

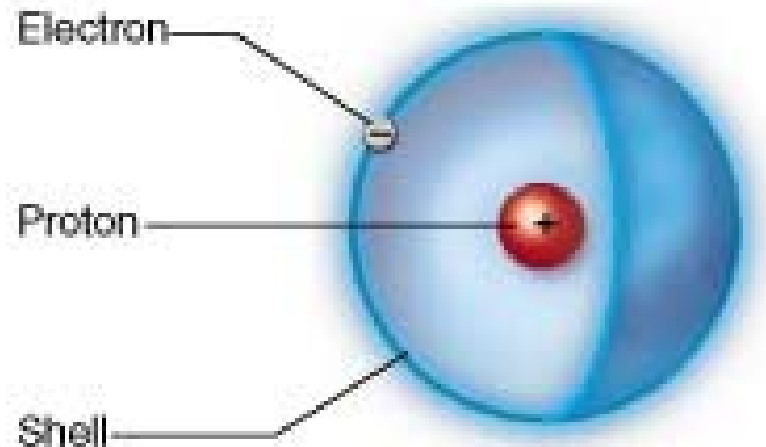
HYDROGÈNE

Marcel Lacroix

Université de Sherbrooke

HYDROGÈNE

1. Découvert par Henry Cavendish en 1766.
2. Élément le plus simple et le plus abondant dans l'univers: 93% de la matière.



INTÉRÊT DE L'HYDROGÈNE

- 3. Le potentiel de l'hydrogène dans la combustion est connu depuis deux siècles.**
- 4. Le premier moteur à combustion, développé en 1805 par Isaac de Rivaz (Suisse), était alimenté à l'hydrogène! (Rudolf Diesel a inventé le moteur portant son nom en 1892).**

INTÉRÊT DE L'HYDROGÈNE

- 5. L'hydrogène n'existe pas à l'état libre sur la terre.**
- 6. Léger, l'hydrogène moléculaire s'est échappé de l'attraction gravitationnelle. L'hydrogène restant est lié chimiquement à d'autres éléments (par exemple, H₂O).**
- 7. Conséquence: l'hydrogène n'est pas une source d'énergie. Comme l'électricité, il faut le produire.**

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

1 H 1																	2 He 4
3 Li 7	4 Be 9											5 B 11	6 C 12	7 N 14	8 O 16	9 F 19	10 Ne 20
11 Na 23	12 Mg 24											13 Al 27	14 Si 28	15 P 31	16 S 32	17 Cl 35.5	18 Ar 40
19 K 39	20 Ca 40	21 Sc 45	22 Ti 48	23 V 51	24 Cr 52	25 Mn 55	26 Fe 56	27 Co 59	28 Ni 59	29 Cu 63.5	30 Zn 65	31 Ga 70	32 Ge 73	33 As 75	34 Se 79	35 Br 80	36 Kr 84
37 Rb 85.5	38 Sr 88	39 Y 89	40 Zr 91	41 Nb 93	42 Mo 96	43 Tc (98)	44 Ru 101	45 Rh 103	46 Pd 106	47 Ag 108	48 Cd 112	49 In 115	50 Sn 119	51 Sb 122	52 Te 128	53 I 127	54 Xe 131
55 Cs 133	56 Ba 137	71 Lu 175	72 Hf 178.5	73 Ta 181	74 W 184	75 Re 186	76 Os 190	77 Ir 192	78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 201	81 Tl 204	82 Pb 207	83 Bi 209	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra 226	103 Lr (260)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Uun (269)	111 Uuu (272)	112 Uub (277)	113 Uut	114 Uuq (289)			116 Uuh (289)	

- C SOLID
- Hg LIQUID
- H GAS
- METAL
- SEMIMETAL (Metalloid)
- NONMETAL

KEY

6 C 12

57 La 138	58 Ce 140	59 Pr 141	60 Nd 144	61 Pm (145)	62 Sm 150	63 Eu 152	64 Gd 157	65 Tb 159	66 Dy 162.5	67 Ho 165	68 Er 167	69 Tm 169	70 Yb 173
89 Ac 227	90 Th 232	91 Pa 231	92 U 238	93 Np 237	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	103 No (259)

