



**PRÉFET  
DU TERRITOIRE  
DE BELFORT**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**UNIVERSITÉ DE  
FRANCHE-COMTÉ**

# Qu'est-ce que l'hydrogène ?

Nouvelle source d'énergie propre et décarbonée

Cette exposition est le fruit d'une collaboration entre l'université de Franche-Comté et la Préfecture du Territoire de Belfort.

**À cette occasion, l'hydrogène s'invite en Préfecture !**

**Venez découvrir le parcours initiatique et pédagogique mis en place dans les jardins de la Préfecture du Territoire de Belfort le mercredi 4 octobre 2023**

Inscription :



Jardins de la Préfecture  
Entrée Rue Bartholdi

Découvrez et comprenez comment l'hydrogène fonctionne

# Histoire

1



« ... je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constitue, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir... »

« L'île mystérieuse », Jules Verne, 1875

## L'hydrogène, source d'Énergie inépuisable ?

2

# L'Atome Hydrogène

1. L'atome le plus abondant de l'univers...

C'est le principal Composant des étoiles et océans.

2. Il est Rare à l'état pur, dans l'atmosphère. On le trouve lié à d'autres atomes. Eau et hydrocarbures.

3. Il peut être produit à partir de l'eau, et sa conversion ne génère que de l'eau...

4. Il est nécessaire d'apporter de l'énergie pour séparer la molécule d'eau et produire de l'hydrogène.

5. L'atome le plus léger de l'Univers...  
C'est le plus simple aussi > 1 proton + 1 électron.

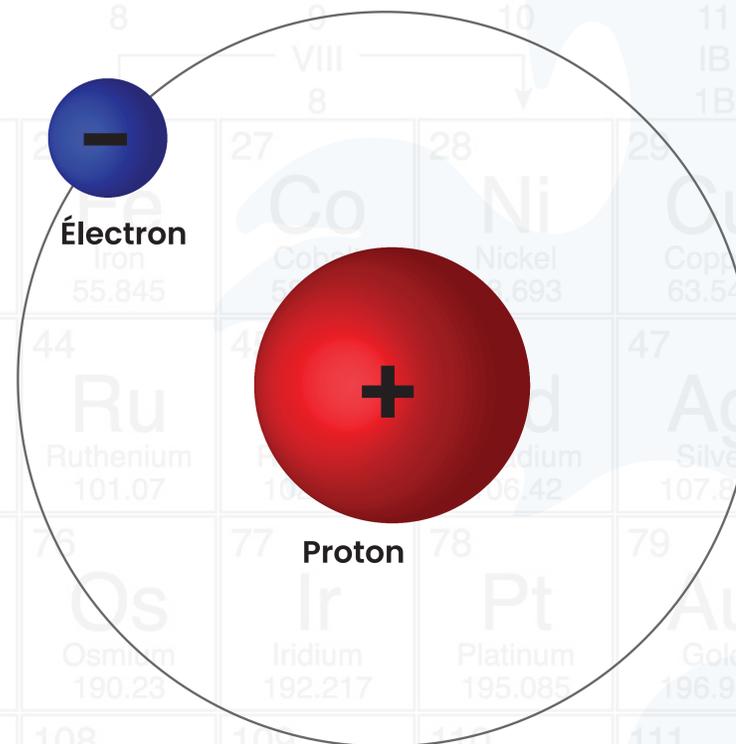
8. Sa densité Énergétique volumique est très faible...il faut un grand volume pour le stocker ou encore le comprimer.

7. Sa densité Énergétique massique est élevée...3 fois plus élevée que celle de l'essence.

6. Il est difficile à stocker, car ces petites molécules ont tendance à s'infiltrer à travers pores et fissures des matériaux.

