

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

www.cea.fr

Le futur de l'hydrogène dans le paysage énergétique français

L'élément chimique, le vecteur
énergétique

Applications

Considérations environnementales et
économiques

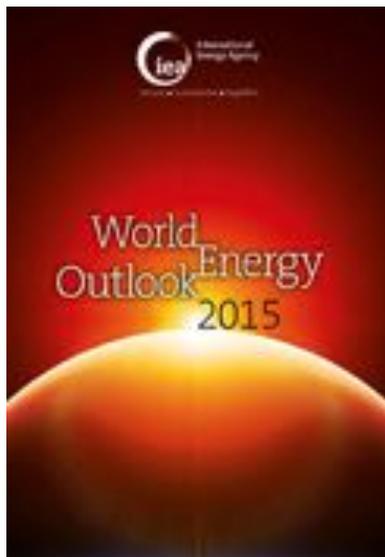
Perspectives

A. Le Duigou

1. **L'hydrogène : *élément chimique* et vecteur énergétique (aujourd'hui !)**
2. **L'hydrogène aujourd'hui : *un paysage complexe – productions et consommations***
3. **L'hydrogène demain : *l'électrolyse et les nouvelles méthodes de production***
4. **L'épineuse question des rendements**
5. **Le stockage et la distribution**
6. **La pile à combustible et les applications mobiles et stationnaires**
7. **Autres utilisations de l'hydrogène, et stockage de l'énergie**
8. **Les émissions de GES**
9. **Les aspects économiques**
10. *Les scénarios et les initiatives*
11. *La sûreté*

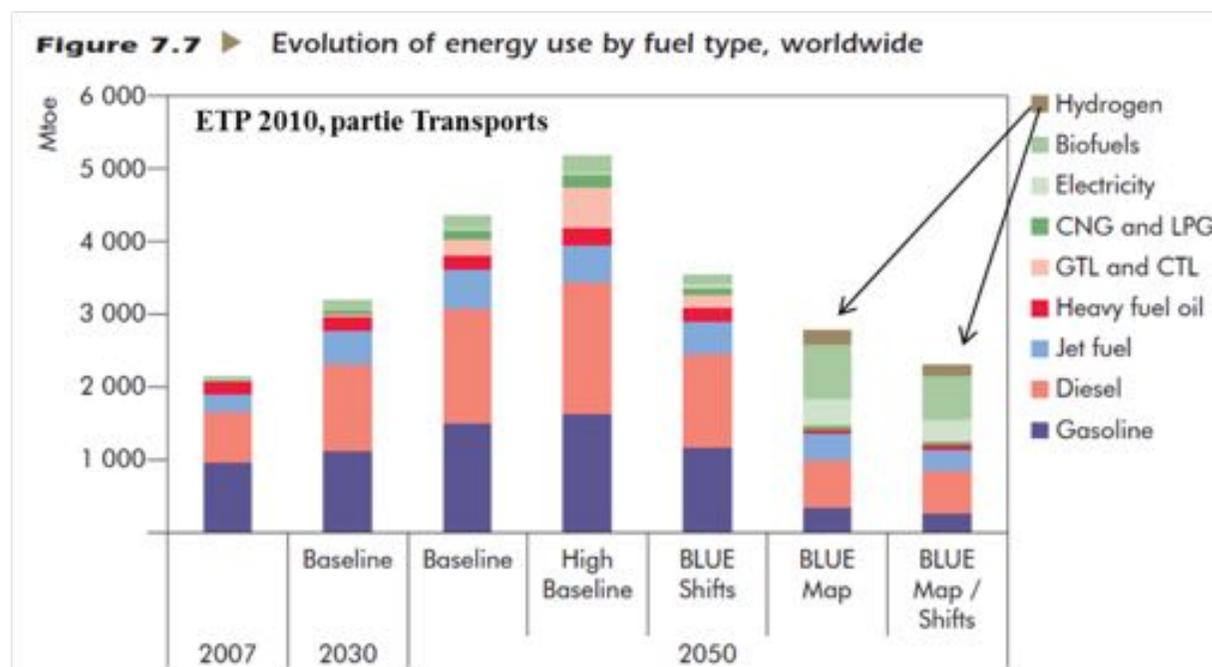
Un bref tour d'horizon énergétique

Cas particulier du secteur des transports



WEO : long-term projections of energy demand and supply, related carbon-dioxide (CO₂) emissions and investment requirements to generate the projections, sector-by-sector and region-by-region.

... un rôle discret de l'hydrogène



ETP 2015 examines the future fuel and technology options available for electricity generation and for the key end-use sectors of industry, buildings and transport. For the first time, this edition includes an analysis of OECD Europe, the United States, China and India.

L'hydrogène

*Elément chimique et vecteur énergétique
Aujourd'hui !*



H. Cavendish

1766

Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse (*expérience de Paracelse : réaction acide sulfurique sur poudre de fer*) qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau : l'hydrogène.

1781

Appelé jusqu'alors "gaz inflammable", "l'hydrogène" doit son nom au chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier, qui effectue la synthèse de l'eau.



1804

Le Français Louis-Joseph Gay-Lussac et l'Allemand Alexander von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène



1839

L'Anglais William R. Grove découvre le principe de la **pile à combustible** : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau.



1960

À partir de cette date, la NASA utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules *Apollo et Gemini*).



Et bien d'autres applications encore !

cea Hydrogène partout Molécule libre nulle part

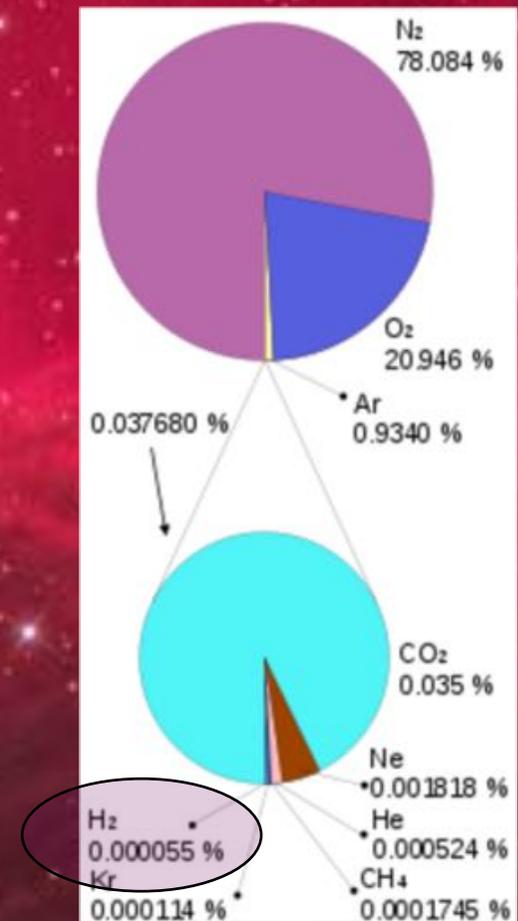
L'hydrogène est l'élément chimique le plus répandu..... dans l'Univers ! (75% en masse)

symbole de l'élément	Nom de l'élément	Z	% atomique dans la croûte terrestre	% atomique dans le globe terrestre	% atomique dans le Soleil	% atomique dans l'univers
H	hydrogène	1	0,22%	0,20%	93,87%	92,7%
He	hélium	2			6,0%	7,18%
C	carbone	6	0,19%	0,02%	0,007%	0,008%
N	azote	7			0,004%	0,015%
O	oxygène	8	47%	48,8%	0,06%	0,057%
Ne	néon	10			0,04%	0,022%
Mg	magnésium	12	2,2%	16,5%	0,005%	0,002%
Al	aluminium	13	8,0%	1,6%		
Si	silicium	14	28%	13,8%	0,005%	0,0023%
S	soufre	16		3,7%	0,001%	0,001%
Fe	fer	26	4,5%	14,3%	0,003%	0,0014%

MAIS : sous forme moléculaire H₂ , le dihydrogène n'existe pratiquement pas sur terre

Il va donc falloir le **PRODUIRE**

Composition de l'atmosphère terrestre



Voir enfin l'hydrogène

« Mon hydrogène en 180 secondes »

Trois minutes après le big bang : la formation des premiers noyaux d'atomes légers s'enclenche. C'est ce que l'on nomme la « nucléosynthèse » primordiale de l'Univers. Elle aboutit à la formation des éléments chimiques les plus simples. Jusqu'alors, seuls les protons de l'hydrogène avaient régné. Peu à peu vont naître l'hydrogène lourd ou deutérium et, un quart d'heure plus tard, l'hélium... La température vaut moins d'un milliard de degrés. Toute la matière visible du cosmos remonte à cette époque.

Pour mémoire

propriétés	valeur numérique
masse atomique	1,0079
constante du gaz	4 124,5 J/kg K
PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur)	33,33 kWh/kg / 3 kWh/Nm ³ [essence : = 12 kWh/kg, 8,8 kWh/l] [gaz naturel : 10,6 - 13,1 kWh/kg, 8,8 - 10,4 kWh/Nm ³] L'énergie contenue dans 1 Nm ³ d'hydrogène est équivalente à 0,34 litre d'essence, 1 kg d'hydrogène est équivalent à 2,75 kg d'essence 10 800 kJ/Nm ³
PCS (inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	39,41 kWh/kg / 3,55 kWh/Nm ³ 12 770 kJ/Nm ³
densité gazeuse à 273 K	0,0899 kg/Nm ³ [gaz naturel : 0,6512 kg/Nm ³]
chaleur spécifique (Cp à 273 K)	14 199 J/kg/K
température d'ébullition (à 1013 mbars)	20,268 K

..... et vous y référer si besoin

Fuel	Higher Heating Value (at 25 °C and 1 atm)	Lower Heating Value (at 25 °C and 1 atm)
Hydrogen	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Methane	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propane	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasoline	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Methanol	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

Sur Terre, il faut PRODUIRE l'hydrogène ...

... L'hydrogène est un **VECTEUR ENERGETIQUE**

Energies primaires / MIX énergétique

Carburants
fossiles



Gaz
naturel



Charbon



Biomasse



Éolien



Hydraulique



Solaire



Nucléaire



+ centrales pétrole, gaz, géothermie, marée, ..