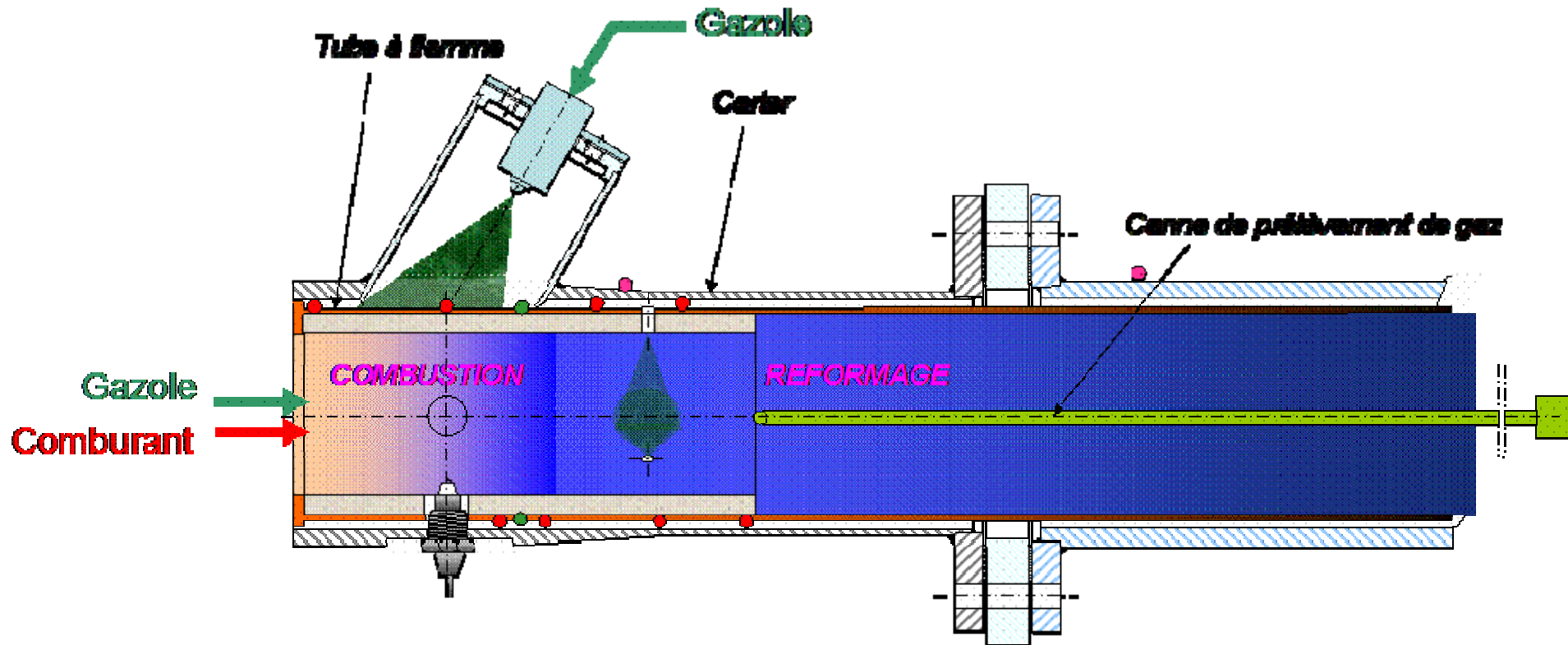
PROPRIÉTÉS DE L'HYDROGÈNE

- **Densité:** ~ 0.09 kg/m³ (à 25⁰C et 100kPa)
(air: ~ 1 kg/m³; eau: ~ 1000 kg/m³)
- **Chaleur massique:** ~ 14.2 kJ/kgK
(air: ~ 1 kJ/kgK; eau, ~ 4.2 kJ/kgK)
- **Pouvoir Calorifique:** ~ 141 000 kJ/kg
(essence: ~ 48 000 kJ/kg)
- **Point d'ébullition:** ~ -253⁰C (air: ~ -196⁰C;
eau: ~ 100 ⁰C)
- **Coefficient de diffusion dans les métaux:**
~ 0.3 x 10⁻¹² m²/s

