

4. Vecteurs d'énergie

4.3 – L'hydrogène

Partie 1 – Histoire et caractéristiques

Daniel R. Rousse, Ph.D., Ing.

Département de génie mécanique

Tanguy Lunel, M.Sc.A.

Ivan de la Cuesta, M. Ing.

Théo Delpech, M.Sc.A., Bastien Thomasset, M.Sc.A.

Sarah Homsy, M. Ing., Louis Flamand, M. Ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Histoire de l'hydrogène
- L'hydrogène en bref
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Histoire de l'hydrogène
- L'hydrogène en bref
- Conclusion

Introduction

- L'hydrogène est régulièrement médiatisé comme le vecteur énergétique du futur.
- Cependant, il peine à réellement s'implanter dans le paysage énergétique mondial.
- D'après l'AIE, 2018 a été une année exceptionnelle pour le développement de l'hydrogène propre, avec plus de 20MW d'électrolyseurs ajoutés et des annonces de projets à 100MW

Introduction

- Cette présentation propose un tour d’horizon rapide de ce qu’est l’hydrogène, de son impact actuel et futur sur l’implantation des sources de production énergétiques renouvelables.
 - Les participants au cours, sont invités à suggérer des liens vers des sites proposant de nouvelles sources relatives à cette technologie.
 - Chaque année, des nouveautés apparaissent et mettre à jour cette présentation est notre responsabilité mais pour y arriver nous avons besoin vous !

Objectifs de l'ensemble du thème

- Comprendre les atouts et inconvénients de l'hydrogène;
- Connaître les moyens de production principaux et ceux à l'étude;
- Savoir à quoi sert l'hydrogène aujourd'hui, et à quoi il pourra servir dans le futur.

Introduction

- La présentation complète, jugée trop longue, a été scindée en parties afin de mieux circonscrire le sujet et alléger l'apprentissage.
- Cette première présentation s'attarde à deux sujets, discutés sur la page suivante.

Objectifs de cette présentation

- Présenter sommairement l'histoire de l'hydrogène
- Présenter tout aussi sommairement c'est quoi l'hydrogène.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***Histoire de l'hydrogène***
- L'hydrogène en bref
- Conclusion

Vrai ou faux

- L'hydrogène est un nouveau vecteur d'énergie découvert au XXIème siècle?
 - Répondez par oui (vrai)  ou non (faux)  dans la fenêtre des participants.

Question

- Qui est à l'origine de la découverte du phénomène de déplacement simple ?
 - A. Henry Cavendish
 - B. Robert Boyle
 - C. Johan Rudolph
 - D. François Isaac De Rivaz
 - E. Christian Friedrich Schoenbein



ENR2020

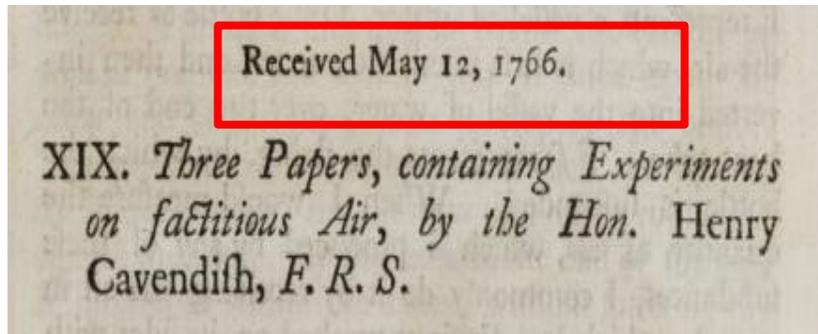
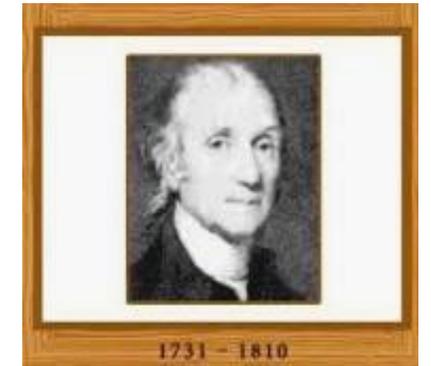
Histoire

- XVIe siècle: **Paracelse**, philosophe et médecin suisse, se questionne sur un gaz inflammable qu'il obtient suite à la dissolution du fer dans de l'acide sulfurique. Il ne le sait pas encore mais c'est de l'**hydrogène**.
- 1671 : **Robert Boyle** découvre le phénomène de **déplacement simple** ; réaction qui produit du dihydrogène gazeux lorsqu'on trempe un métal pur dans de l'acide



Histoire

- 1766 : **Henry Cavendish** confirme que l'hydrogène est un élément distinct et remarque que cet élément est très inflammable grâce à la **réaction de combustion** avec l'O₂



<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1766.0019>

1766 Hydrogen was first identified as a distinct element by British scientist Henry Cavendish after he evolved hydrogen gas by reacting zinc metal with hydrochloric acid. In a demonstration to the Royal Society of London, Cavendish applied a spark to hydrogen gas yielding water. This discovery led to his later finding that water (H₂O) is made of hydrogen and oxygen.



<https://www.slideshare.net/sugeladi/history-of-hydrogen>

Histoire

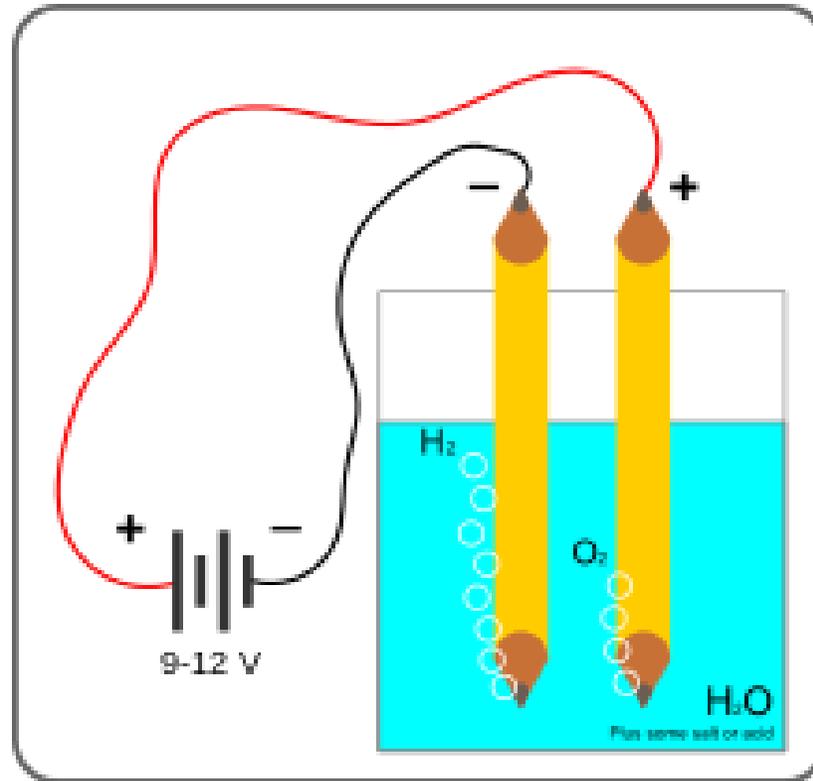
- 1783 : Jacques Alexander Cesar Charles déploie le premier vol à l'hydrogène en montgolfière. Le ballon vole jusqu'à une altitude de 3 km.
- 1788 : Antoine Laurent de Lavoisier réalise la même expérience qu'Henry Cavendish et donne le nom:

