procédés thermochimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) ;
- L'hydrogène bleu est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké ;
- L'hydrogène jaune, plus spécifique à la France, est fabriqué par électrolyse comme l'hydrogène vert mais l'électricité provient essentiellement de l'énergie nucléaire.

L'agence de la transition écologique (ADEME) a récemment suggéré de changer la terminologie. Les hydrogènes « bleu » et « jaune » sont regroupés sous l'appellation « bas-carbone ».

Une fois fabriqué, cet hydrogène doit être stocké, puis transporté jusqu'à son lieu de distribution et d'utilisation.

## Document 6 : Les véhicules à hydrogène – La pile à combustible

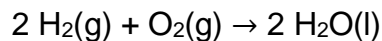
Découverte en 1839 par Sir William Grove, la pile à combustible est basée sur la réaction d'oxydoréduction ayant lieu spontanément entre deux gaz : le dioxygène et le dihydrogène.

Les véhicules à hydrogène utilisent les piles à combustible PEMFC (*piles à combustible à membrane électrolyte polymère*) développées pour des applications dans les transports en remplacement du moteur thermique.

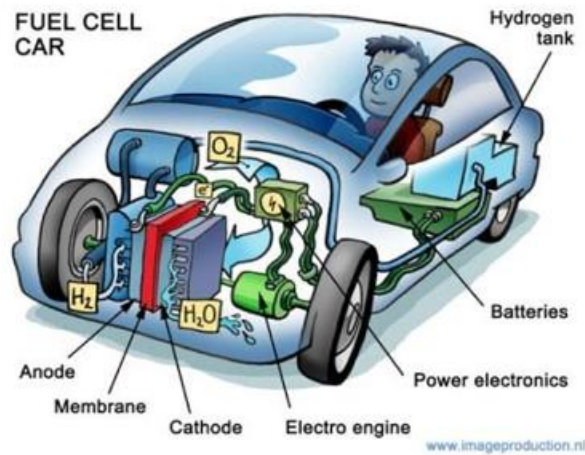
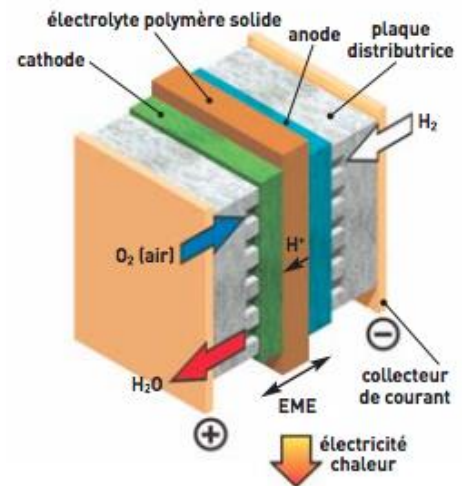
De façon générale, le fonctionnement électrochimique d'une cellule élémentaire de pile à combustible peut être représenté selon le schéma ci-contre (EME désigne l'ensemble électrodes-membrane).

Chaque cellule élémentaire est constituée de deux compartiments disjoints alimentés chacun en gaz réactifs dihydrogène et dioxygène. Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte, solution qui laisse circuler les ions.

Au cours du fonctionnement de la pile, les gaz dioxygène et dihydrogène réagissent au niveau des électrodes et conduisent à la formation d'eau selon l'équation :



C'est une réaction exothermique libérant une quantité d'énergie égale à  $1,2 \times 10^5$  kJ par kilogramme de dihydrogène consommé. Une partie de l'énergie libérée est utilisée pour alimenter un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Avec les piles à combustible utilisées actuellement, environ 50% de l'énergie libérée par la réaction du dihydrogène est convertie en énergie mécanique. L'utilisation de la pile à combustible ne dégage que de la vapeur d'eau.



D'après <http://www.futura-sciences.com> et les clés du CEA n°50-51

## **Document 7 : Le dihydrogène, un combustible d'avenir pour les transports urbains**

Le premier bus à hydrogène a été mis en service en 1992, et depuis 2009, le marché européen du bus à hydrogène ne cesse de progresser, avec une croissance de 163% en 2025.

L'hydrogène est massivement utilisé depuis des dizaines d'années dans l'industrie et son emploi est très bien maîtrisé par la connaissance approfondie de ses propriétés et de ses risques.

Élément clef de la sécurité, les réservoirs à hydrogène sont soumis à des contraintes d'homologation plus poussées que n'importe quel autre réservoir de stockage d'énergie : ils subissent des tests au feu, des tirs à balles réelles, des milliers de cycles de remplissage, des crash tests, et doivent résister à trois fois la pression de service. Comme disent les pompiers de l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers, « toute énergie porte sa part de danger, la question est de savoir comment la maîtriser, et l'hydrogène n'est ainsi ni plus ni moins dangereux que l'essence ou le gaz naturel ».