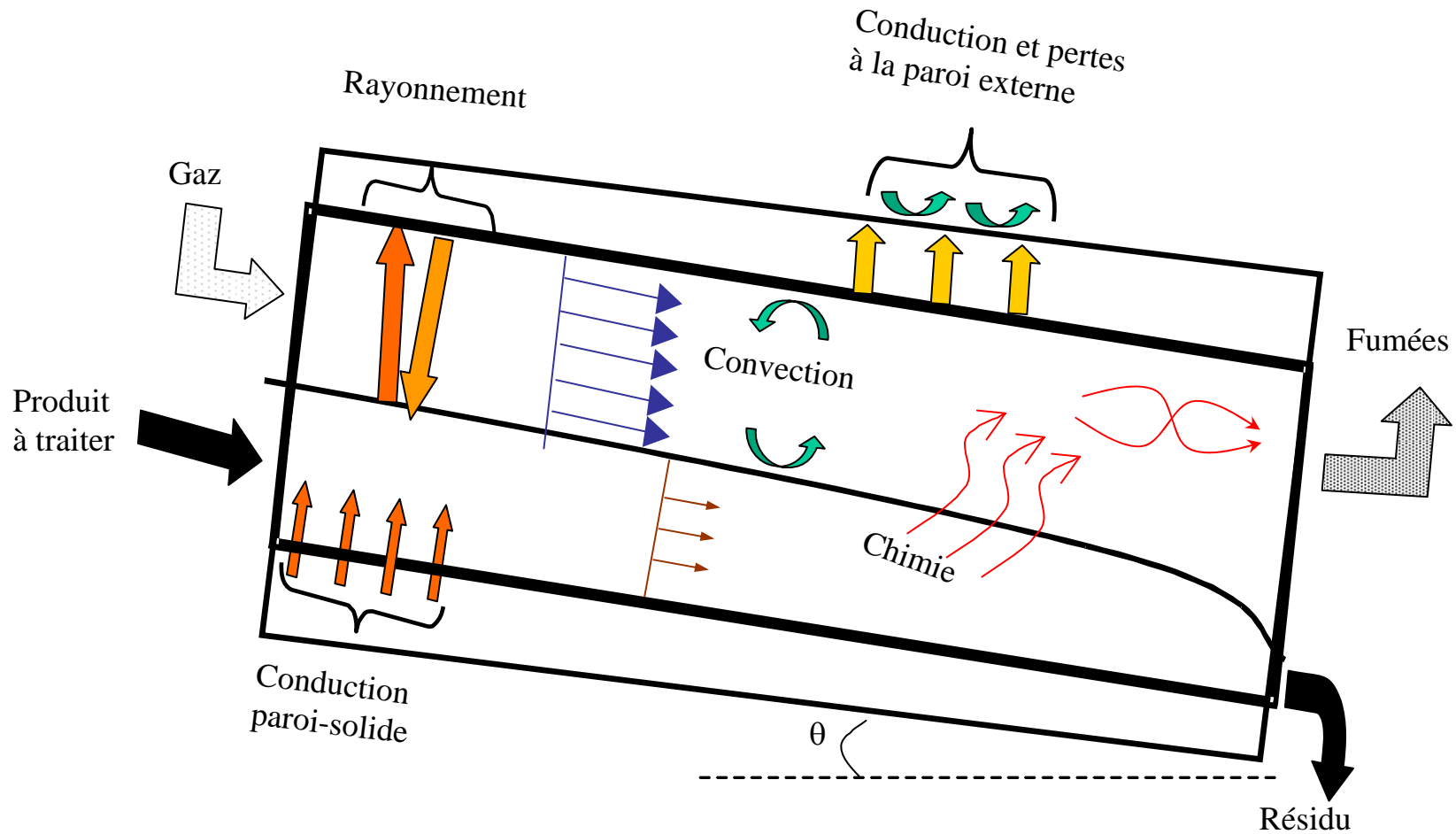
PRODUCTION D'HYDROGÈNE

- 1. Il existe au moins quatre moyens de produire de l'hydrogène: le reformage d'un gaz, l'électrolyse de l'eau, les réactions thermochimiques et la conversion biologique.**
- 2. Toutefois, 98% de l'hydrogène est produit dans le monde par reformage de gaz naturel (CH₄) ou par gazéification d'hydrocarbures.**