HYDROGENIUM
↙ ↘
EAU QUI FORME



Histoire

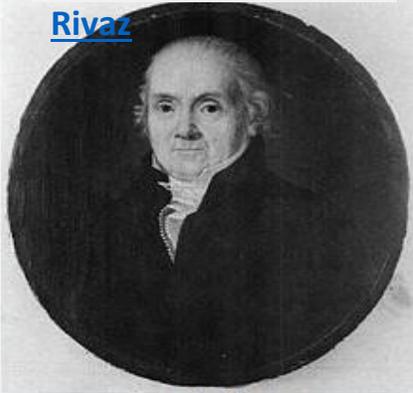
- 1789 : Adrian **Paets** et Jan **Rudolph Deiman** démontrent le principe de l'électrolyse de l'eau à l'aide de 2 électrodes d'or immergées dans l'eau



Histoire

1807 - Première voiture avec un moteur à combustion interne utilisant de l'hydrogène

[François Isaac De Rivaz](#)



Isaac de Rivaz

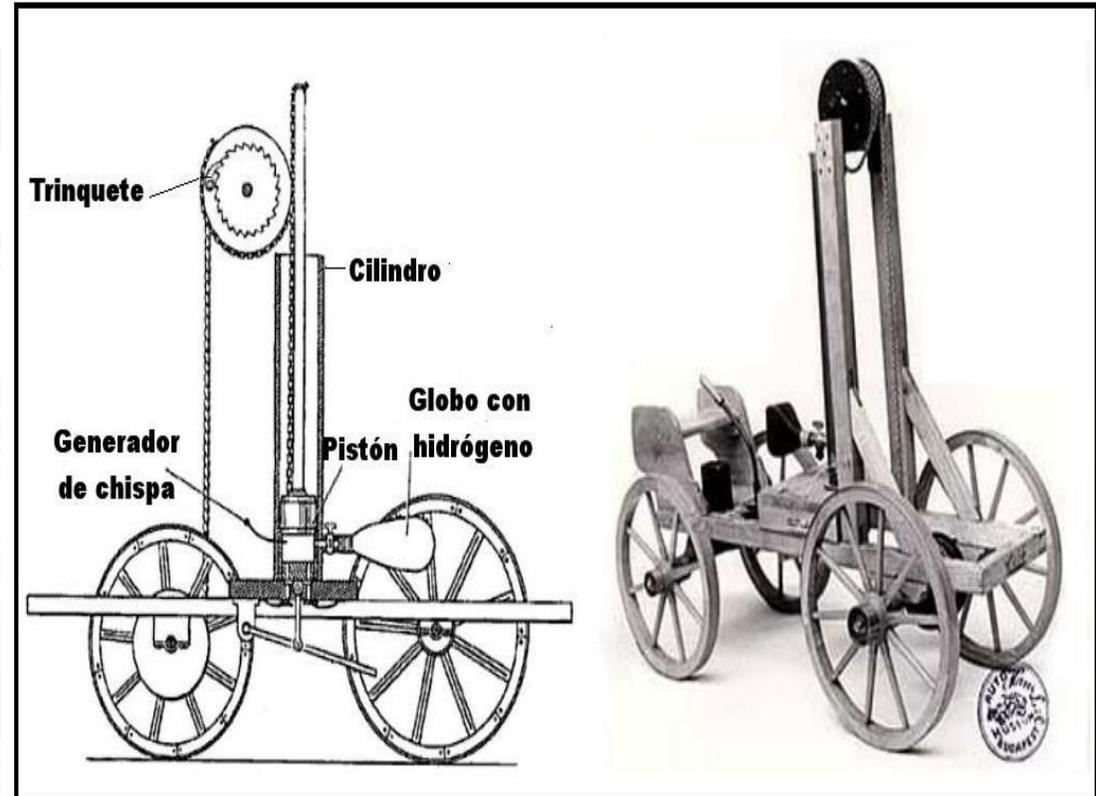
Born December 19, 1752
Paris, Kingdom of France

Died July 30, 1828 (aged 75)
Sion, Switzerland

Nationality French and Swiss

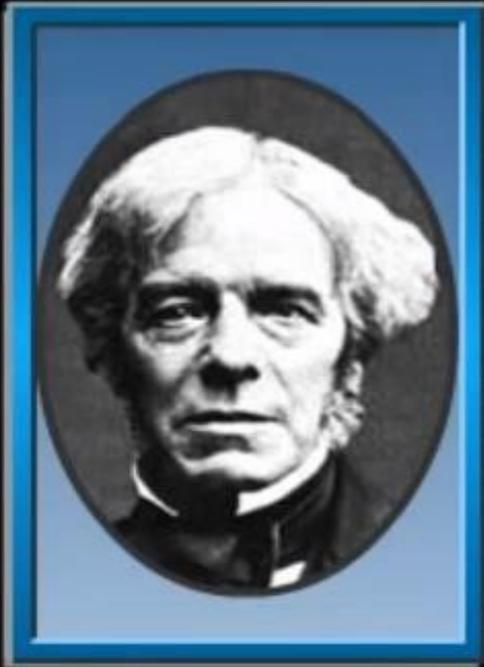
Occupation Swiss politician, MP, **Inventor**

Known for The world's first automobile powered by an 'internal combustion engine'



[La machine de De Rivaz](#)

Histoire



1833/34

Faraday's laws of electrolysis

The first law of electrolysis

The second law of electrolysis

Michael Faraday

The image shows a portrait of Michael Faraday on the left. To the right is a hierarchical diagram. At the top is a box labeled '1833/34'. Below it is a box labeled 'Faraday's laws of electrolysis'. This box branches into two boxes: 'The first law of electrolysis' on the left and 'The second law of electrolysis' on the right. Below the portrait is the name 'Michael Faraday'.