Transformations

Energies utilisées / « **vecteurs énergétiques** »

Pétrole



Gaz
naturel



Charbon



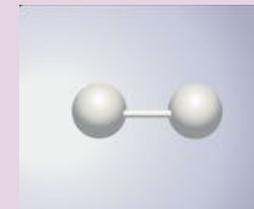
Biocarburants



Électricité



Hydrogène





Poids moléculaire	2 g/mol
Point d'ébullition	20.3 K (-253°C)
Point de fusion	14 K (-259°C)
Densité liquide (20 K)	70 kg/m ³
Densité gazeuse (273 K)	90 g/m ³
Energie de liquéfaction	14 MJ/kg



À la fin du XIX^e siècle : l'hydrogène était un combustible « incontournable », employé dans les lampes afin de fournir de l'éclairage et également dans le « gaz de ville », où il était mélangé à de l'oxyde de carbone

Dès 1815 : gaz destiné à l'éclairage urbain fabriqué à partir de distillation de la houille : H_2 : 48 % - CH_4 : 36 % - CO : 8 % - CO_2 : 5 %

Au cours du XX^e siècle : disparition progressive de son utilisation « énergétique », avec l'apparition du gaz naturel et surtout du pétrole (excepté dans le domaine de la propulsion des fusées)



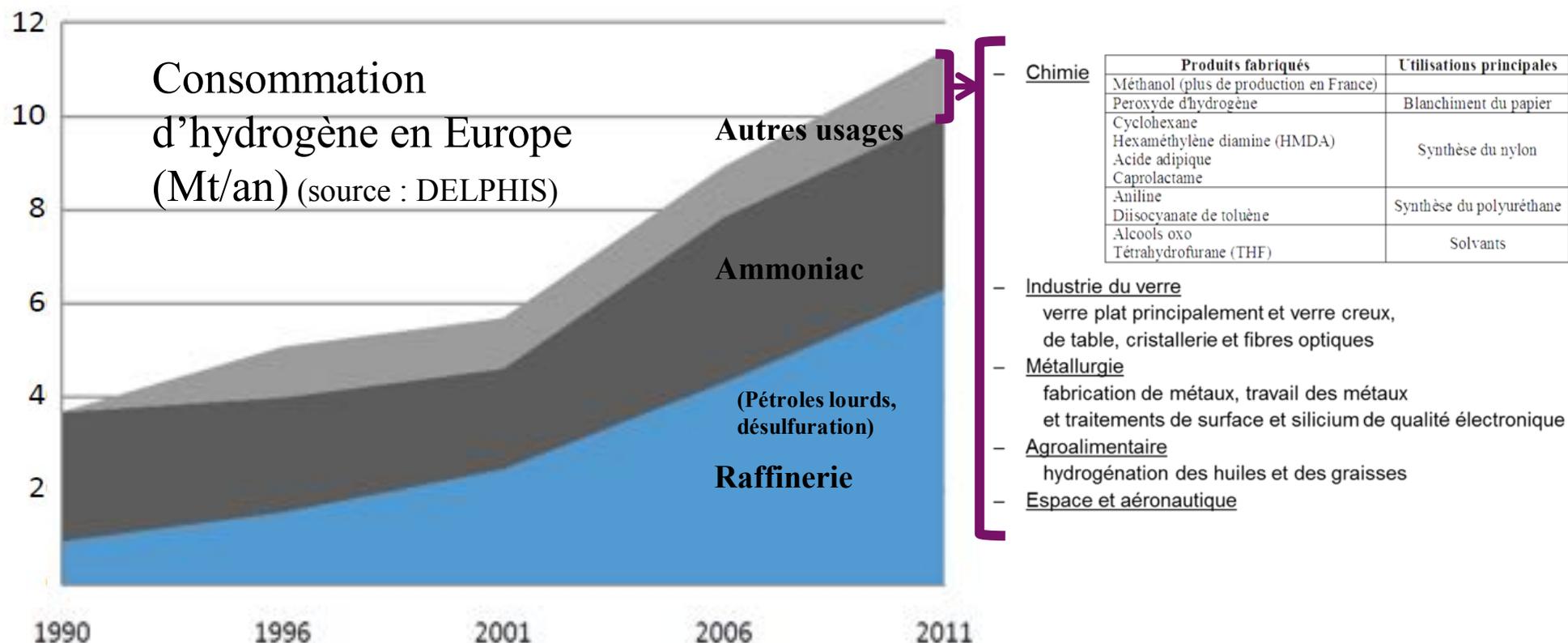
L'hydrogène aujourd'hui: un paysage industriel complexe

L'Hydrogène : déjà une réalité industrielle

2006 : Production mondiale Hydrogène 630 Milliards Nm³ (ALPHEA), soit 59 Mt, soit 160 MTep, soit ~ 2 % (PCI) de la consommation finale d'énergie

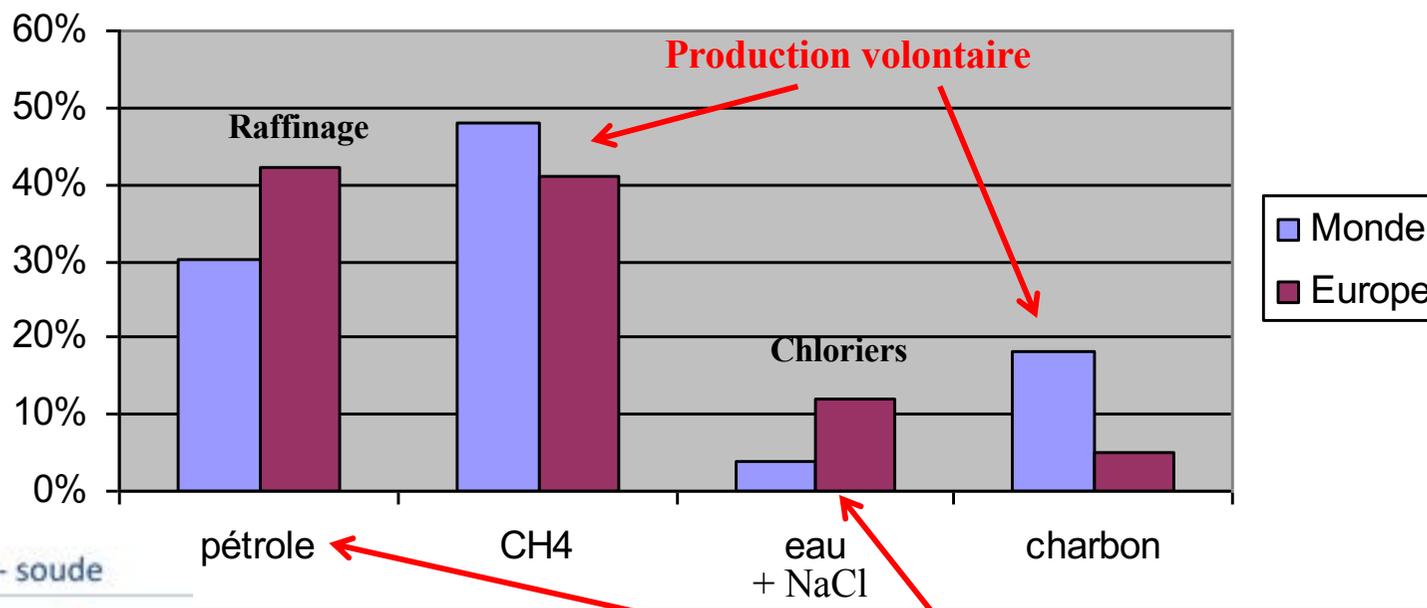
(Mémento de l'Energie 2008)

Environ la moitié de l'hydrogène est aujourd'hui volontairement produit, à 95% à partir d'énergies fossiles (gaz, charbon)



En Europe et dans le monde

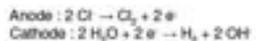
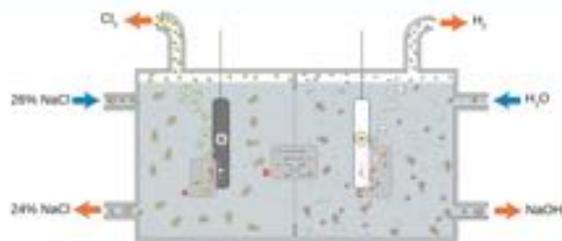
Répartition des matières premières utilisées pour la production en 2006 (Delphis et Alpeha)



Production volontaire

Production involontaire
H2 Coproduit

Electrolyse chlore- soude



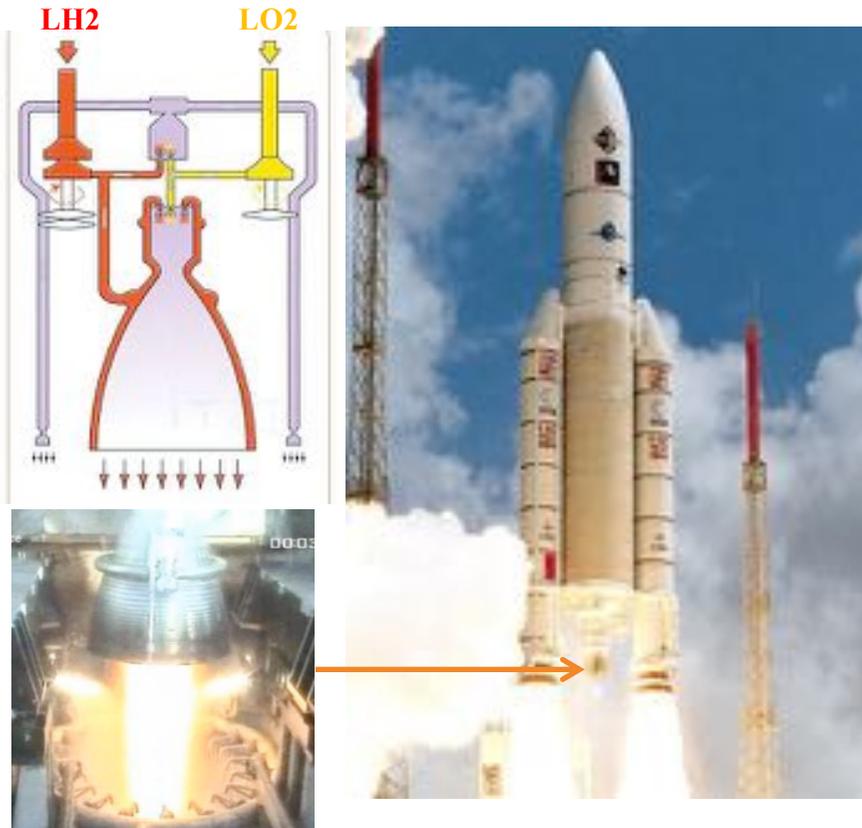
L'étude précise du cas « France » a montré que les précédentes études:

- N'étaient pas cohérentes en termes de définition des produits (captif, coproduit, marchand)
- Oubliaient fréquemment un secteur (en particulier l'hydrogène coproduit par la métallurgie)
 - Et donc sous-estimaient généralement les quantités totales (en France: 920 000 t/an en 2008 vs. 630 000 t/an en 2006)

On s'achemine donc plutôt vers une quantité totale d'hydrogène de l'ordre de 100 Mt/an dans le monde (env. 1 Mt/an en France)