PRINCIPE DU REFORMAGE

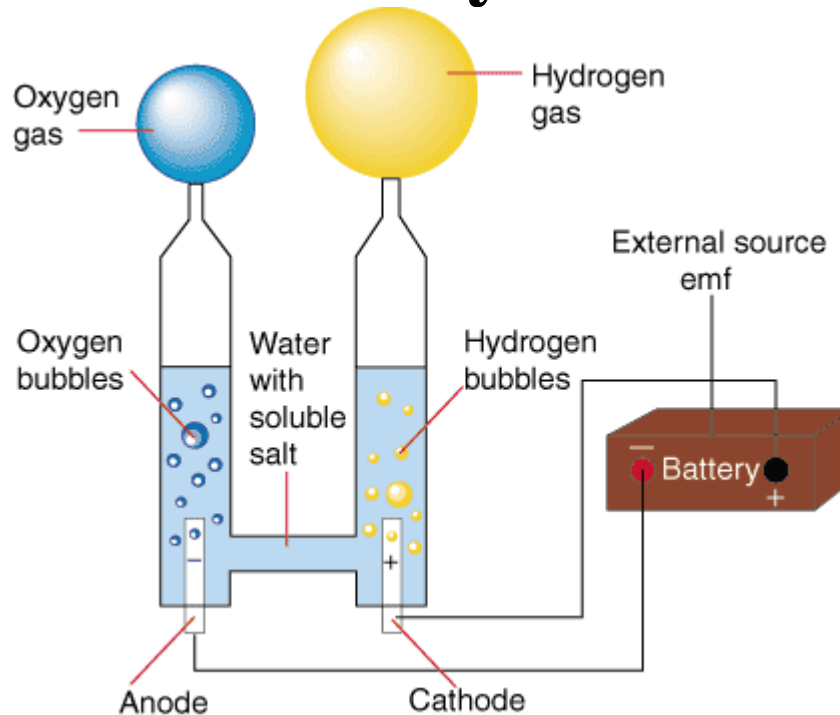


PRINCIPE DE LA GAZÉIFICATION



PRODUCTION D'HYDROGÈNE

3. 2% de l'hydrogène est produit par d'autres moyens dont l'électrolyse:



UTILISATION DE L'HYDROGÈNE

1. ~ 50% de l'hydrogène produit est utilisé dans les fertilisants (NH_3), ~ 37% dans l'industrie pétrochimique et ~ 13% dans d'autres secteurs de l'industrie chimique.

2. L'infrastructure pour la production et l'utilisation de l'hydrogène est donc très spécialisée et très limitée sur la planète.



AVANTAGES DE L'HYDROGÈNE

- 1. Élément le plus abondant dans l'univers.**
- 2. Son pouvoir calorifique par unité de masse est le plus élevé qui soit parmi les substances combustibles: ~ 141 000 kJ/kg comparé à ~ 48 000 kJ/kg pour l'essence.**
- 3. Sa combustion ne produit pas de CO₂.**

INCONVÉNIENTS ET DÉFIS DE LA TECHNOLOGIE DE L'HYDROGÈNE

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

- 1. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire. IL FAUT LE PRODUIRE.
Comment le faire à un coût concurrentiel tout en minimisant les effets sur l'environnement?**
- 2. La production d'hydrogène par reformage ou par gazéification rejette du CO₂ dans l'atmosphère comme le fait la combustion de tous les combustibles fossiles.**

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

- 3. La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau consomme plus d'énergie utile qu'elle n'en produit.**
- 4. Elle exige $\sim 180\ 000$ kJ/kg (~ 50 kWh/kg) d'hydrogène produit alors que la combustion dégage $\sim 141\ 000$ kJ/kg d'hydrogène.**
- 5. Et quelle est l'origine de l'électricité utilisée pour l'électrolyse?**