Histoire

[Christian Friedrich Schoenbein](#)



Physicien Allemand

[William Robert Grove](#)



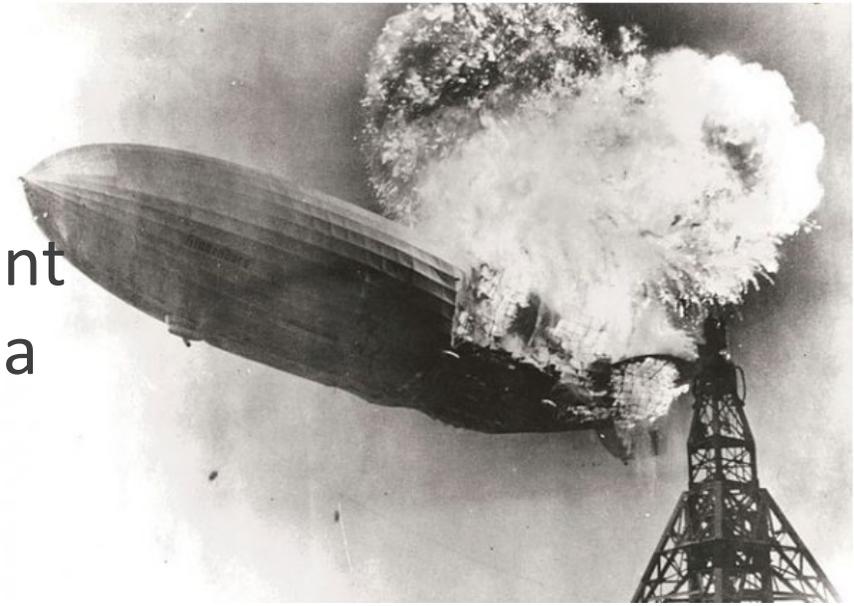
Physicien Britannique

1839 Chacun de leur côté travaillant en parallèle ont développé le principe de la Pile à Combustible

[History of Fuel Cells](#)

Histoire

- A l'époque Boyle et Cavendish signalent également que l'hydrogène est moins dense que l'air, d'où sa capacité à lever des choses
- Au début des années 1900 l'hydrogène, malgré son inflammabilité, vient remplacer l'hélium qui est rare et coûteux pour l'utilisation des dirigeables
- En 1937, le dirigeable à l'hydrogène Hindenburg prend feu et explose. Après ce désastre l'hydrogène est abandonné comme gaz de sustentation



Histoire

"I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light, of an intensity of which coal is not capable".

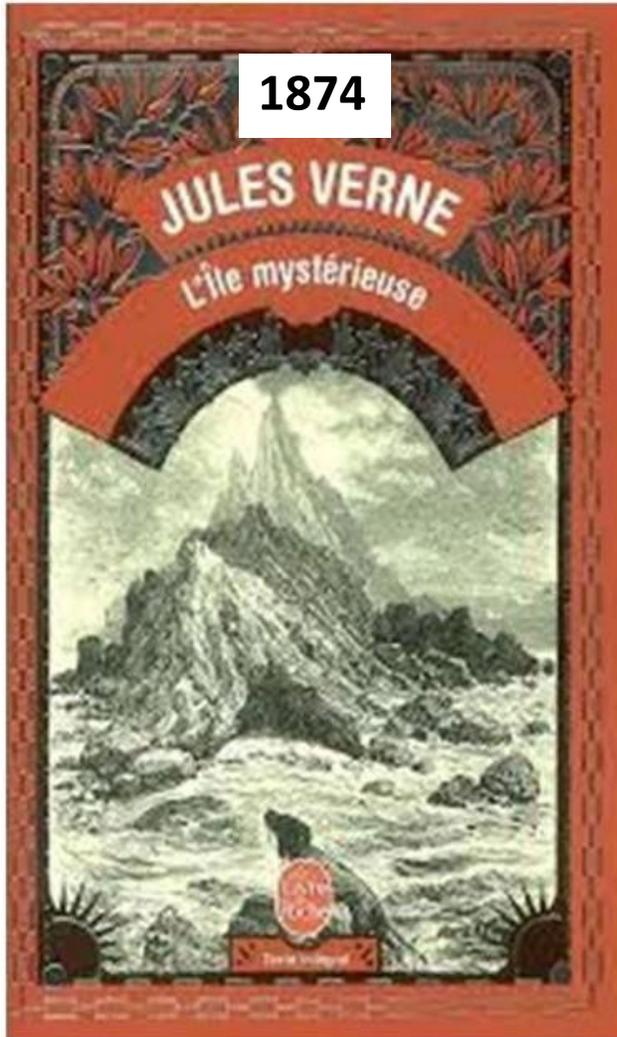
Jules Verne, "The mysterious island"

Jules Verne



Jules Verne photographié par Nadar, vers 1878.

Histoire



318

L'ILE MYSTÉRIEUSE

— Mais que trouvera-t-on? demanda Pencroff. L'imaginez-vous, monsieur Cyrus?

— A peu près, mon ami.

— Et qu'est-ce qu'on brûlera à la place du charbon?

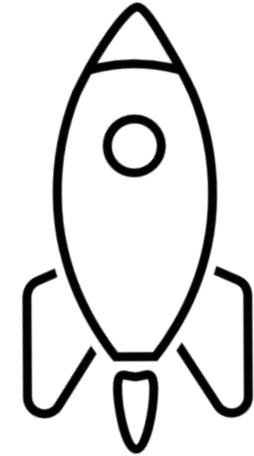
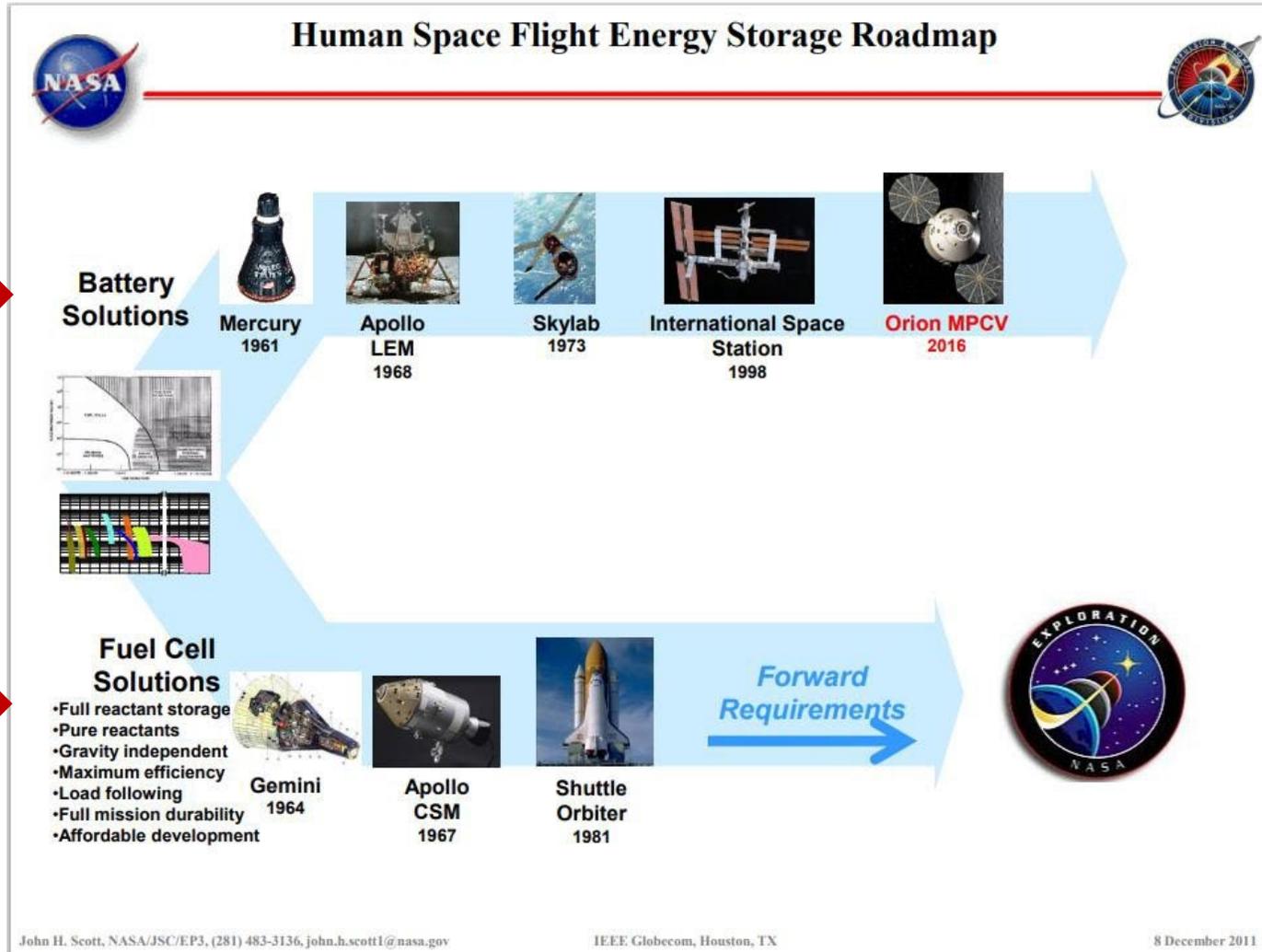
— L'eau, répondit Cyrus Smith.