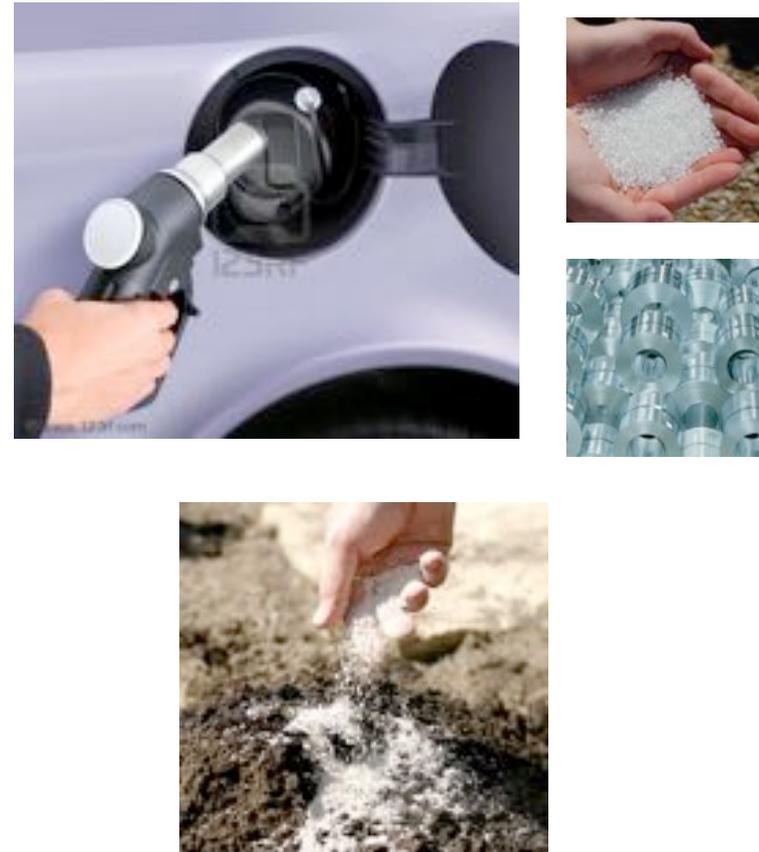
Et l'hydrogène énergétique dont on nous parle représente 1% de l'utilisation aujourd'hui

L'hydrogène que vous voyez ...



... vous ne l'utilisez pas

L'hydrogène que vous utilisez



.... vous ne le voyez pas

En très bref

*Un bilan hydrogène **national** de l'ordre du **million de tonnes par an** aujourd'hui, toutes origines confondues (environ 50% coproduit)*

*Un bilan hydrogène **mondial** qui devrait bientôt atteindre **100 million de tonnes par an**, toutes origines confondues (raffinage et engrais en captent plus de 80%)*

Un vecteur énergétique qui n'apparaît encore que très (trop) timidement dans les scénarios internationaux

Un élément isolé de longue date, aujourd'hui manipulé par les industriels, aux applications technologiques connues, déjà utilisé par le public

Un élément aux propriétés énergétiques remarquables Tout du moins en masse

Des bilans difficiles à établir, une grande part étant « co-produite » et pas forcément utilisable directement

*En gros, pour vivre « à l'occidentale », un « bilan » hydrogène d'environ **15 kg/an/personne** (France, Europe, Monde)*

*Un besoin hydrogène d'environ **1 kg / 100 km** pour un véhicule léger moyen (à 100 km/h)*

L'hydrogène aujourd'hui

Les techniques de production

Production « volontaire » actuelle

Le vaporeformage ou reformage à la vapeur d'eau (Steam Reforming) du gaz naturel

*Un procédé en 3 étapes : production d'un « gaz de synthèse » $CO + H_2$,
réaction « gaz à l'eau » (production d' H_2 à partir de CO), purification*

Production d'un « gaz de synthèse »



($\Delta H = 206$ kJ/mole)

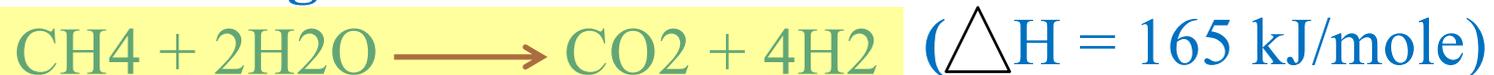
Procédé endothermique, P 20 à 30 bar



Réaction « gaz à l'eau »



Réaction globale :



Rendement 65 à 80%

*Procédé industriel et mature, mais consommation de ressources fossiles et émissions de GES –
reste le moins cher aujourd'hui, mais fortement dépendant du prix du gaz*

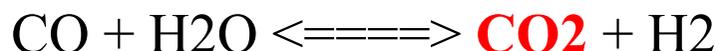
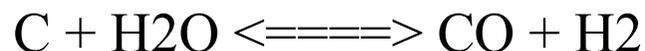
Production « volontaire » actuelle

Le vaporeformage ou reformage à la vapeur d'eau (Steam Reforming) du gaz naturel

Production d'hydrogène d'une unité type	60 000 Nm ³ /h, soit 43 000 t/an
Alimentation	900 GJ/h de gaz naturel désulfuré (1Nm ³ de gaz naturel = ~ 36MJ)
Consommation d'électricité	1 200 kWh en 1 an
Consommation de vapeur	50 tonnes de vapeur/h à 20 à 30 barg
Combustible	110 GJ/h



La gazéification du charbon



Source principale de H₂ avant l'utilisation du gaz naturel

Rendement de procédé plus faible qu'une unité de reformage, émissions de CO₂ plus élevées (+ 50%), coût aujourd'hui double du reformage (AFH₂)

Production « volontaire » actuelle

Le reformage par oxydation partielle

*S'applique au gaz naturel ainsi qu'aux résidus pétroliers lourds et au charbon.
Résidus : coûts réduits. En général sans catalyseur.*

Formation de « gaz de synthèse »



Procédé exothermique : réaction à 1300°C/50 bars

(CH₄) → 46 % H₂, 46 % CO, 6 % CO₂, 1 % NO_x (+ faible que par vapo-reformage)

(**m** faible on a du charbon; **m** élevé on a du pétrole)

Réaction du gaz avec l'eau



Rendement 50 à 65%

Purification de l'hydrogène

par décarbonatation et adsorption par variations de pressions

Reformage auto-thermique : combinaison de vaporeformage et d'oxydation partielle – pression de 20 à 60 bar, température environ 950°C, catalyseur nickel

Carte mise à jour
régulièrement par l'EHA
(European Hydrogen Association)



<http://www.h2euro.org/latest-news/hydrogen-hits-the-roads/hydrogen-production-facilities-in-europe>

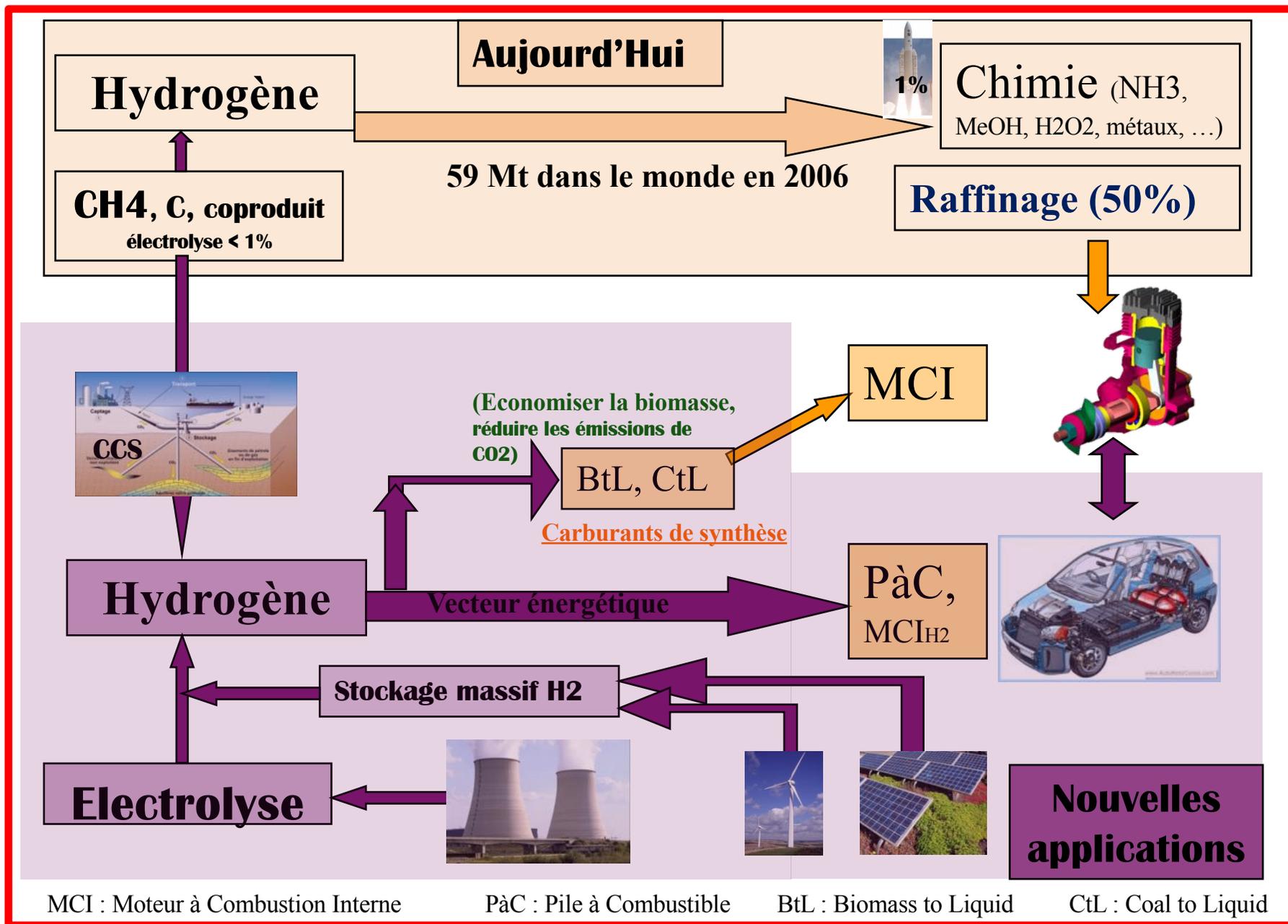
L'hydrogène de demain

**La poursuite de l'utilisation actuelle en tant « qu'élément chimique »
pour l'industrie**

**Mais également : une évolution nécessaire des
techniques de production**

**Et un usage de plus en plus important en tant que
« vecteur énergétique »**

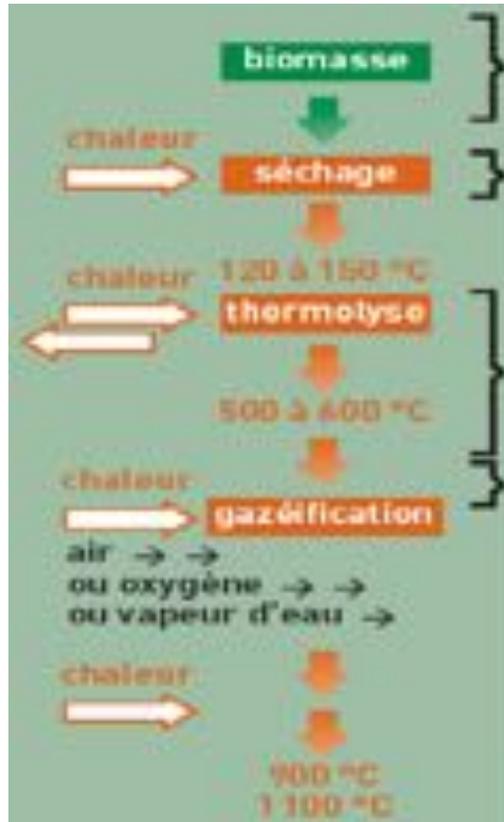
L'hydrogène aujourd'hui et demain



L'hydrogène de demain

Les techniques de production

La production à partir de biomasse (gazéification)