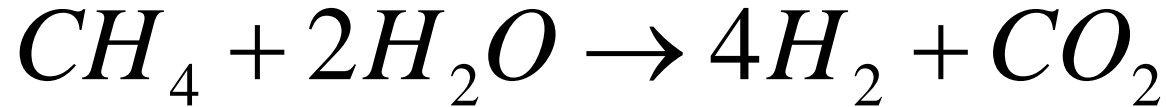
POUVOIR CALORIFIQUE DE L'HYDROGÈNE

- 1. Son pouvoir calorifique par unité de volume en *phase gazeuse* est décevant car sa densité est très faible. Exemple: sous 165 bar, l'hydrogène donne ~ 1 500 kJ/litre alors que le gaz naturel dégage ~ 6 300 kJ/litre.**
- 2. Son pouvoir calorifique par unité de volume en *phase liquide* est aussi décevant: ~ 10 000 kJ/litre comparé à ~ 36 000 kJ/litre pour l'essence.**

COMBUSTION: MOTEURS AU GAZ NATUREL OU À L'HYDROGÈNE?

Combustible	Pouvoir (kJ/kg)	Disponibilité
Gaz naturel (CH₄)	55 000	Oui
Hydrogène (H₂)	141 000	Non

REFORMAGE DU GAZ NATUREL



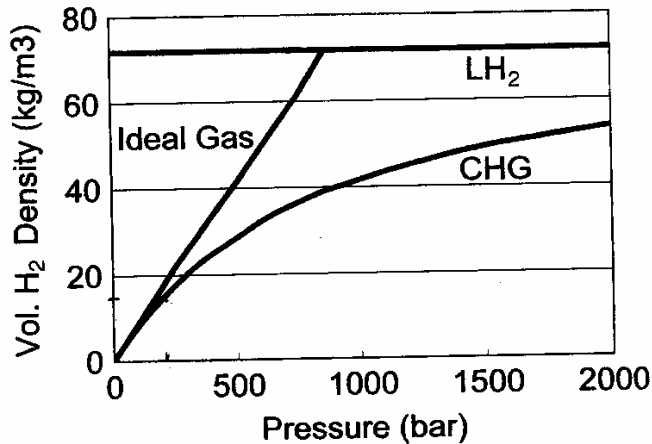
- Il faut 16 kg de gaz naturel pour produire 8 kg d'hydrogène.
- La combustion de 16 kg de gaz naturel dégage 16 kg x 55 MJ/kg = 880 MJ alors que la combustion de 8 kg d'hydrogène dégage 8 kg x 141 MJ/kg = 1128 MJ soit un gain de 28%!
- Ce gain justifie-t-il le développement du moteur à combustion à hydrogène plutôt qu'au méthane?

COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE

- **La combustion de l'hydrogène ne produit pas de CO_2 mais elle produit des NO_x .**

STOCKAGE D'HYDROGÈNE: COMPRESSION

1. 40 litres d'essence ~ 10 kg d'hydrogène.



Sous une pression de
← 200 bar, on peut
stocker ~15 kg H₂/m³

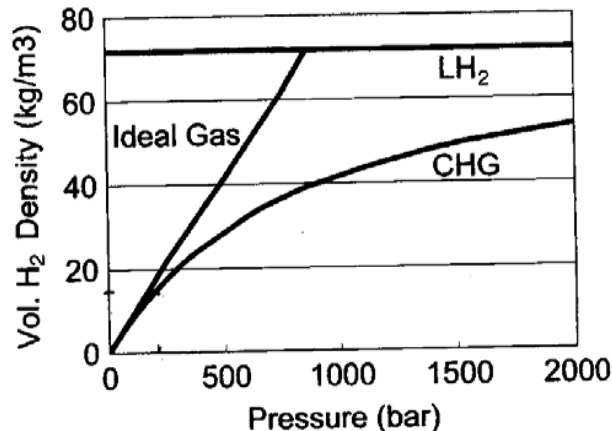
2. Sous une pression de 200 bar, 10 kg d'hydrogène occupent donc un volume de ~ 650 litres nécessitant 13 cylindres de 50 litres, chacun pesant 70kg!

STOCKAGE D'HYDROGÈNE: COMPRESSION

- 3. Stocker 10 kg d'hydrogène à 200 bar nécessite, avec la technologie actuelle, un réservoir pesant ~ 900 kg soit le poids d'une voiture compacte!**
- 4. Le défi est de développer un réservoir beaucoup plus léger qui puisse tolérer de telles pressions...**

STOCKAGE D'HYDROGÈNE: LIQUÉFACTION

1. La densité de l'hydrogène liquéfié à 20 K est environ 71 kg/m^3 (eau liquide $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$).