— L'eau, s'écria Pencroff, l'eau pour chauffer les bateaux à vapeur et les locomotives, l'eau pour chauffer l'eau!

— Oui, mais l'eau décomposée en ses éléments constitutifs, répondit Cyrus Smith, et décomposée, sans doute, par l'électricité, qui sera devenue alors une force puissante et maniable, car toutes les grandes découvertes, par une loi inexplicable, semblent concorder et se compléter au même moment. Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. Un jour, les soutes des steamers et les tenders des locomotives, au lieu de charbon, seront chargés de ces deux gaz comprimés, qui brûleront dans les foyers avec une énorme puissance calorifique. Ainsi donc, rien à craindre. Tant que cette terre sera habitée, elle fournira aux besoins de ses habitants, et ils ne manqueront jamais ni de lumière ni de chaleur, pas plus qu'ils ne manqueront des productions des règnes végétal, minéral ou animal. Je crois donc que lorsque les gisements de houille seront épuisés, on chauffera et on se chauffera avec de l'eau. **L'eau est le charbon de l'avenir.**

— Je voudrais voir cela, dit le marin.

Histoire



500 000 gallons H₂ (liq)
par vol

[The Development of Fuel Cell Technology for NASA's Human Spaceflight Program](#)

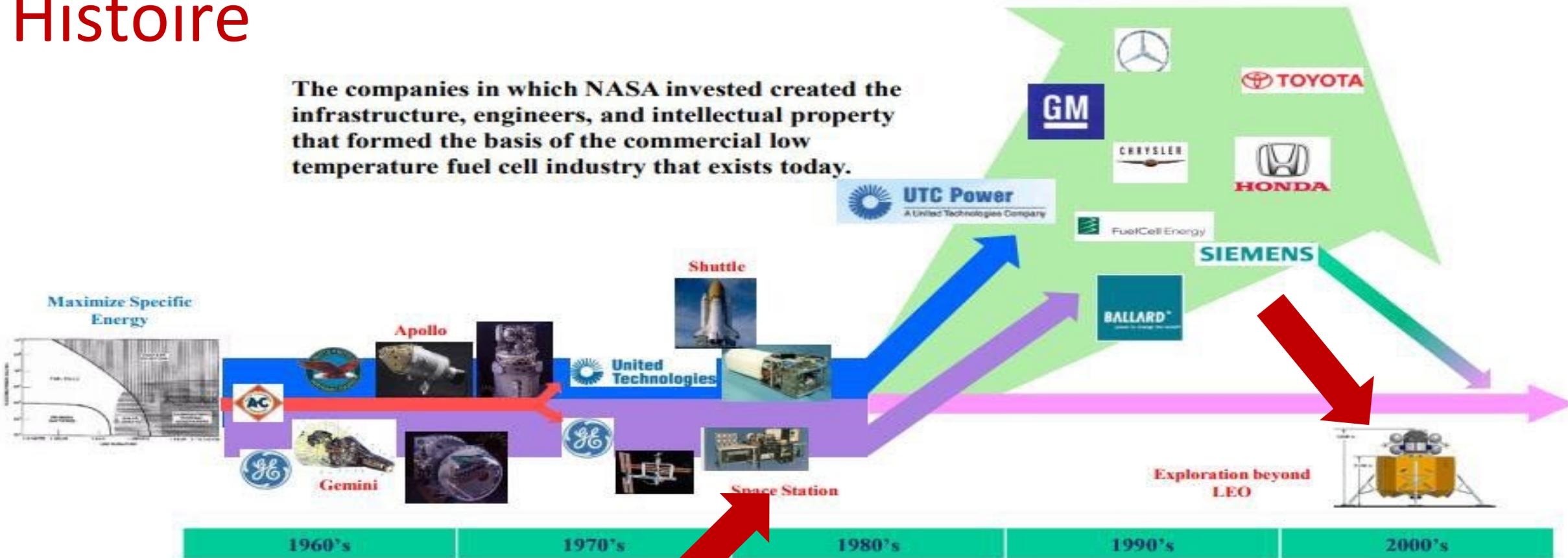


Modern Fuel Cell Technology is a Spinoff of NASA's Human Spaceflight Program



Histoire

The companies in which NASA invested created the infrastructure, engineers, and intellectual property that formed the basis of the commercial low temperature fuel cell industry that exists today.