Atomic Number
Symbol
Name
Atomic Mass

Atome d'hydrogène



1.00794	1
1312.0	
2.20	
1s <sup>1</sup>	
<b>H</b>	<b>1</b>
Hydrogen	+1 -1

Properties	
Atomic Number (Z):	1
Atomic Weight (A):	1.00794
Ionization Energies:	1312.0 kJ/mol
Electronegativity:	2.20
Electron Configuration:	1s <sup>1</sup>
Oxidation States:	-1, +1

© likefeelgood / iStock

3

# Une histoire de pile à hydrogène

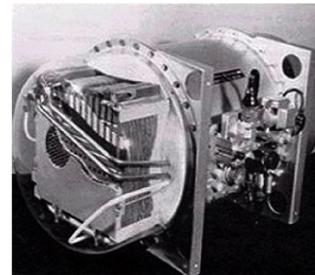
## 1839

Premières découvertes  
Sir W. Grove



## 1950

La conquête spatiale



## 2000

Le come-back



DC Nekar 5 (2000)



Honda FCX (2008)



Sous marin (2005)



Toyota Mirai (2013)



Hyundai Nexo (2018)



Daimler F-Cell (2013)

## 2020

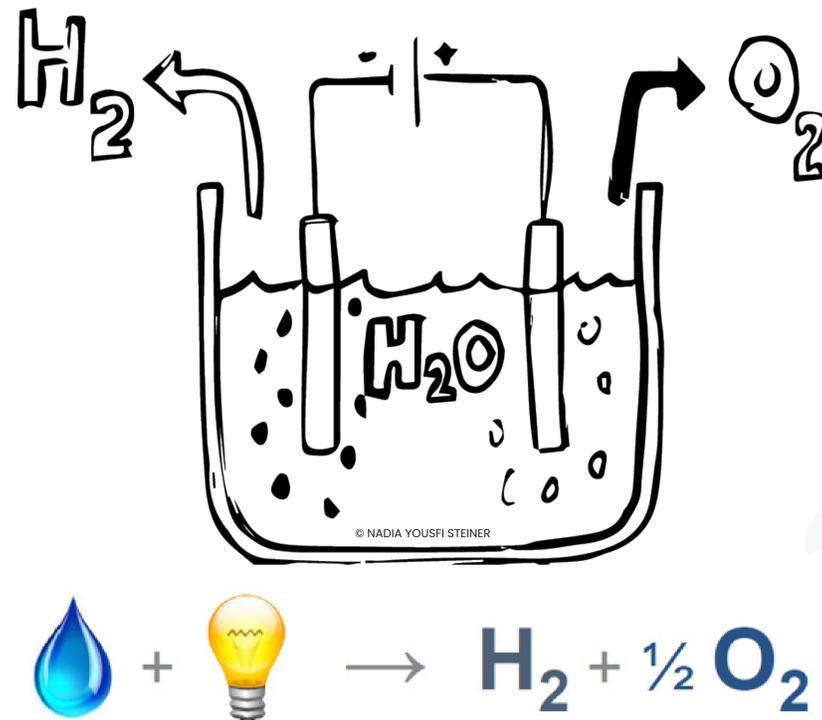
L'avènement



La pile à hydrogène ou à combustible, une nouvelle technologie qui date du début du XIX<sup>e</sup> siècle...