2. Parce qu'il bout, l'hydrogène liquéfié ne peut être stocké que dans un réservoir ouvert.

3. La liquéfaction de l'hydrogène nécessite environ 14 kWh/kg (à ajouter aux 50 kWh/kg pour le produire par électrolyse)!

STOCKAGE D'HYDROGÈNE: RÉACTION CHIMIQUE

1. L'hydrogène peut être stocké chimiquement dans un métal à basse température et libéré à haute température.



2. La technologie du stockage dans les hydrides (MgH_2 , $FeTiH_2$, etc.) ou les nano tubes de carbone est en développement...

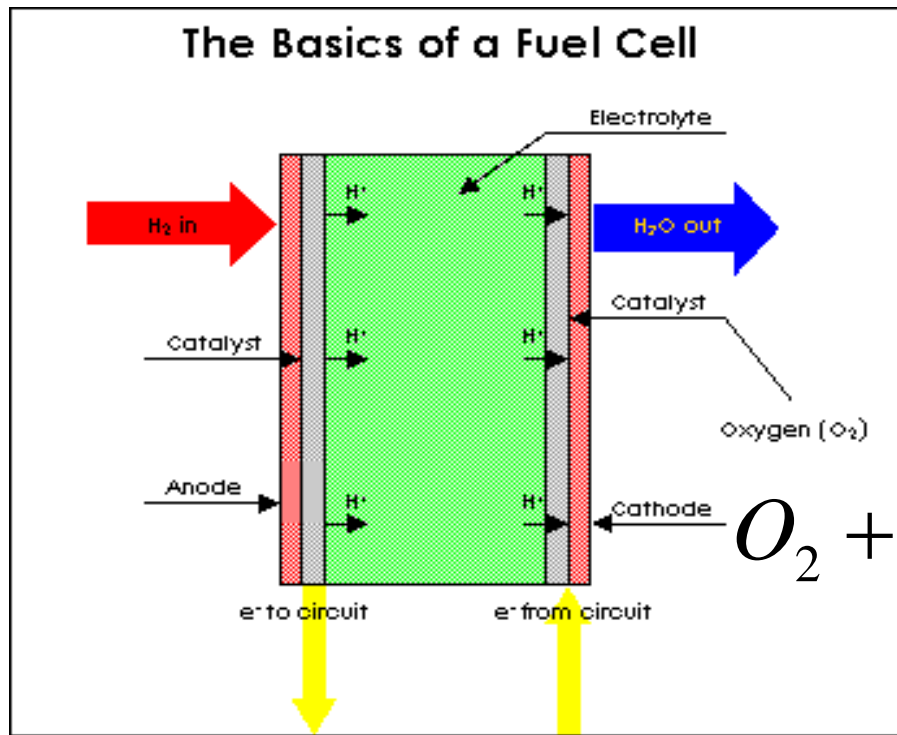
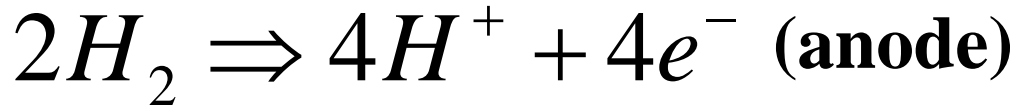
DISTRIBUTION D'HYDROGÈNE

- 1. L'infrastructure pour le transport et la distribution d'hydrogène à grande échelle reste à développer ...**

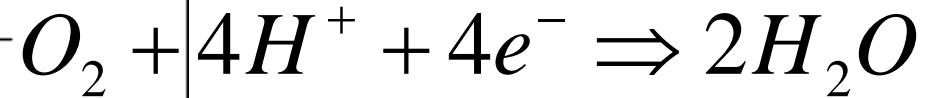
PILE À COMBUSTIBLE: HYDROGÈNE

- 1. Intérêt: conversion directe de l'énergie chimique stockée dans l'hydrogène en électricité.**
- 2. Invention par William Grove en 1839.**
- 3. Renaissance dans les années 1950 pour les missions spatiales.**