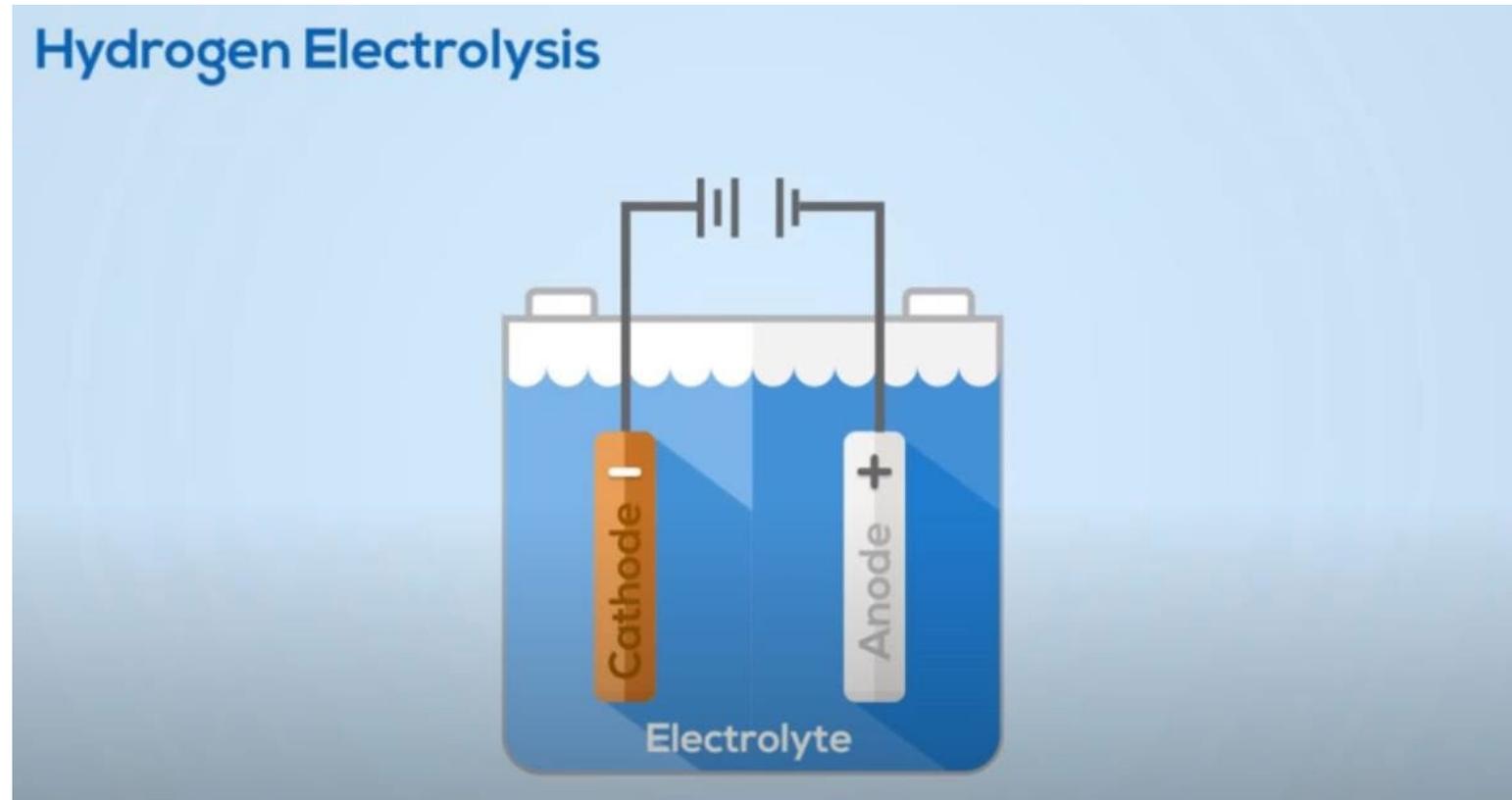


Investment from NASA's Human Spaceflight Program in the 1960's – 1980's brought fuel cells from the laboratory to their first practical application

NASA continues to drive innovations in spacecraft low temperature fuel cell technology development while leveraging commercial advances.

Histoire

- Aujourd'hui: l'électrolyse



[The Hydrogen Electrolyser](#)

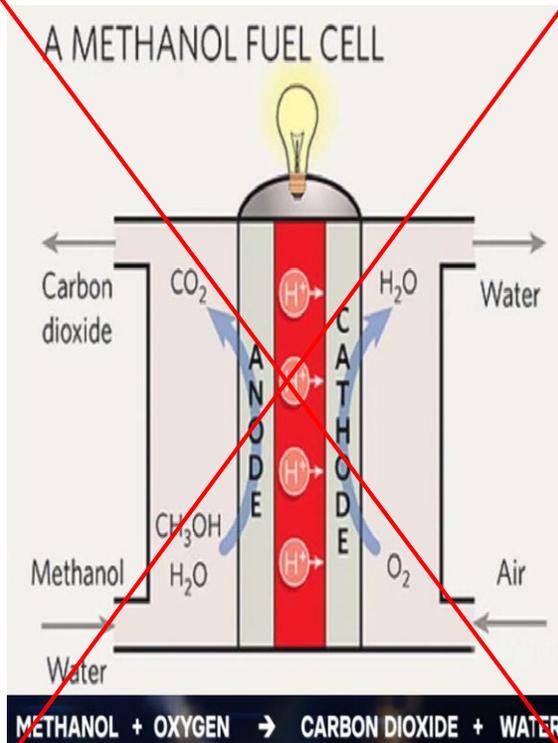
Histoire

- Aujourd'hui : la pile à combustible

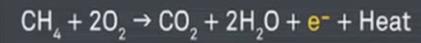
Hydrogène pur



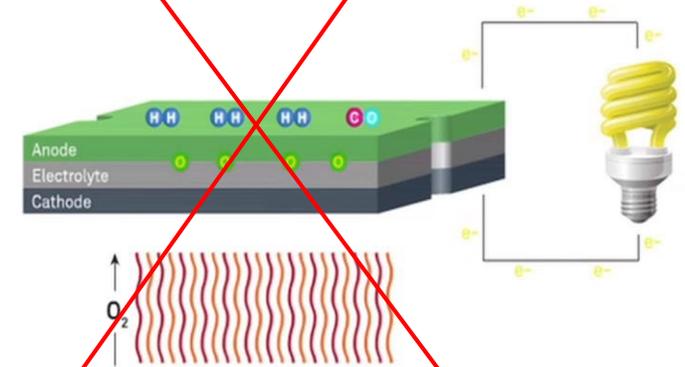
Pile au méthanol



Pile au gaz naturel



The oxygen ions combine with the reformed fuel to produce electricity, water, and a small amount of CO2.



How a Solid Oxide Fuel Cell Works

Bloomenergy

Vrai ou faux

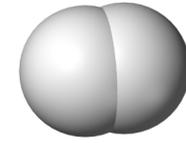
- L'hydrogène requiert beaucoup d'eau?
 - Répondez par oui (vrai)  ou non (faux)  dans la fenêtre des participants.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Histoire de l'hydrogène
- ***L'hydrogène en bref***
- Conclusion

L'hydrogène

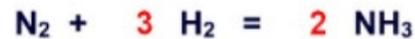
- Ce qui est appelé couramment « hydrogène » dans le secteur de l'énergie est en fait le dihydrogène



- Aujourd'hui - utilisation actuelles :

- Synthèse de l'ammoniac (45-50 %) -> agriculture et industrie chimique

diazote + dihydrogène = ammoniac

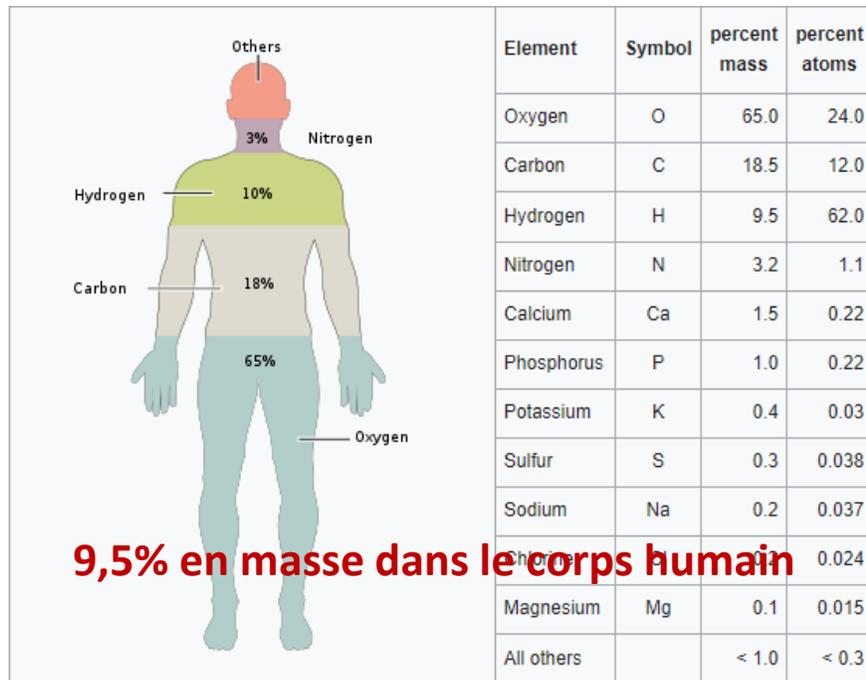


- Raffinage et désulfuration des hydrocarbures (37-45 %) -> pétrochimie
- Synthèse du méthanol (10-12 %) -> industrie chimique