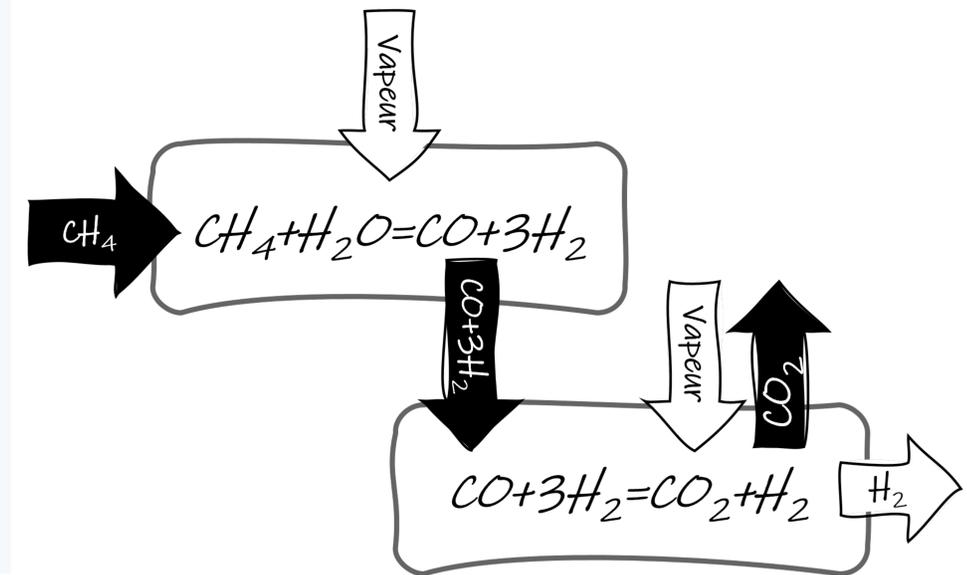
4

# Production de l'Hydrogène



## 1-Électrolyse

La molécule d'eau ( $H_2O$ ) est constituée de deux atomes d'hydrogène ( $H_2$ ) et d'un atome d'oxygène ( $O_2$ ), on peut donc récupérer de l'hydrogène en séparant la molécule d'eau à l'aide d'un courant électrique.



## 2-Vaporeformage

Le vaporeformage est un procédé de production de gaz de synthèse riche en hydrogène. Cette réaction d'hydrocarbures, principalement du méthane, permet la production d'hydrogène en présence de vapeur d'eau.

5

# Transport de l'hydrogène

Des bateaux, des camions et des gazoducs



© alvarez / iStock



© Scharfsinn86 / iStock



© Petmal / iStock

1. Transport par bateau pour des longs trajets (en général supérieurs à 1200km) et des trajets entre différents continents.

2. Transport par camion pour des trajets en général inférieurs à 1200km permettant de relier des pays d'un même continent.

3. Transport par pipeline (gazoduc), facilite le transport de manière rapide sur de longues distances.

6

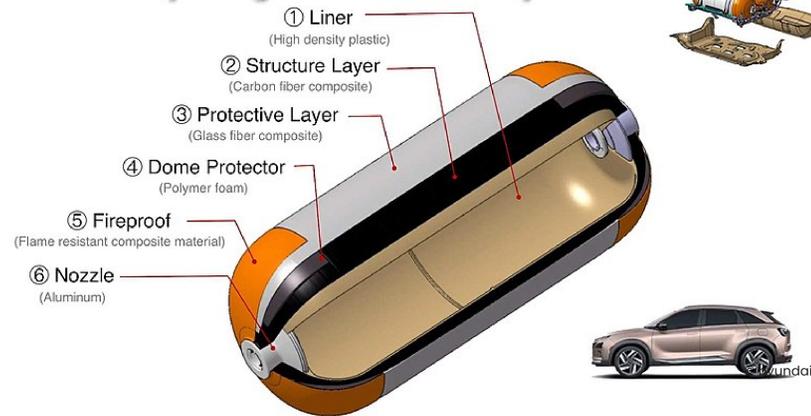
# Stockage de l'hydrogène

## Gaz, liquide ou Solide

L'hydrogène est un gaz léger et volatil, Il a tendance à se disperser et à fuir à travers les pores et fissures.

Stocker l'hydrogène c'est le conditionner de manière à réduire son volume pour différentes utilisations. On peut utiliser des réservoirs haute pression , la basse température (cryogéniques) pour l'hydrogène liquide ou encore des poudres chimiques.

### NEXO Hydrogen Tank Safety



1 - Stockage à haute pression sous forme gazeuse, le gaz est contenu dans des réservoirs sous pression.

Dans 1m<sup>3</sup>, on peut stocker  
**0,09kg d'hydrogène gazeux @1 bar**  
**42kg d'hydrogène gazeux @700 bars**

2- Stockage à très basse température sous forme liquide, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs très bien isolés.