Cellulose
hémicellulose

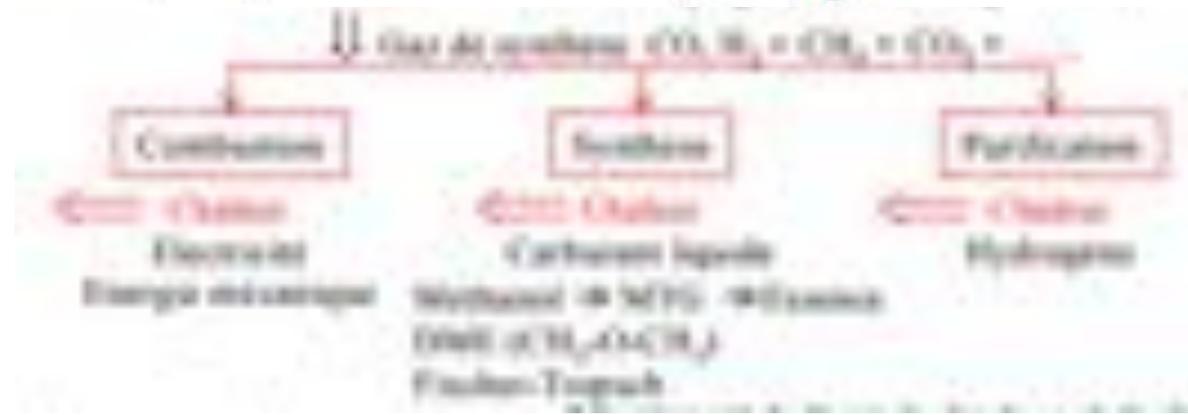
Matière sèche $C_6H_9O_4$

Gaz = $CO-CO_2-CH_4-H_2$
Jus condensables
Goudrons
Charbon de bois

$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
 $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Décomposition thermique à 600°C → formation de charbon de bois

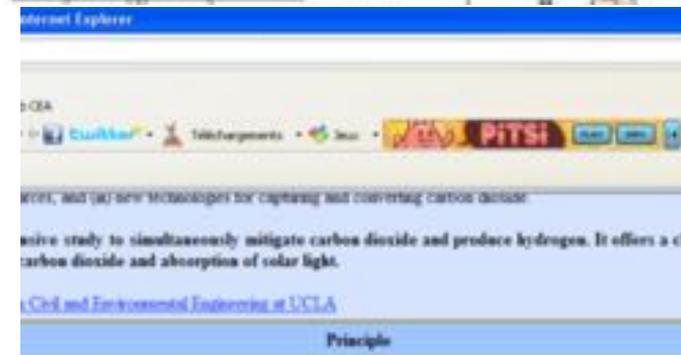
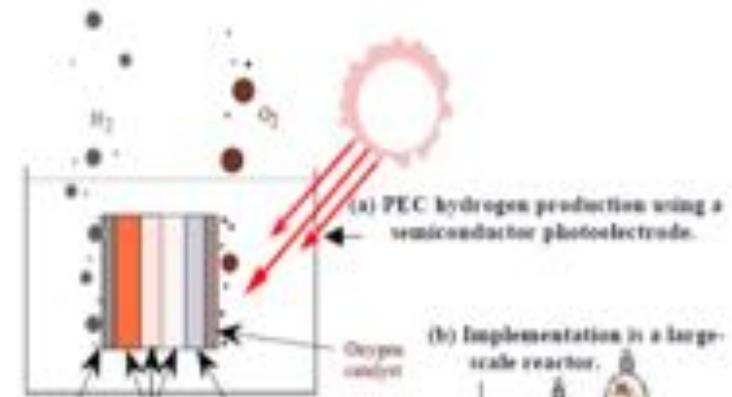
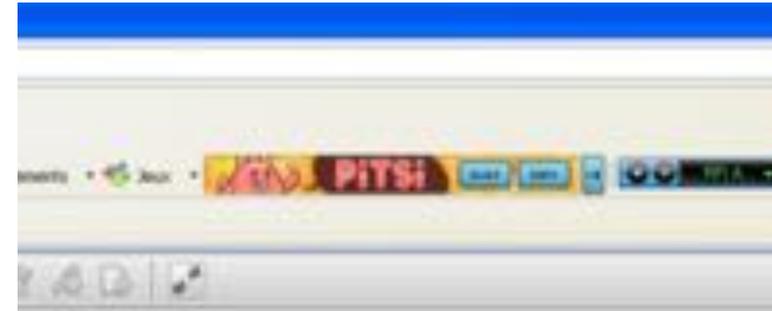
Gazéification à 1000°C par réaction avec la vapeur → Formation de syngaz ($CO + H_2$)



Conversion directe de l'énergie solaire

-la **photo-électrolyse** (ou photo-électrochimie), qui produit de l'hydrogène par éclairage d'un photocatalyseur à semi-conducteur immergé dans un électrolyte aqueux ou dans l'eau / semi-conducteurs à large gap (comme TiO₂ et AsGa) fournissent la tension suffisante pour la décomposition de l'eau mais ils n'absorbent qu'une partie du spectre lumineux et le rendement de conversion reste faible : 10% ... mais direct

la **photo-biologie** (ou bio-photolyse) : production d'hydrogène à partir de la photosynthèse / Certaines cyanobactéries, comme l'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii*, peuvent produire de l'hydrogène en alternant des phases aérobies de constitution de biomasse et des phases anaérobies de production d'hydrogène due à la présence d'hydrogénases (enzymes) à forte activité.



Rendements : 0,5 à 5% H₂
(jusqu'à 24% avec catalyseurs ...)

Et l'électrolyse dans tout cela ?

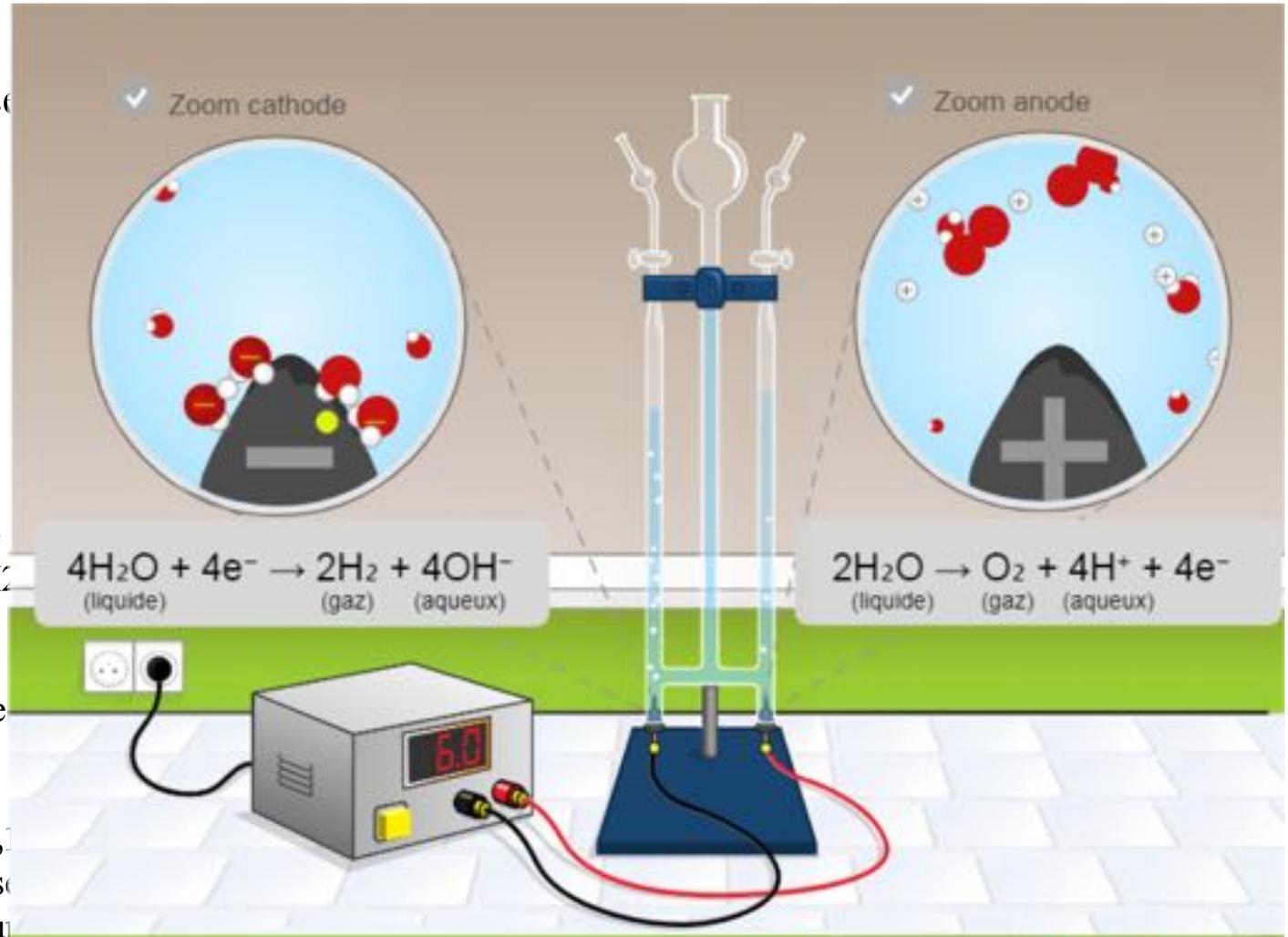
*Une technique d'aujourd'hui
(d'hier !) pour la production de
l'hydrogène de demain*

Production par Electrolyse

Nicholson et Carlisle ont réalisé la première électrolyse de l'eau en 1801

$$\Delta H = [\Delta G + T\Delta S]$$

Solution d'hydroxyde de potassium (KOH), concentrations entre 20% et 30% (conductivité optimale vs. résistance acier à la corrosion), températures entre 70°C et 100°C, pressions de 1 à 30 bar – diaphragme pour éviter la recombinaison O₂ et H₂ généralement en amiante (excellente capacité de séparation des gaz dans l'électrolyte KOH) – qui pourrait être remplacé par le PTFE par exemple. valeurs courantes des potentiels des **cellules industrielles** sont de 1,7 à 2,3 V*, pour des rendements d'électrolyse de 70 à 80 % (cellule – 50 à 70% pour le système) et une consommation électrique (auxiliaires compris) de 4,5 à 5 kWh/Nm³.