Une connaissance qui a ainsi amené les pompiers de La Manche à s'équiper de véhicules d'intervention électriques à hydrogène plutôt qu'à batteries !

L'agglomération de Pau a, quant à elle, franchi le pas il y a plus de six ans avec l'inauguration en septembre 2019 de la station hydrogène développée et exploitée par ENGIE et la mise en service de « Fébus » en décembre 2019.



À Pau, l'électricité nécessaire à l'électrolyse de l'eau est produite par des panneaux solaires et surtout par hydroélectricité grâce à des sites de production implantés dans le Béarn et les Pyrénées. 100 % renouvelable, cette électricité permet de produire de l'hydrogène totalement décarboné et local.

Une énergie « purement » verte donc !

D'après <https://www.idelis.fr/se-deplacer/le-reseau-de-bus/febus-le-bus-zero-emission>

Ce bus à hydrogène fonctionne avec un moteur électrique alimenté par cinq bonbonnes de dihydrogène installées sur son toit, ce qui explique sa taille plus haute que les bus urbains actuels.

### **Fiche technique du bus :**

Longueur	18,23 m
Largeur	2,55 m
Hauteur	3,40 m
Passagers	125 voyageurs - 32 places assises dont une plateforme PMR et 1 plateforme poussette
Pile à combustible	Générateur Ballard HD 100 – 100 kW BOL
Moteur électrique de traction	Siemens 1DB2022 - 200kW / 270 CV
Pression des réservoirs	350 bar
Consommation moyenne	10 à 12 kg d'hydrogène pour 100 km

Ce bus contient donc une masse  $m$  de dihydrogène comprimé à 350 bar qui vient alimenter une pile à combustible, située elle aussi sur le toit du bus, mais à l'arrière.

Le dihydrogène comprimé à 350 bar peut être considéré comme un gaz « parfait ».

### **Document 8 : Stockage et transport de l'hydrogène**

Le sujet de l'hydrogène dépasse largement la simple question du stockage d'un gaz très léger : c'est un enjeu technique, environnemental et même sociétal.

L'hydrogène, c'est le vecteur énergétique de demain. Sauf qu'il faut bien le stocker quelque part, explique le Pr. Thierry Grosdidier.

Le problème est simple sur le papier, mais vertigineux dans la pratique. À pression ambiante, 1 kg d'hydrogène gazeux occupe un volume de 11000 litres. Un sacré réservoir, l'équivalent d'une cabine d'ascenseur ! Alors oui, on peut comprimer ce kilo de gaz à très haute pression – 700 bars, comme dans la Toyota Mirai – où il n'occupera plus que 24 litres ou bien encore le liquéfier, pour qu'il n'occupe plus que 14 litres. Mais pour qu'il passe à l'état liquide, et qu'il soit utilisable comme carburant dans les réservoirs des fusées Ariane, il faut le refroidir jusqu'à -253 °C. Mais tout cela coûte cher. Très cher. En énergie, en infrastructures, en sécurité.

L'idée est simple : stocker l'hydrogène directement dans la structure atomique d'un métal. Comme si l'on glissait les atomes d'hydrogène entre les pages d'un livre métallique, sourit-il. Une comparaison qui n'a rien de farfelu !

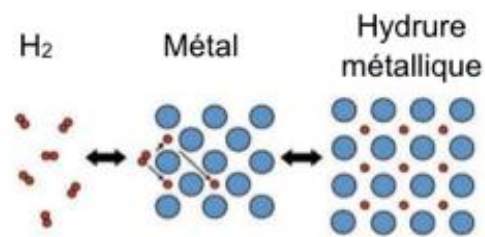
*D'après <https://www.unys-sciences.fr/hydrogene-queelles-solutions-de-stockage-pour-rendre-concrete-son-utilisation/>*

### **Document 9 : Stocker l'hydrogène sous « forme solide », l'éponge à hydrogène**

Le magnésium, grâce à sa capacité massique élevée, ses réserves abondantes et son coût relativement modique, a capté l'attention des chercheurs.

À haute température et sous une pression de 5 à 10 bars, le métal absorbe le dihydrogène pour former un hydrure métallique.

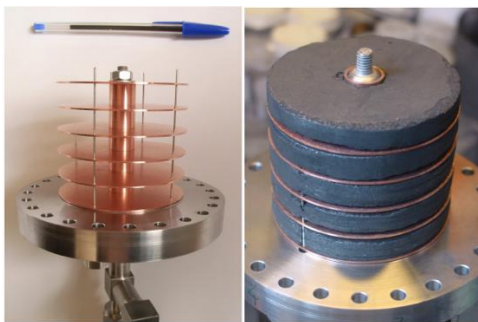
En réduisant la pression, il y a désorption (libération) du dihydrogène et le métal revient à son état d'origine. On peut obtenir la désorption du dihydrogène en modifiant simplement la pression et/ou la température de l'hydrure métallique.