Dans 1m<sup>3</sup>, on peut stocker  
**71kg d'hydrogène liquide @-253°C.**

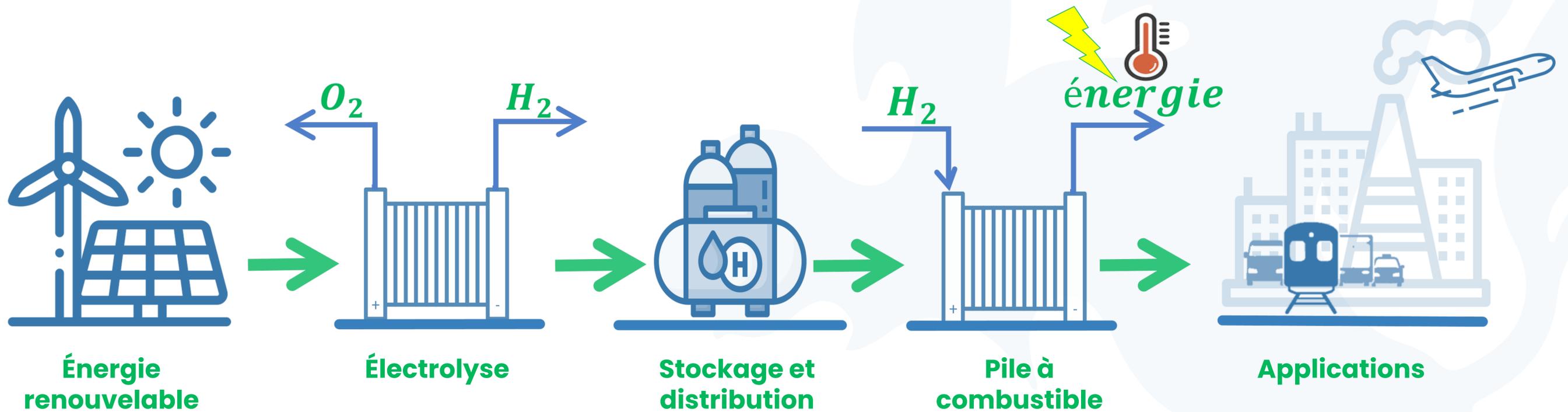
3 - Stockage à base d'hydrures sous forme solide, méthode d'absorption d'hydrogène par un matériau.

**À température ambiante, on peut stocker 1kg d'hydrogène dans un réservoir d'environ 100kg.**

7

# L'hydrogène vert

Une Énergie 100% renouvelable



**L'hydrogène vert** est produit grâce à l'électrolyse de l'eau en utilisant des sources d'**énergie renouvelable**.

Il est ensuite stocké ou transporté pour être utilisé directement, ou après conversion en électricité par une pile à hydrogène.

8

# La pile à hydrogène

## Un principe (très) simple

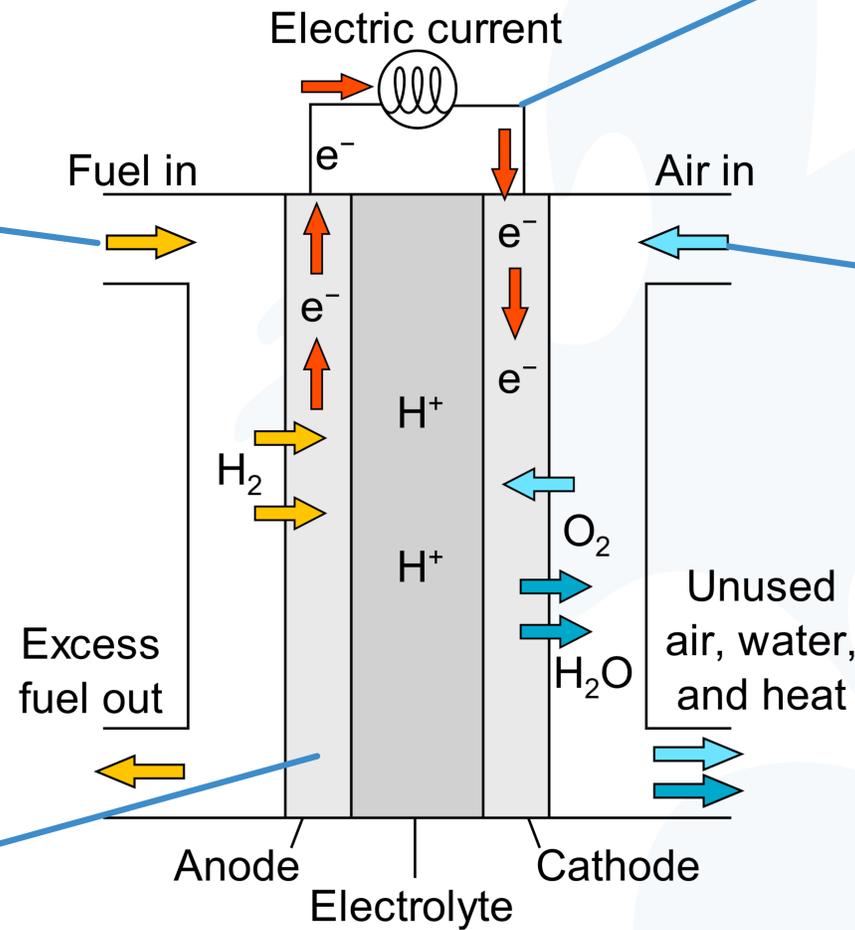
1. L'hydrogène va être décomposé en protons  $H^+$  et en électrons  $e^-$ .