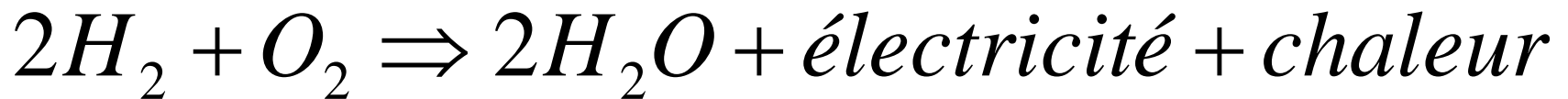
PILE À COMBUSTIBLE: PRINCIPE



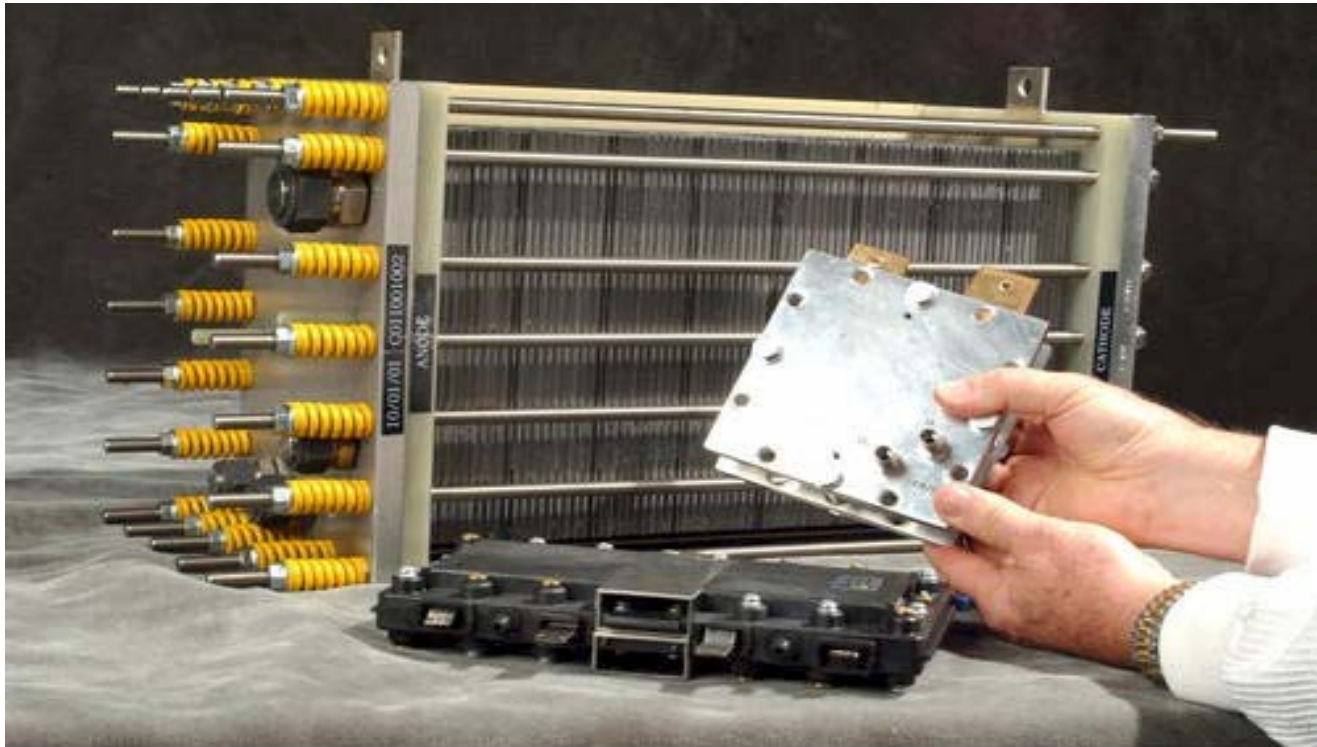
(cathode)



(résultat net)



PILE À COMBUSTIBLE: EXEMPLE



Courtesy of The National Renewable Energy Laboratory (NREL)

PILE À COMBUSTIBLE: CONCURRENCE DU MÉTHANOL