$$E = \Delta H / zF = 1,48 \text{ V} \rightarrow \text{tension equivalente totale}$$

La production par électrolyse



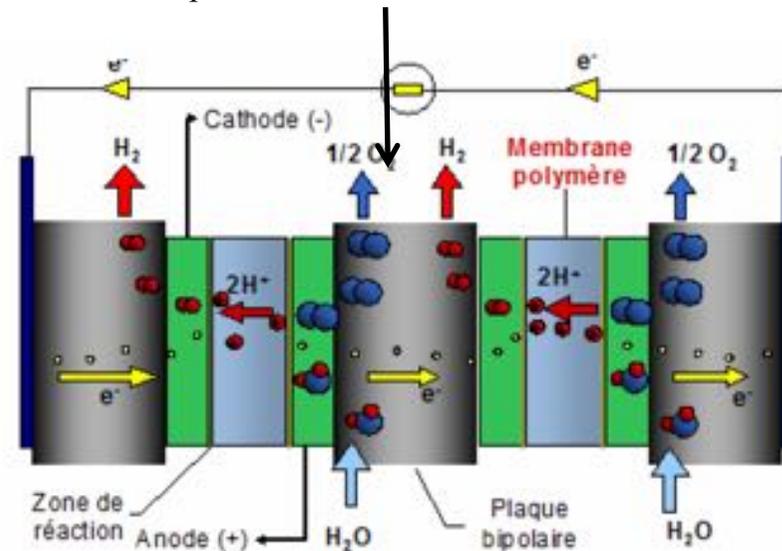
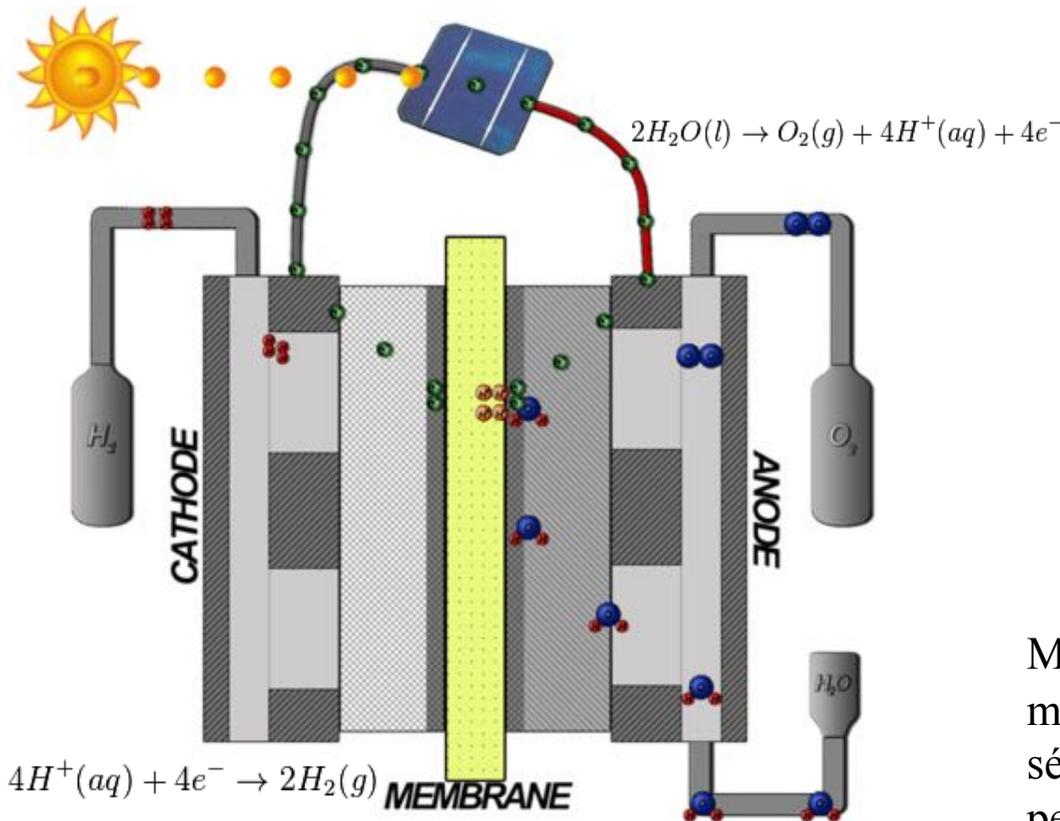
**60 kWh pour
produire 1 kg
d'hydrogène**

Trois unités d'électrolyseur alcalin Enertrag de 2 MW unitaire – 1000 m³/h

La production par électrolyse

L'électrolyse « PEM » Voie « protonique »

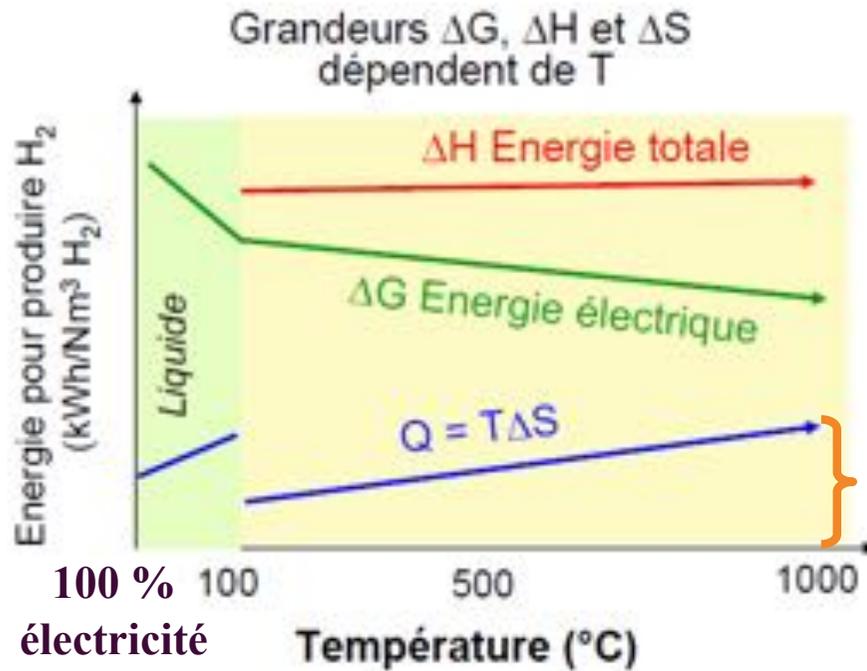
Épaisseur faible env. 200 microns



Existe depuis plusieurs dizaines d'années pour des applications sous-marines (usines à oxygène à bord des sous-marins nucléaires américains et britanniques) et spatiales (pour la génération d'oxygène dans les compartiments vie).

Membranes polymères (bonnes résistance mécanique, stabilité chimique, conductivité H⁺ et séparation des gaz) en acide sulfonique perfluoroalkyle, électrodes avec catalyseurs à base de métaux nobles poreux / **compacité, meilleurs rendements que l'électrolyse alcaline** (3,6 à 4 kWh/m³), moins sensibles à la corrosion mais coûts plus élevés.

La production par électrolyse



L'électrolyse Haute Température



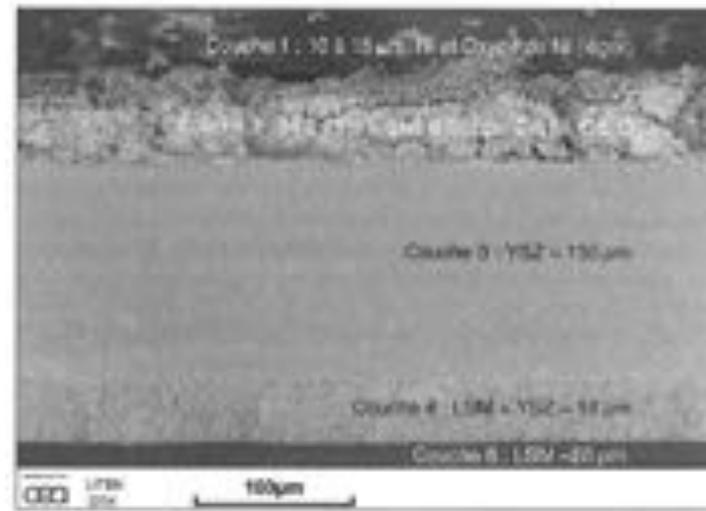
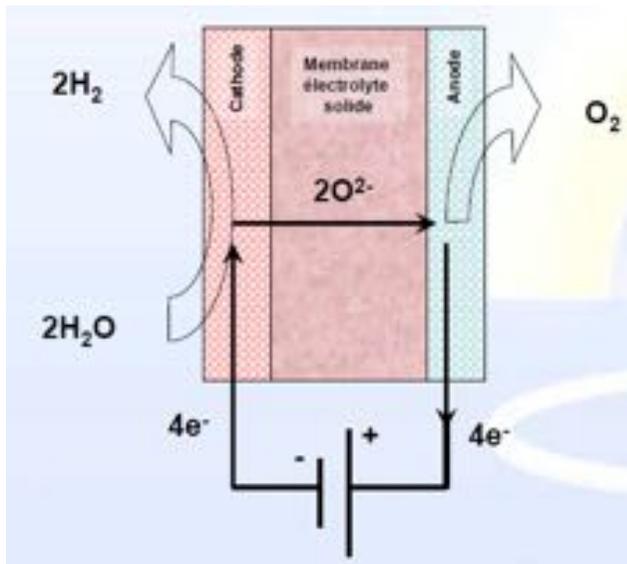
$$\Delta H = [\Delta G + T\Delta S] \text{ Env } 700 \text{ à } 800 \text{ C}$$

Gain en rendement par évitement de transformation de chaleur en électricité

Thermolyse de l'eau



~ 3000 °C 100 % chaleur



Les cycles thermo-chimiques

Plus de 3000 cycles

$\text{CaO} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CaBr}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (500-600°C)	$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (810 °C)
$\text{CaBr}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + 2 \text{HBr}$ (700-750 °C)	$\text{I}_2 + \text{SO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{HI}$
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8 \text{HBr} \rightarrow 3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} + \text{Br}_2$ (200-300 °C)	$2 \text{HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$
$3 \text{FeBr}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{HBr} + \text{H}_2$ (550-650 °C)	
Cycle <u>UT-3</u>	Cycle <u>I-S</u>
$2 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{SO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4 \rightarrow 3 \text{CoSO}_4 + 2 \text{H}_2$ (250 °C)	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$
$3 \text{CoSO}_4 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4 + 3 \text{SO}_2 + \text{O}_2$ (900 °C)	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 \longrightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 1/2\text{O}_2$
Cycle <u>Sulfate</u> (autres oxydes : Mn/Fe/Ni/Zn/Cd) (1 ^{ère} étape : 200-400 °C – 2 ^{ème} étape : 700-1000 °C) (Schulten – US 3995012 – 1976)	Cycles Fer
$\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CeO}_2 + \text{H}_2$ (800 °C)	$\text{Sn} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 2 \text{H}_2$ (400 °C)
$2 \text{CeO}_2 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (1500-1700 °C)	$2 \text{SnO}_2 \rightarrow 2 \text{SnO} + \text{O}_2$ (1700 °C)
Cycle <u>Cérium</u> (DIEC/SCDV - 2001)	$2 \text{SnO} \rightarrow \text{SnO}_2 + \text{Sn}$ (700 °C)
	Cycle <u>Étain</u> (GDF – F 2 135 421 – 1971)