2. Les protons  $H^+$  vont migrer vers la cathode à travers un électrolyte (membrane).

3. Les électrons vont se déplacer de l'anode vers la cathode via un circuit extérieur. C'est l'électricité produite !

4. L'oxygène  $O_2$ , les électrons  $e^-$  et les protons  $H^+$  se recombinent pour produire... de l'eau !

5. La réaction électrochimique libère également de la chaleur qui peut être évacuée ou utilisée pour chauffer les maisons par exemple.



9

# Écosystème Hydrogène

## Usages

### Énergies décarbonées

Éolien, solaire, biomasse nucléaire.

### Mobilité

Permet d'alimenter des véhicules : voitures, trains, bateaux ou même avions, qui ne rejettent que de l'eau lors de leur fonctionnement, **soit via une pile à hydrogène** qui alimente un moteur électrique, **soit via un moteur à combustion hydrogène**, assez similaire à ceux que l'on utilise aujourd'hui dans nos véhicules.

### Bâtiment

Permet d'alimenter des bâtiments en électricité et chaleur simultanément - cogénération.

### Stockage

permettent de stocker le surplus de production d'énergies décarbonées pour éviter les pertes.

### Industrie

indispensable à la décarbonation des industries polluantes **soit comme matière première** (production ammoniac, acier) **soit comme combustible** (métallurgie, verrerie, etc.).



10

# L'Hydrogène naturel

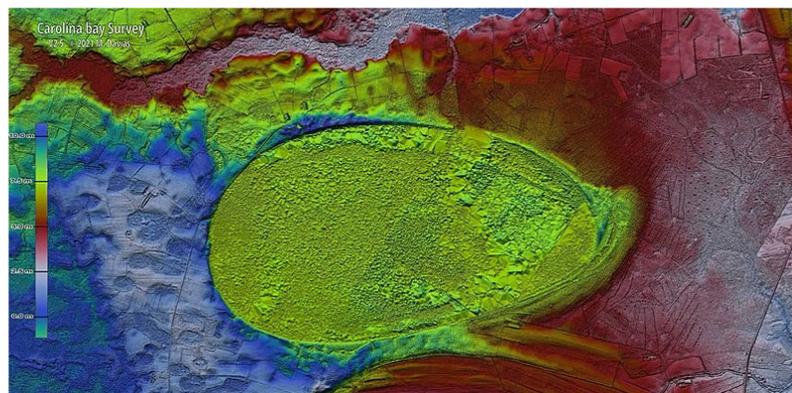
## Réalité ou Chimère ?

On a très longtemps pensé et dit que l'hydrogène était très rare à l'état naturel, qu'il se trouvait essentiellement combiné à d'autres molécules sur Terre, et que de l'Énergie était nécessaire pour le récupérer sous sa forme moléculaire pure  $H_2$ . Mais plusieurs découvertes de gisements d'hydrogène ont été réactivées par un intérêt grandissant en cette source qui paraît être le « pétrole durable ».