https://fr.wikipedia.org/wiki/Dihydrog%C3%A8ne#Utilisations_industrielles

L'hydrogène

- Plus de 90% des atomes de l'univers
- 75% de la masse totale de l'univers
- Présent dans presque toutes les molécules

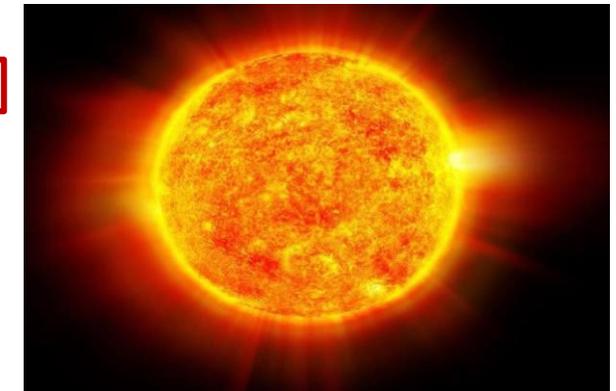


9,5% en masse dans le corps humain

The main elements that compose the human body (including water).

Element	% of total atoms	% of total mass
Hydrogen	91.2	71.0
Helium	8.7	27.1
Oxygen	0.078	0.97
Carbon	0.043	0.40
Nitrogen	0.0088	0.096
Silicon	0.0045	0.099
Magnesium	0.0038	0.076
Neon	0.0035	0.058
Iron	0.030	0.014
Sulfur	0.015	0.040

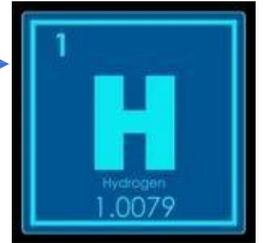
Source: NASA – Goddard Space Flight Center



71% en masse dans le soleil

L'hydrogène

- Où est-il par rapport aux autres éléments?



Periodic Table of the Elements

1 1IA 11A																	18 VIII A 8A
1 H Hydrogen 1.0079	2 IIA 2A											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	2 He Helium 4.00260
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998403	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.989769	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.95591	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.847	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.732	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92159	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.9072	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90543	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.9665	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98037	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [209]	86 Rn Radon 222.0176
87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium 226.254	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [265]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [268]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium unknown	114 Fl Flerovium [289]	115 Uup Ununpentium unknown	116 Lv Livermorium [293]	117 Uus Ununseptium unknown	118 Uuo Ununoctium unknown
			57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.9655	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
			89 Ac Actinium 227.0278	90 Th Thorium 232.0377	91 Pa Protactinium 231.03628	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium 237.0482	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium 243.0614	96 Cm Curium 247.0704	97 Bk Berkelium 247.0703	98 Cf Californium 251.0796	99 Es Einsteinium 252	100 Fm Fermium 257.103	101 Md Mendelevium 258.10	102 No Nobelium 259.108	103 Lr Lawrencium 262
			Alkali Metals	Alkaline Earths	Transition Metals	Basic Metals	Semi-Metals	Nonmetals	Halogens	Noble Gases	Lanthanides	Actinides					

- Premier élément du tableau périodique;
- Masse atomique de 1.0079 Dalton
- La source la plus abondante d'hydrogène sur terre c'est l'eau (H₂O);
- Tant qu'il y aura de l'eau sur terre et de l'H₂ dans le cœur du soleil, il y aura de l'énergie;
- Homo Sapiens disparaîtra bien avant l'épuisement du soleil.

L'hydrogène

- Sur Terre, on trouve essentiellement l'hydrogène sous forme combinée mais aussi directement sous forme gazeuse.
 - L'interaction eau/roche, la diagénèse, va libérer l'hydrogène de l'eau lors de phénomènes d'oxydation, phénomènes que l'on observe dans différents contextes géologiques.
 - D'autres sources d'hydrogène naturel sont connues : la radioactivité naturelle de la croûte terrestre (radiolyse) peut notamment séparer hydrogène et oxygène de l'eau et libérer ces gaz.

Dr. Isabelle Moretti

L'hydrogène

- Hydrogène combiné et naturel

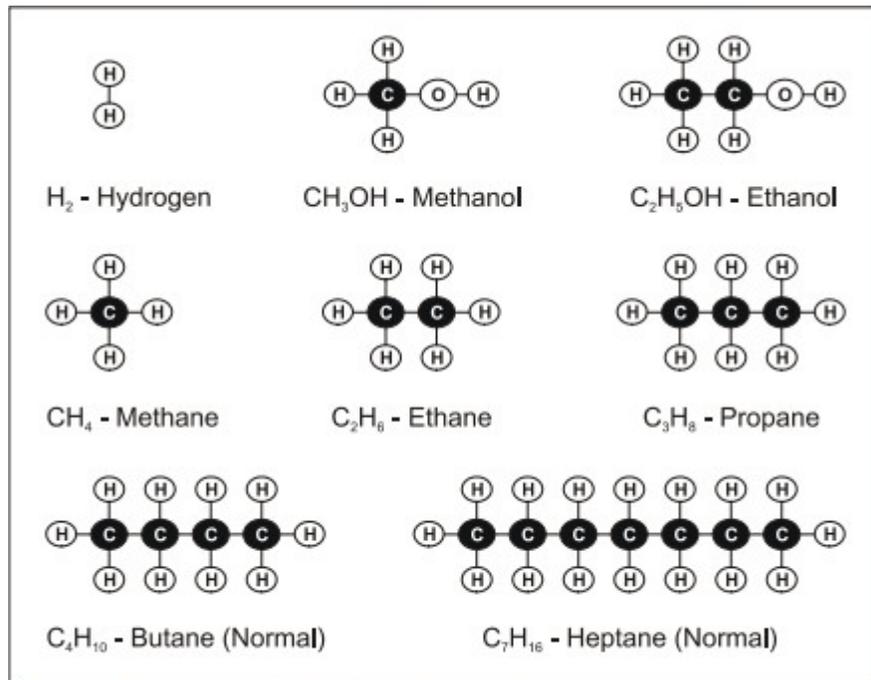
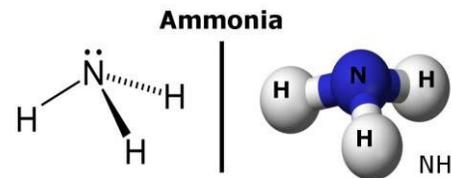


Figure 1-2 Chemical Structure of Common Fuels

Source:
[DOE](#)



Source: [Wikipedia](#)



Natural hydrogen seeps in Oman: 82% pure H_2

« Le sultanat d'Oman et les Philippines sont les cas les plus étudiés mais des émanations d'hydrogène ont aussi été notées en Nouvelle-Calédonie ou même dans les Pyrénées. »

Dr. Isabelle Moretti – [Connaissances des énergies](#)

L'hydrogène

- L'hydrogène naturel à concentration exploitable est rare.