➡ Abaisser la température par l'introduction d'autres espèces

➡ Série de réactions : production d'hydrogène et d'oxygène et restitution des espèces initiales

Des méthodes de production industrielles, qui utilisent les hydrocarbures et principalement le GN (CH₄) et le charbon

À retenir: l'étape intermédiaire dite « syngas » $xCO + yH_2$ est en quelque sorte un « pivot » de la chaîne hydrogène dans le monde de l'énergie

Des recherches de nouvelles méthodes axées sur les hautes températures en utilisant le moins d'électricité possible (cycles, EHT), ainsi que sur des méthodes « passives » (photons solaires, bactéries)

Une électrolyse encore trop peu développée malgré sa simplicité, eu égard à son coût / une recherche active en compacité et réactivité avec la PEM

De nombreux fabricants, start-ups et PME principalement

Une attention qui devra être portée aux matériaux rares

La question des « rendements »

Le stockage et la distribution

L'épineuse question des « rendements »

Le cas de la production d'hydrogène

Which energy is recoverable from hydrogen?

If the energy is brought by burning hydrogen with oxygen and letting the water liquefy at ambient temperature, this provides the **high heating value (HHV) of hydrogen: 286 kJ/mol hydrogen**. It implies that **the initial and the final states of [H₂ + 1/2 O₂] are the same: 1 bar, 25°C**.

You can also arbitrarily suppose that you evacuate water above 150°C and then not recuperate the energy of water vaporisation. This provides you the **low heating value of hydrogen of 236 kJ/mol**.

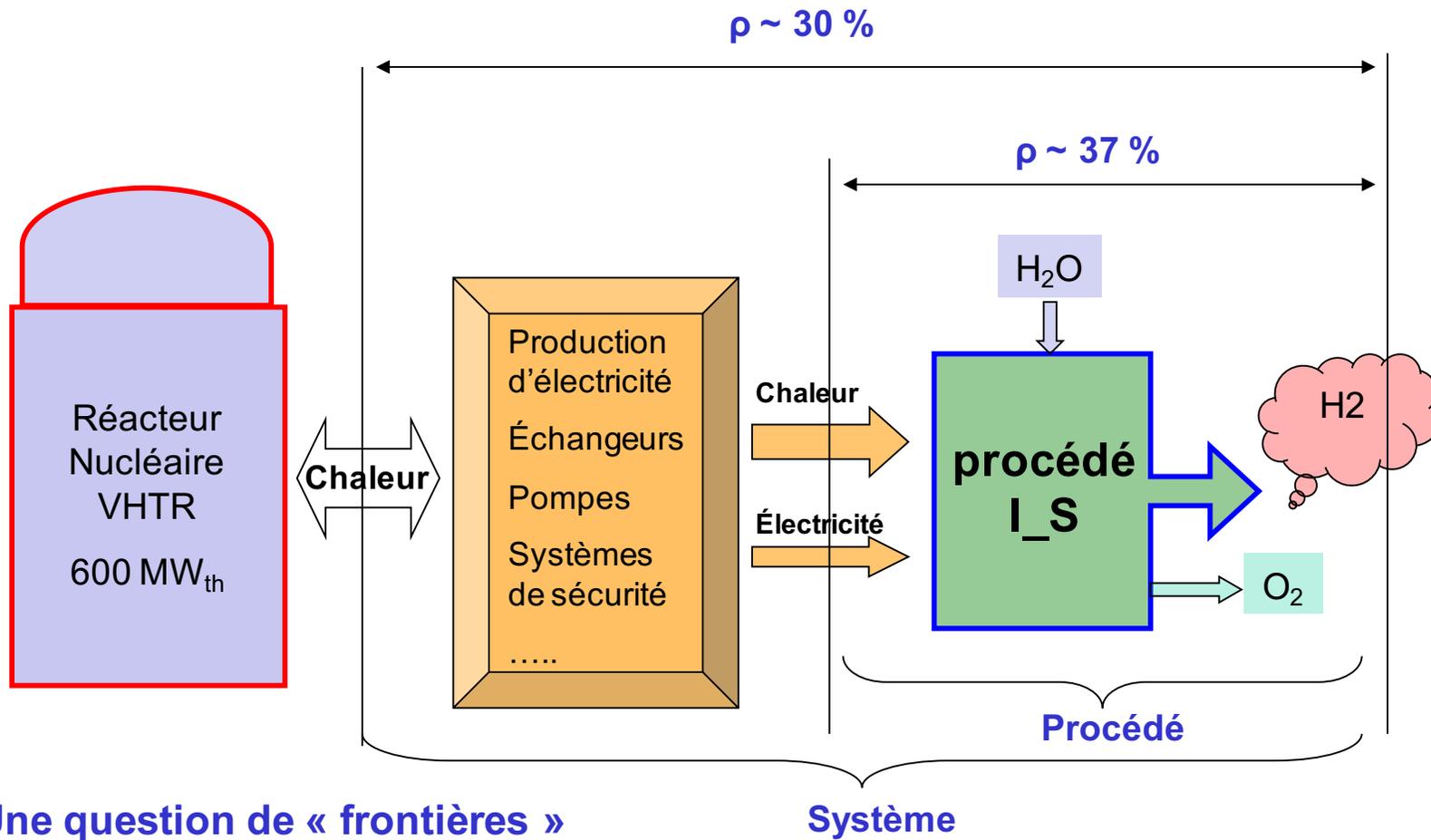
$$\text{Rendement } \eta_T = \text{HHV} / Q_T = \frac{\text{HHV}}{Q + (W / \eta_{el})}$$

Rendement de conversion chaleur - électricité

L'hydrogène est un cas particulier : production de vapeur d'eau lors de l'usage, qu'en faire ?....différence de 20% tout de même !

L'épineuse question des « rendements »

Le cas de la production d'hydrogène par le cycle I/S

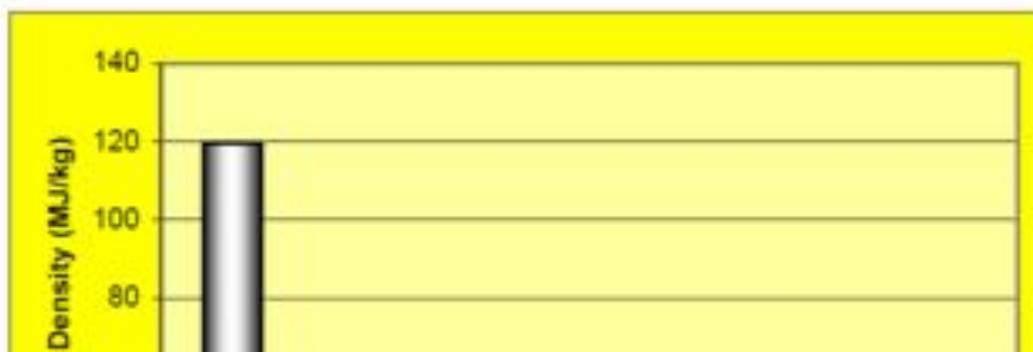


Mais le rendement est-il le seul indicateur ? Voir l'aspect technico-économique

Le stockage d'hydrogène



Bilan massique



Stockages conventionnels

- Gaz comprimé
- Liquide cryogénique

• Sous pression (350 – 700 bars)



• Liquide (- 253°C)

• Solide



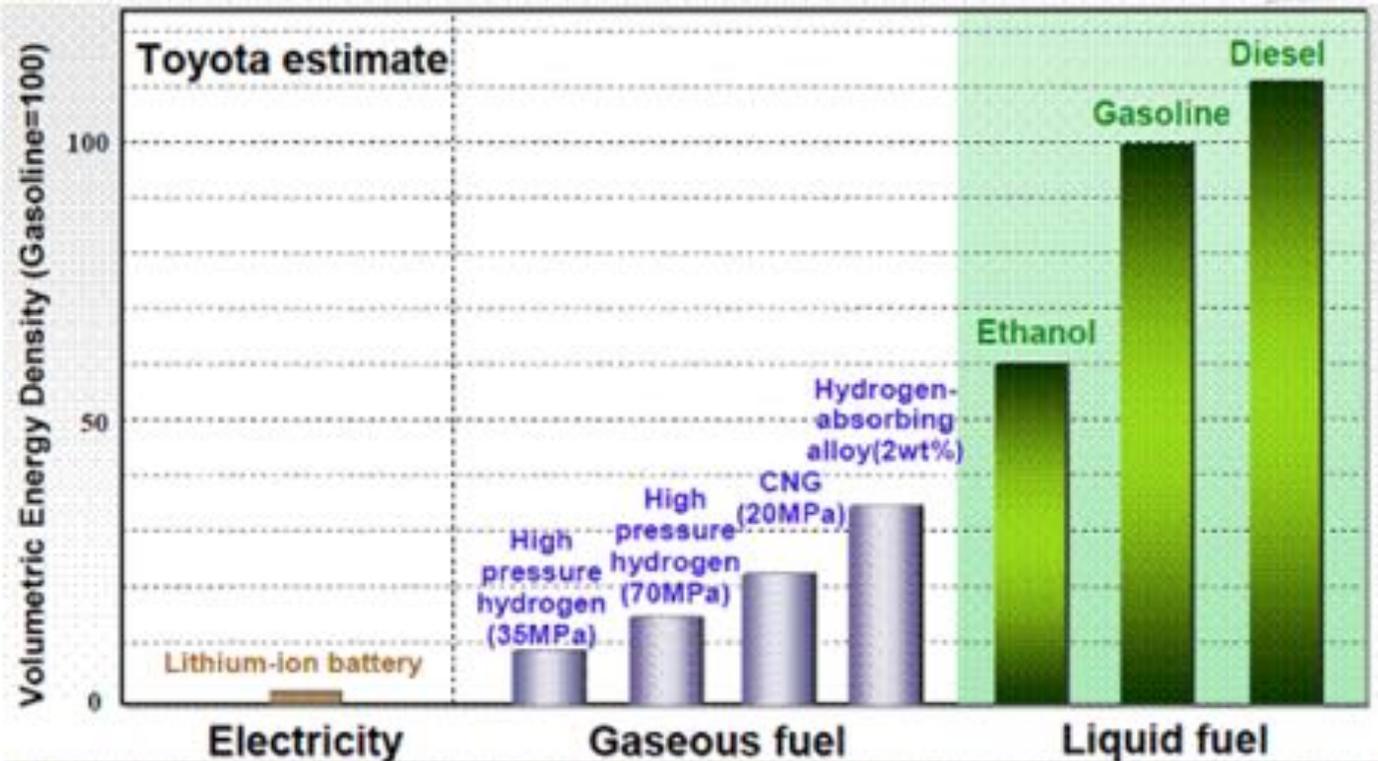
Stockages à l'état solide

- Par **ad**-sorption
 - ✓ Procédé physique (interactions H₂-surface)
- Par **ab**-sorption
 - ✓ Procédé chimique (diffusion des atomes dans le matériau)

.... mais difficile à stocker

Cahier des charges des constructeurs automobiles : stocker environ 5 kg d'H₂ pour une autonomie de 500 km

Volumetric Energy Density of Various Fuels



Hydrogen has lower volumetric energy density than liquid fuels.
Li-ion batteries have even lower energy density.