**La course pour comprendre, explorer et exploiter des nouveaux gisements d'hydrogène naturel est lancée !**



Mont Chimera, flammes éternelles ancienne Lycie (Turquie) © Mykolalvashchenko / iStock



Les Carolina Bays, dépressions elliptiques en Caroline du Nord (Etats Unis d'Amérique) © Cintos / Wikimedia

**Naturel, natif, blanc ou géologique** ces termes désignent l'hydrogène présent naturellement sous sa forme chimique  $H_2$  dans la croûte terrestre et dans les océans.

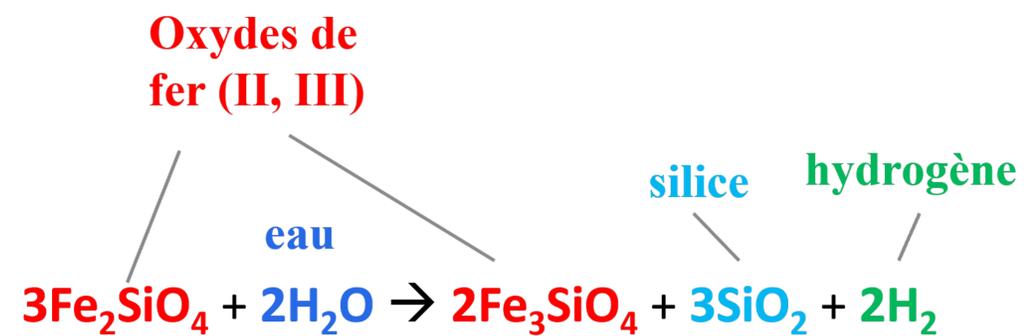
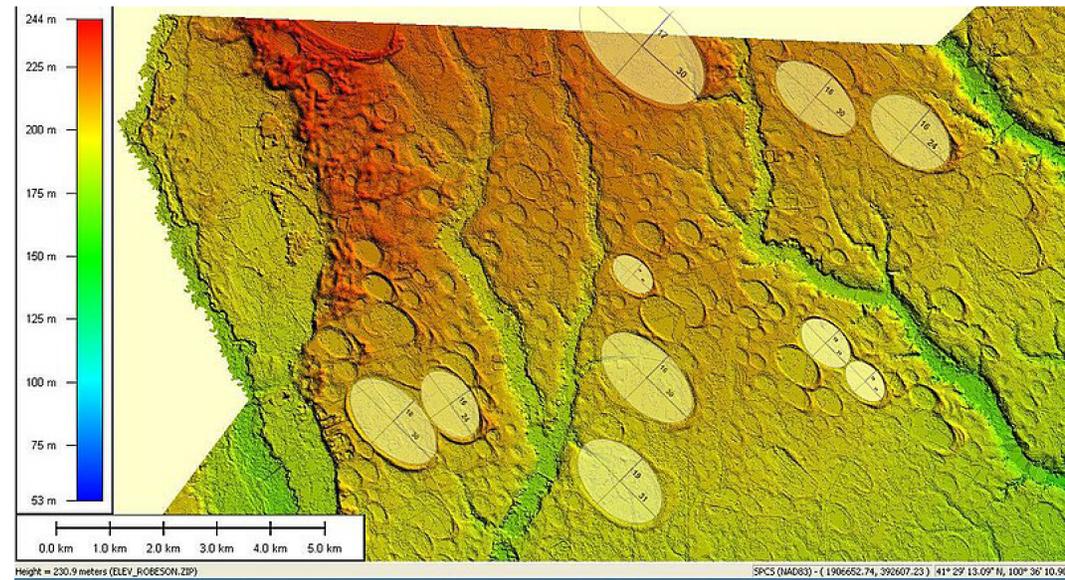
**On sait depuis des années** qu'il existe dans le sous-sol terrestre de l'hydrogène qui s'échappe vers la surface avec des flux faibles comme en Turquie, en Floride, et même dans les Pyrénées.

Mais la seule source exploitée à ce jour se trouve à Bourakebougou, un bassin sédimentaire avec une couche de grès poreux au Mali, d'où émane un hydrogène pur à 98% en continu et peu profond. Exploité depuis 2013 pour éclairer la place du village et une centaine d'habitations, ce gisement présente une belle curiosité géologique et sujet d'étude scientifique.