*D'après <http://www.cnrs.fr>*

Caractéristiques de la galette :

- Masse : 156 g
- Diamètre : 100,6 mm
- Épaisseur : 10 ± 0,2 mm



*Montage des galettes d'hydrure de magnésium sur un échangeur en cuivre*

L'hydrure de magnésium a une grande capacité de stockage volumique.

En outre, il est particulièrement intéressant car le processus d'absorption-désorption est propre, sûr et totalement réversible.

Oui, mais voilà : que ce soit pour absorber l'hydrogène ou pour le relâcher, le magnésium réagit lentement. La transformation nécessite des températures élevées et cela limite les applications potentielles. Notre objectif, c'est de faire descendre ces températures et d'accélérer les cinétiques de transformation, explique le Pr. Thierry Grosdidier.

*D'après <https://www.unys-sciences.fr/hydrogene-queelles-solutions-de-stockage-pour-rendre-concrete-son-utilisation/>*

## Document 10 : Évaluation expérimentale des performances de la galette d'hydrure de magnésium

(D'après : Thèse d'Albin CHAISE :  
Étude expérimentale et numérique de réservoirs d'hydrure de magnésium)

Pour récupérer le dihydrogène, un étudiant a chauffé la galette d'hydrure de magnésium et mesuré le pourcentage massique de dihydrogène libéré.

Le pourcentage massique est défini par :

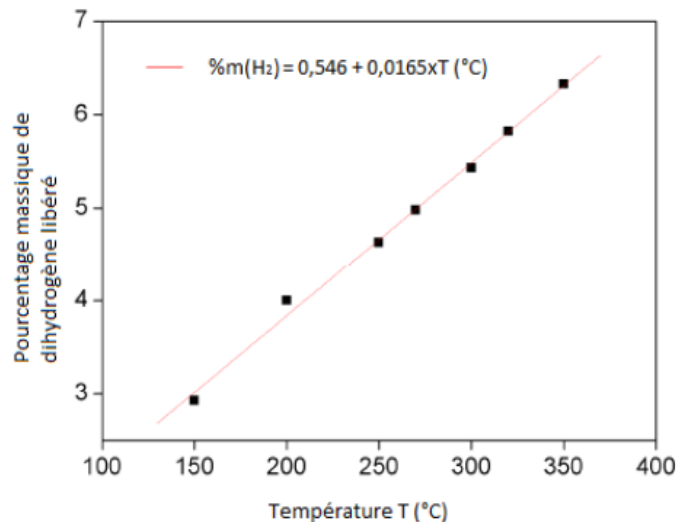
$$\%m(H_2) = \frac{m_{H_2 \text{ libéré}}}{m_{\text{galette}}} \times 100$$

La libération du dihydrogène gazeux s'effectue en chauffant la galette d'hydrure métallique ; le gaz est émis à une pression  $P = 3$  bar pour alimenter la pile à combustible.

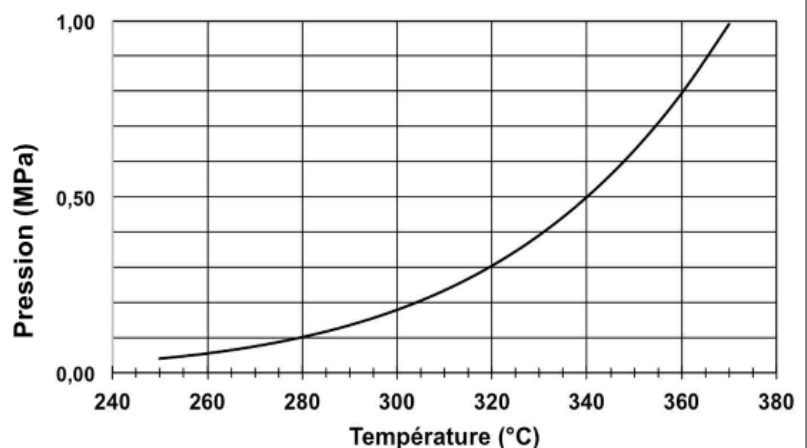
L'étudiant a étudié l'évolution de la pression du dihydrogène émis en fonction de la température.

Ci-contre est représentée l'évolution de la pression d'équilibre (pression de libération) du dihydrogène en fonction de la température.

Graphique 1 : libération du dihydrogène en fonction de la température



Graphique 2 : diagramme d'équilibre  $P = f(T)$



## Document 11 : Données

- Constante de Faraday :  $F = 9,65 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- Couples d'oxydoréduction mis en jeu dans la pile PEFMC :  $H^+(aq)/H_2(g)$  ;  $O_2(g)/H_2O(l)$
- Masses molaires atomiques en  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$  :  $M(\text{Mg}) = 24,3$  et  $M(\text{H}) = 1,0$
- Constante des gaz parfaits :  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273,15$