Stockage gazeux : un comportement qui s'écarte rapidement du GP

17% de l'énergie de H₂ perdue à la compression (à 700 bar) – pertes importantes au-delà de 350 bar



Réservoir d'hydrogène hyperbar (vessie aluminium + composite)

● **But :**

- ✦ Concevoir et qualifier un réservoir hydrogène haute pression à 700 bar.

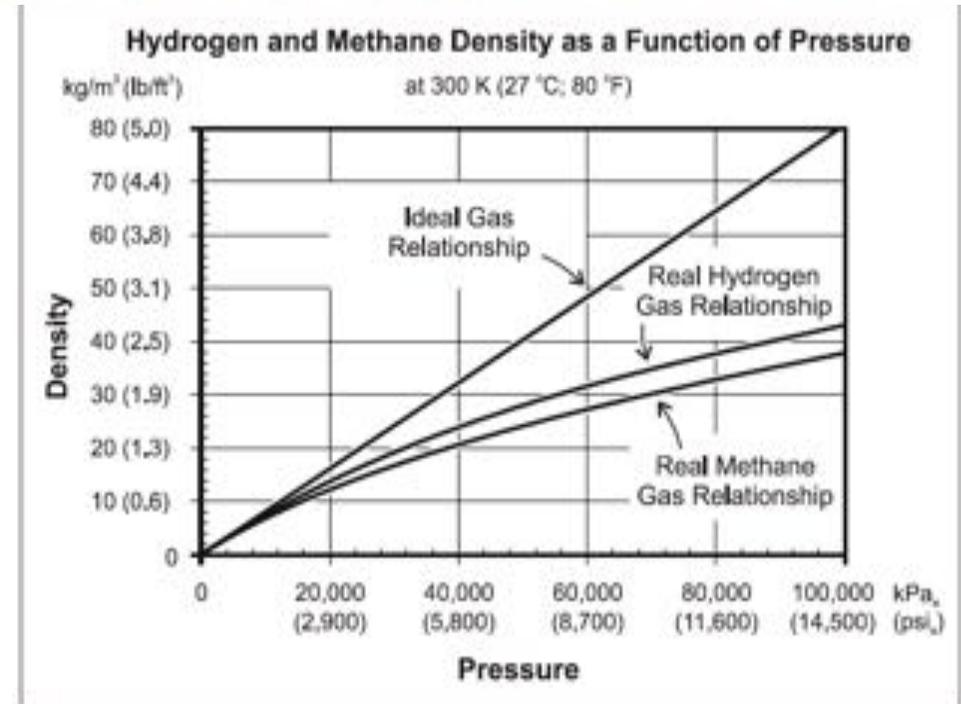
● **Deux solutions technologiques :**

- ✦ Vessie aluminium + bobinage composite,
- ✦ Matériau thermo-plastique simple ou composite + bobinage composite.

● **La qualification :**

- ✦ Analyse de fiabilité – simulation numérique
- ✦ Etude de fragilisation,
- ✦ Test de chute,
- ✦ Test d'éclatement : résistance > 1700 bar,
- ✦ Test de perforation : tir à balles réelles,
- ✦ Crash test.

Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001



De 350 à 700 bar: + 50% H₂ ...



Réservoir d'hydrogène de la Honda FCX Clarity (350 bar)

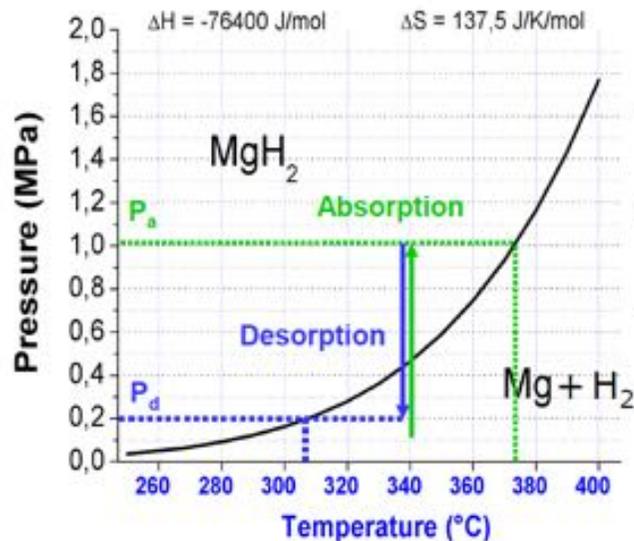
Les stockages liquide et solide

Technologie	Volume	Poids	Wt. % H ₂
35 MPa (350 bar) H ₂ Comprimé	145 L	45 kg	6.7
70 MPa (700 bar) H ₂ Comprimé	100 L	50 kg	6.0
H ₂ Liquide Cryogénique	90 L	40 kg	7.5
Hydruure Metal Basse Temperature	55 L	215 kg	1.4

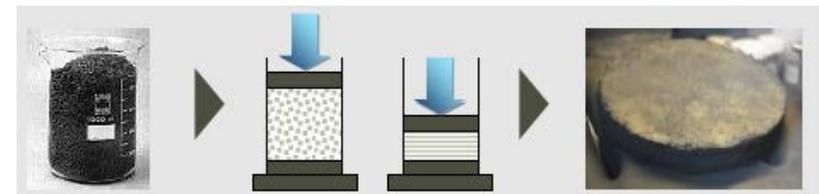


Mais énergie nécessaire à la liquéfaction atteint **le tiers de l'énergie** de H₂ / pertes sensibles (env. 1% par jour)

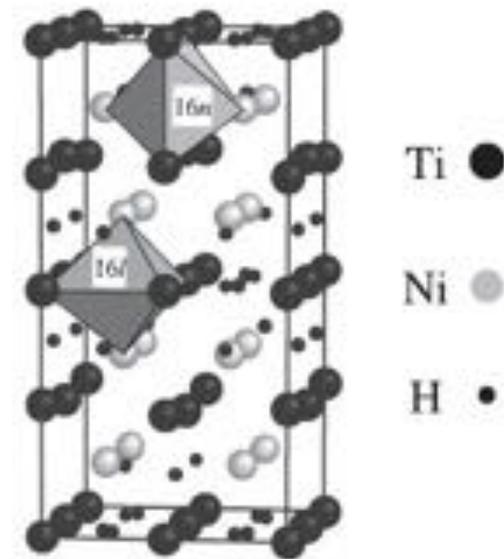
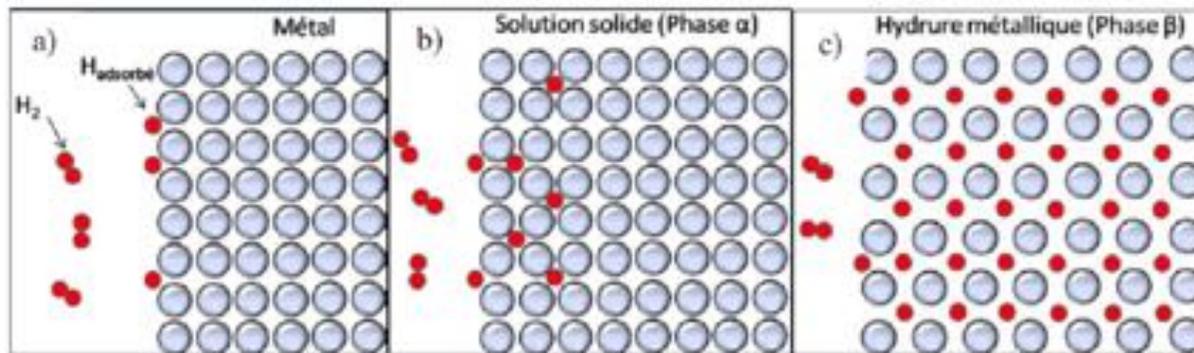
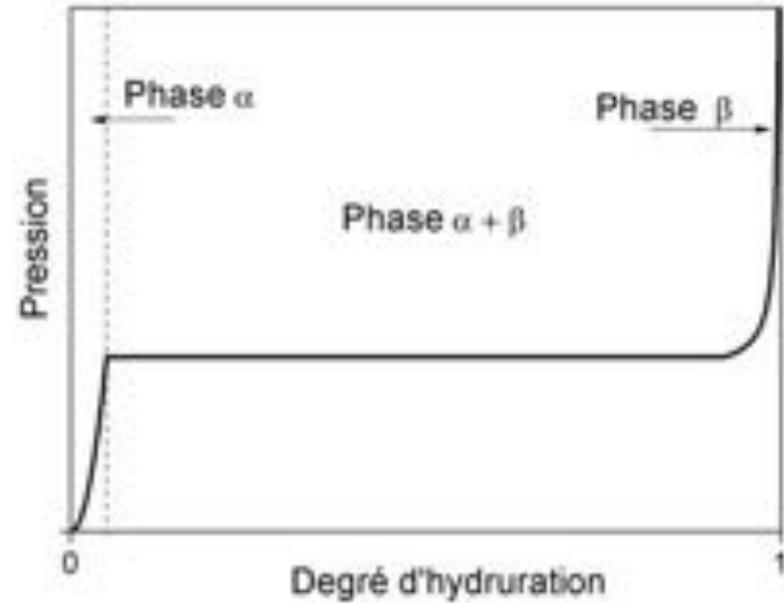
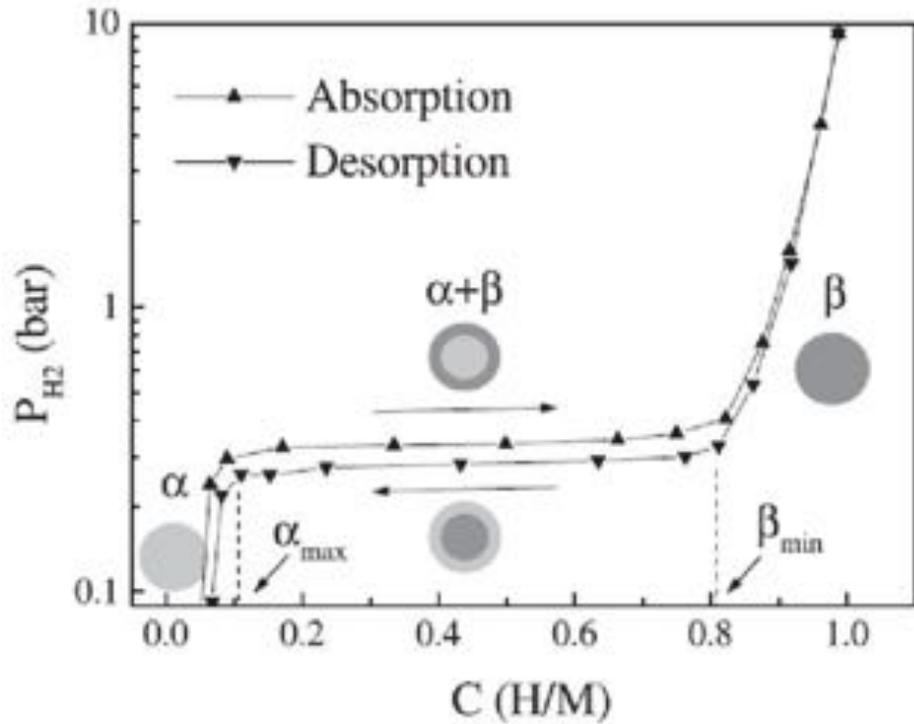
From A. Nedzwecki (Quantum Technologies), US DOE Hydrogen Vision Meeting, November, 2001