L'origine **des Carolina Bays**, dépressions elliptiques en Caroline du Nord qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, est inconnue. Il émane de certaines d'entre-elles des quantités notables d'hydrogène.

# L'Hydrogène naturel

Un mécanisme continu ?



© Nadia Yousfi Steiner

L'hypothèse la plus avancée par les scientifiques est que la présence de minéraux de fer dans des roches des couches profondes permet de dissocier la molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) pour produire l'hydrogène (H<sub>2</sub>). Cela expliquerait la génération rapide et continue de l'hydrogène naturel, lui donnant potentiellement la qualité de **ressource renouvelable**, contrairement aux hydrocarbures fossiles. Cela explique également la localisation du phénomène limitée à certaines régions aux caractéristiques des roches du sous-sols bien spécifiques.

12

# L'Hydrogène naturel

## (Res)source inépuisable de l'Énergie

Il contournerait les verrous de la chaîne Hydrogène et combinerait les avantages des énergies fossiles et renouvelables sans leurs inconvénients, une telle ressource semble indéniablement être la solution idéale pour réconcilier Énergie et Environnement !

**Mais si elle n'est pas encore réalité, c'est que les hypothèses restent encore à confirmer sur le terrain, et lorsqu'elles le seront, plusieurs questions demeureront à résoudre.**

**L'hydrogène naturel est volatil**, il reste difficilement dans les sous-sols sur des temps longs et aura tendance à s'échapper vers la surface si la roche n'est pas assez étanche (**fuites d'H<sub>2</sub> qui contribuent au réchauffement climatique**) et à se disperser horizontalement nécessitant de multiplier les forages sur petite surface pour son exploitation géologique (**écosystème détérioré**).

**Il est très réactif**, il se combine facilement avec diverses espèces, et reste difficilement sous sa forme H<sub>2</sub>.

**Il est incolore, inodore**, ses gisements sont plus difficiles à détecter que les gisements de pétrole.

**Localisation limitée** à certains endroits avec des propriétés géologiques bien spécifiques.

**Des filières inexistantes**, à cause de la compétitivité des fossiles peu chères et faciles à extraire.

**Incertitude** sur les réserves existantes et prospection H<sub>2</sub> encore au stade théorique.

**Impact écologique** conséquent des forages et exploitation géologique : écosystèmes détériorés, eaux et air contaminés, sols dégradés et pollués, fuites. De plus, la faible densité volumique et les contraintes sécuritaires liées à la grande inflammabilité de l'hydrogène rendent l'infrastructure d'exploitation lourde et complexe.

# L'Hydrogène naturel

**La course de l'hydrogène naturel est lancée...** catalysée par des impératifs climatiques, un fort besoin d'indépendance énergétique et une vague d'engouement pour l'économie hydrogène qui cherche de gros volumes pour alimenter des feuilles de route nationales ambitieuses. Ainsi, des entreprises voient le jour et des projets florissent partout dans le monde avec de belles promesses d'avenir...

Mais contrairement à ce qui est présenté, **l'hydrogène naturel si prometteur ne semble pas être pour demain :** dans l'hypothèse où ces réserves naturelles se confirmeraient, qu'elles seraient accessibles, conséquentes et exploitables, il restera un investissement technique, technologique et réglementaire conséquent et long pour les exploiter. Les décideurs auront pour tâche de mesurer les différents impacts économiques et écologiques de cette ressource, tandis que les chercheurs devront lever les multiples verrous.

**Il est primordial de ne pas ralentir les avancées sur les autres technologies** de production d'hydrogène décarboné sur le chemin de la quête de cette solution miracle.