Réserves d'hydrogène naturel du bassin de Bourakébougou (sud-ouest du Mali)
<http://www.envirolex.fr/de-grandes-reserves-dhydrogene-naturel-confirmees-au-mali/>

Question

- De 92 à 96 % de l'hydrogène synthétisé est produit par ?
 - A. Procédé d'électrolyse de l'eau
 - B. Procédé de gazéification
 - C. Dissociation thermochimique
 - D. Procédé de vaporeformage à partir d'hydrocarbure
 - E. Aucune de ces réponses



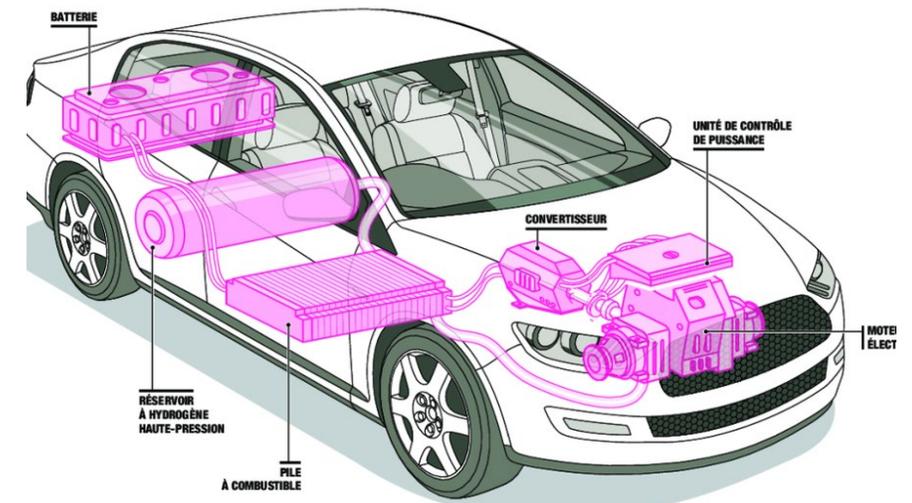
ENR2020

L'hydrogène

- Aujourd'hui l'hydrogène est dans son immense majorité synthétisé :
 - Procédé de vaporeformage à partir d'hydrocarbure (92-96%)
 - ~300-500 gCO₂eq/kWh d'H₂ (si fait depuis méthane (en considérant un rendement de 60% de la pile à combustible)
 - À comparer avec charbon (820 gCO₂eq/kWh) et éolien (11 gCO₂eq/kWh)
 - Procédé d'électrolyse de l'eau
 - Empreinte carbone et environnementale très fortement dépendante de la source d'électricité;
 - **Potentiellement durable !**

L'hydrogène

- L'hydrogène demain : l'hydrogène comme vecteur d'énergie
 - Grands potentiels :
 - Faire du stockage d'énergie sur réseau d'électricité
 - Réduire l'empreinte carbone des engrais et de l'industrie chimique
 - Dépolluer une partie des transports
 - Paraît peu prometteur pour les véhicules personnels à cause de la taille du réservoir nécessaire, du poids de la pile à combustible, du coût ; en comparaison avec la batterie Li-ion.



<https://www.usinenouvelle.com/article/comment-la-voiture-hydrogene-entend-monter-en-puissance.N861295>

Vrai ou faux

- L'hydrogène est rentable par rapport aux hydrocarbures?
 - Répondez par oui (vrai)  ou non (faux)  dans la fenêtre des participants.

L'hydrogène

- Densité et densité énergétique



Hydrogen Properties: A Comparison

	Hydrogen	Natural Gas	Gasoline
Color	No	No	Yes
Toxicity	None	Some	High
Odor	Odorless	Mercaptan	Yes
Buoyancy Relative to Air	14X Lighter	2X Lighter	3.75X Heavier
Energy by Weight	2.8X > Gasoline	~1.2X > Gasoline	43 MJ/kg
Energy by Volume	4X < Gasoline	1.5X < Gasoline	120 MJ/Gallon

Source: California Fuel Cell Partnership

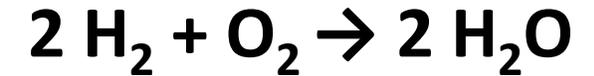
- 3 fois plus d'énergie dans 1kg d'hydrogène que dans 1 kg d'essence.
- L'énergie de 1 kg d'hydrogène est ainsi équivalente à l'énergie de 1 gallon d'essence.

Activité

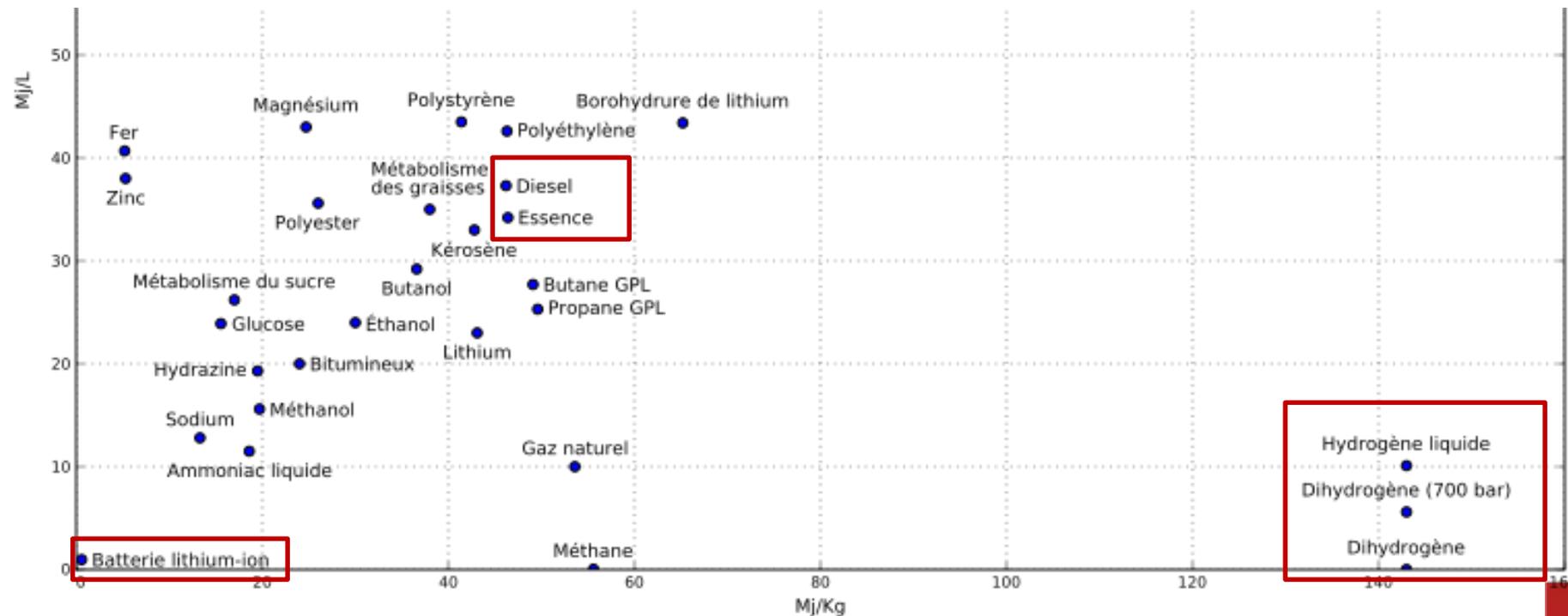
- Quels sont les avantages et les inconvénients de la transformation de l'hydrogène en électricité?
 - Durée : 15 minutes
 - Travail personnel : 5 minutes (formulation d'une réponse écrite)
 - Travail en 2 équipes : 5 minutes (formulation d'une réponse écrite)
 - Plénière et synthèse: 5 minutes (présentation des solutions par équipes)

L'hydrogène

- Avantages :



- Combustion ou oxydation de l'hydrogène n'émet pas de CO_2
- Densité énergétique par poids élevée



L'hydrogène

- Désavantages :
 - Densité énergétique par volume faible :
 - Besoin de compression ou de liquéfaction de l'hydrogène
 - Encore cher
 - ~ 1,8 USD/kg par vaporeformage (3x plus que gaz naturel)
 - ~ 5-8,5 USD/kg si renouvelable

<https://www.connaissancedesenergies.org>

L'hydrogène

- Désavantages :
 - Potentiellement dangereux :
 - Fuites plus difficiles à contrôler car molécule petite;
 - Large plage d'inflammabilité;
 - Flammes invisibles (le jour);
 - Explosif.

Hydrogen flames are almost invisible in daylight.



Figure 1-8 Invisible Hydrogen Flame Igniting Broom

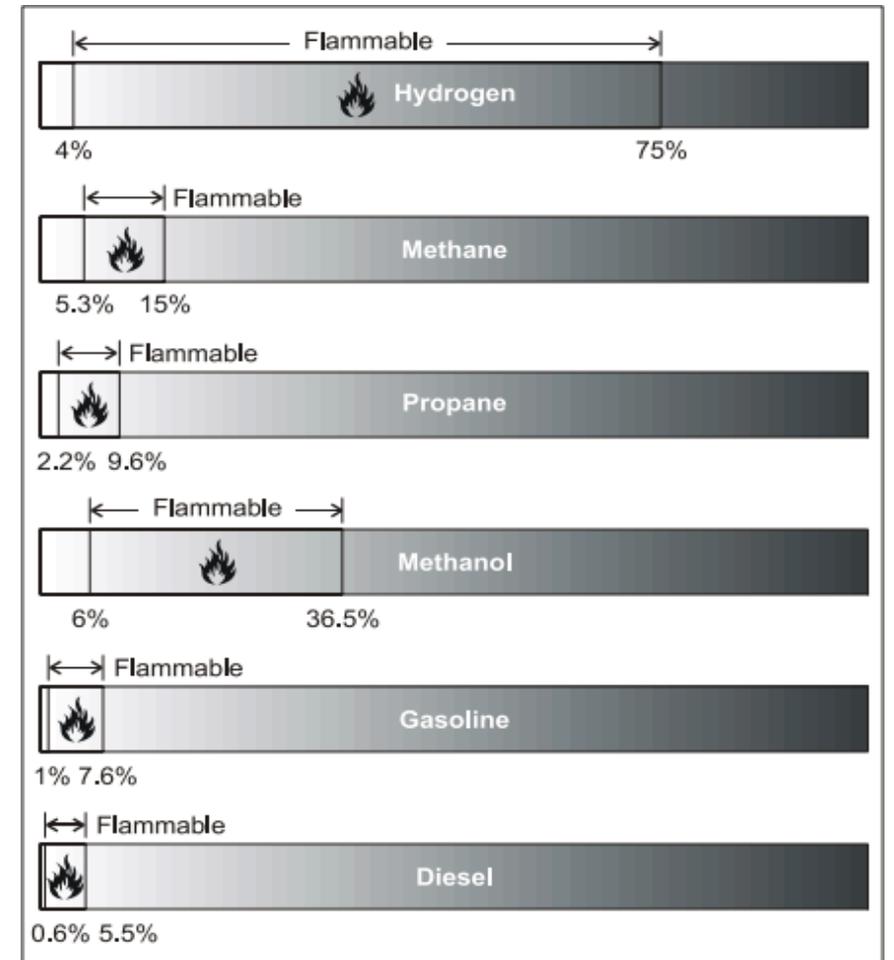


Figure 1-7 Flammability Ranges of Comparative Fuels at Atmospheric Temperature

Source : DOE (cliquez)

L'hydrogène

- Les défis de l'heure
 - Le stockage
 - Oxydation partielle
 - D'après IEA :
 - Passage à un hydrogène d'origine renouvelable
 - Diminution des coûts (projection de -30% pour 2030 -> insuffisante ?)
 - Adaptation des réglementations de sécurité

IEA - the future of hydrogen - executive summary - 06/19

L'hydrogène

- L'institut de l'hydrogène de l'UQTR
 - propose les recherches les plus conséquentes au Québec sur le sujet
 - pilote un projet de regroupement scientifique



Activité

- L'hydrogène: un projet de réservoir d'hydrogène d'Enbridge et Brookfield en Ontario (à venir)
 - Durée : 50 minutes
 - Travail personnel : 10 minutes (formulation d'une réponse écrite)
 - Travail en 3 équipes : 30 minutes (formulation d'une réponse écrite)
 - Plénière et synthèse: 10 minutes (présentation des solutions par équipes)

Vrai ou faux

- L'hydrogène requiert de l'eau douce?
 - Répondez par oui (vrai)  ou non (faux)  dans la fenêtre des participants.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Histoire de l'hydrogène
- L'hydrogène en bref
- ***Conclusion***

Conclusion

- L'hydrogène est en plein essor;
- Technologiquement le verrou de la densité d'énergie par unité de volume demeure;
- La technologie est désormais sécuritaire;
- Les autres présentations permettent d'aborder
 - La production;
 - Le transport
 - Le stockage;
 - Les utilisations;
 - Et les recommandations 2019 de l'AIE à ce sujet.

Aussi

- Les autres capsules de formation en vecteurs d'énergie (M4)
 - Électricité : Réseaux électriques
 - Électricité : Intégration des ENR intermittentes
 - Électricité : Interconnexions et marchés
 - Chaleur : Réseaux de chaleur
 - Hydrogène : Production, Stockage, Transport et Utilisations
 - Hydrogène : Sécurité, marché mondial et recommandations de l'AIE



Merci de votre attention !

Lorsque cette capsule de formation est présentée en asynchrone (PDF récupérable sur le site du cours), si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