© Périple & Cie

# Économie et métiers de l'Hydrogène

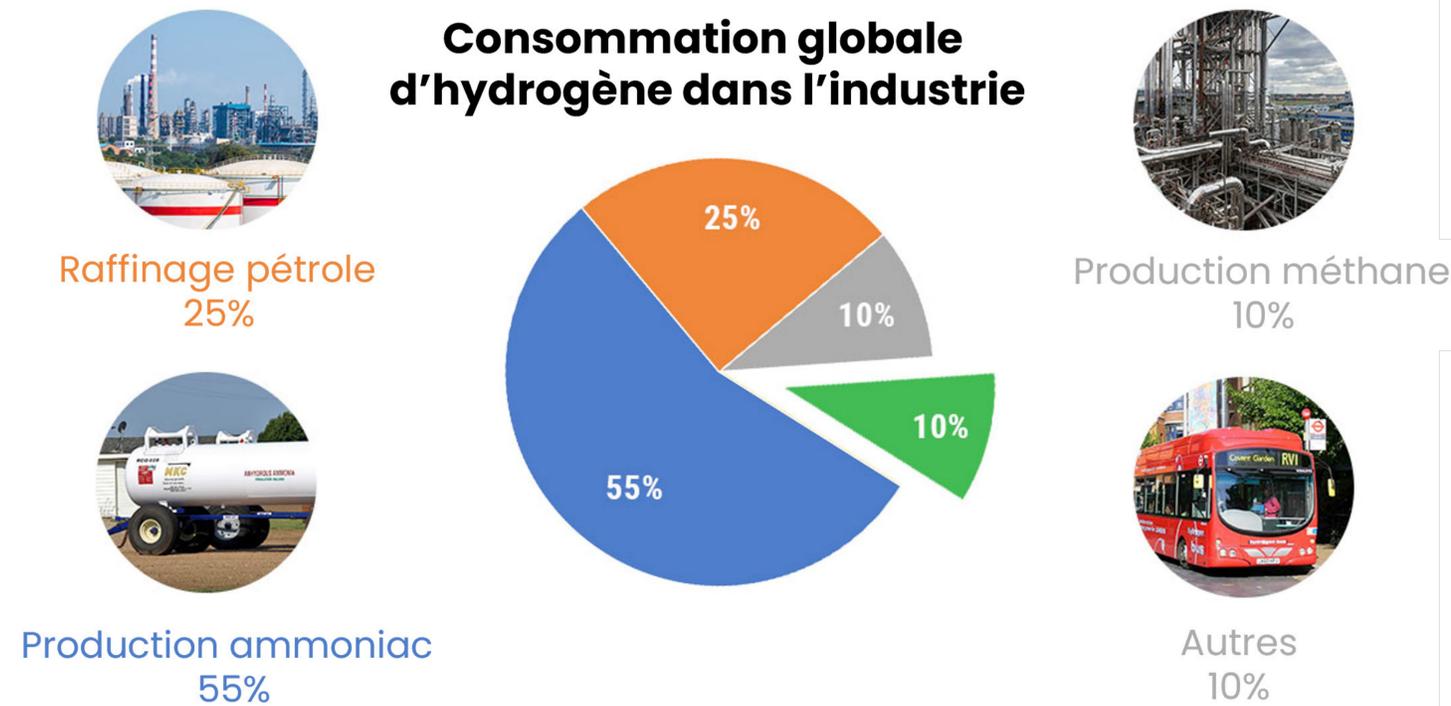
## Économie mondiale de l'hydrogène à l'horizon 2050



La montée de l'économie hydrogène promet un impact profond sur l'économie globale et le marché de l'emploi à l'horizon 2050. Il est nécessaire de développer les cursus académiques déjà existants qui permettront de former aux métiers de l'hydrogène.

# L'Hydrogène et l'Industrie

À ce jour, l'hydrogène est essentiellement utilisé dans l'industrie en particulier l'industrie chimique et le raffinage. En tant que vecteur énergétique, il peut être valorisé dans de nombreuses applications telles que l'industrie, le transport, la production d'électricité ou encore dans les bâtiments, collectivités et les zones non interconnectées au réseau électrique. Le gouvernement français a placé le développement de l'hydrogène-énergie comme une priorité avec 7 milliards d'euros de soutien public d'ici 2030 avec trois objectifs : la décarbonation de l'industrie pour contribuer à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, le développement des mobilités lourdes à hydrogène et le soutien d'une recherche d'excellence et le développement des offres de formation.



**UTILISATIONS FINALES**

- Industrie**  
(matière première, combustible)
- Transport**  
(véhicules à pile à combustible)
- Électricité**  
(stockage, équilibrage du réseau)
- Bâtiments et collectivités**  
(électricité et chauffage)