- **Reversible storage:**
 $Mg + H_2 \leftrightarrow MgH_2$
- **Loading at electrolysis pressure (10 bar)**
- **Unloading at fuel cell pressure (2 bar)**
- **No compression**
(energy, cost, maintenance)

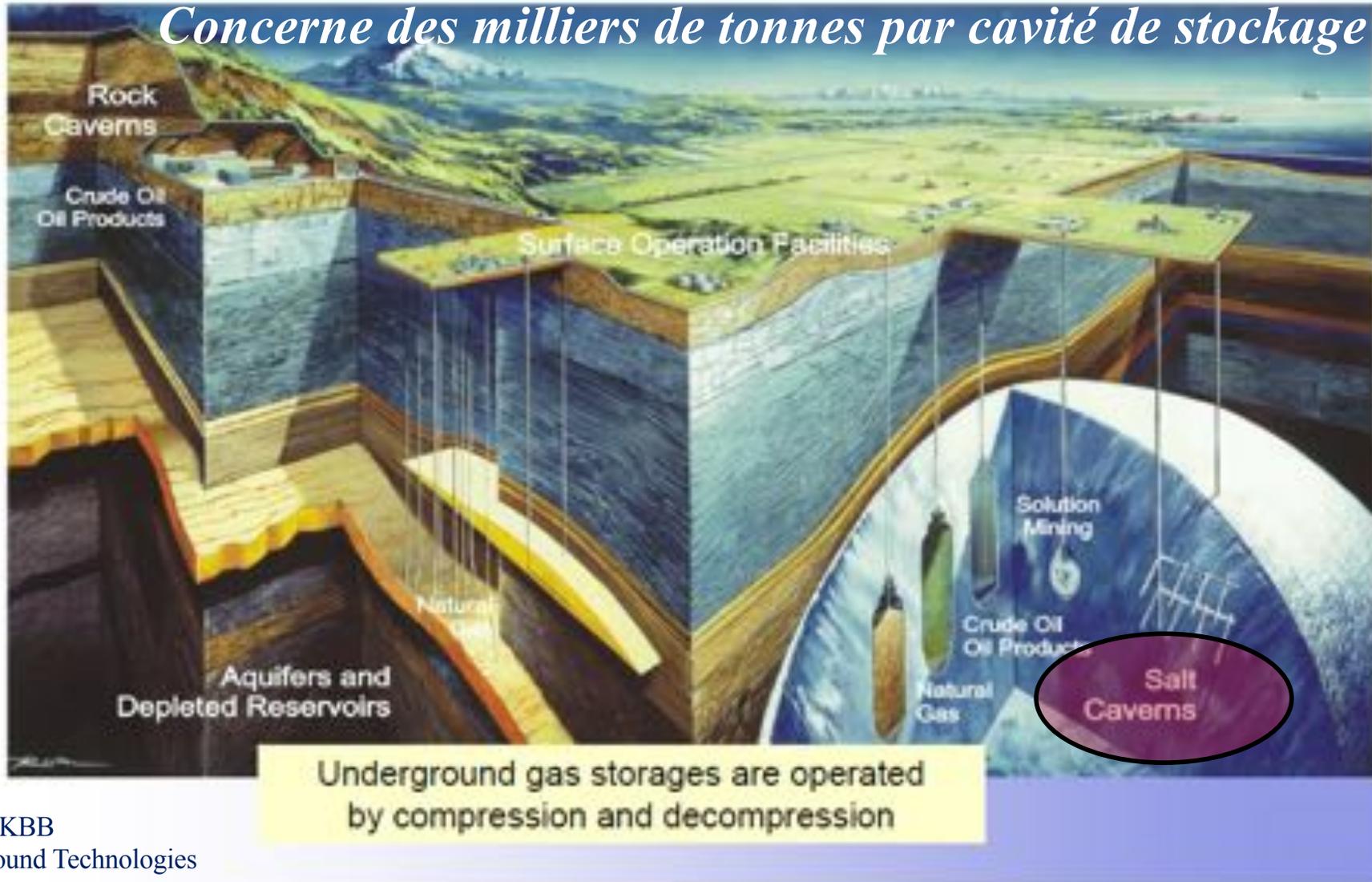


Le stockage sous forme solide



Le stockage « massif »

Concerne des milliers de tonnes par cavité de stockage



Source : KBB
Underground Technologies

Diverses options géologiques pour le stockage souterrain

Le transport et la distribution d'hydrogène

Le transport et la distribution d'hydrogène

Ne concerne que qq % de l'hydrogène produit

Réseaux de distribution : 1500 km en Europe, 900 km aux USA

RÉSEAU DE CANALISATIONS D'AIR LIQUIDE



880 km dont 100 en France / plus, en France :

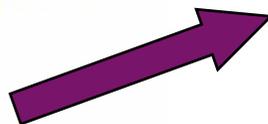
- Un pipeline d'une longueur de 33 km entre Carling et Sarralbe (Est) ;
- Un pipeline d'une longueur de 57 km entre Feyzin et Roussillon (Centre-Est) ;
- Un pipeline d'une longueur de 42 km entre Lavera et Fos-sur-mer (Sud-Est) ;

Soit 230 km environ en France

(comparé aux 30 00 km pipes GN en France)



3400 Nm³ CGH2
300 Kg
200b



Lieu d'utilisation industrielle

Le transport : une question complexe qui fait intervenir le débit, la distance, le mode de transport Aspect « coût » prépondérant / bien réfléchir avant de transporter par pipes (pertes d'énergie supérieures au transport de gaz naturel)

45000 l LH2
3200 Kg
20°K



La distribution d'hydrogène

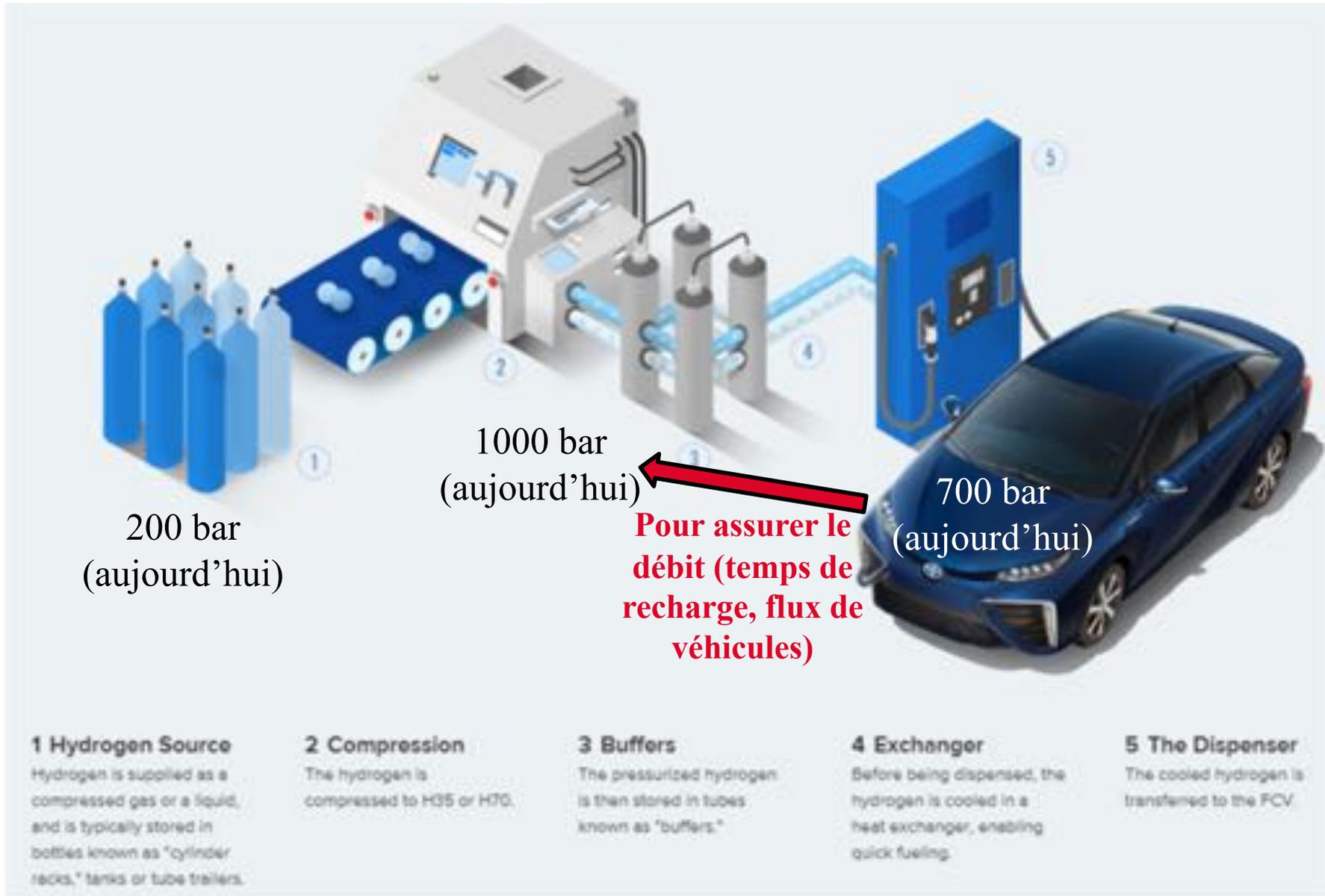


La distribution d'hydrogène



La distribution d'hydrogène

La question du débit



La distribution d'hydrogène

<http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>



Octobre 2018



La distribution d'hydrogène



8000 to 10000 FCEV today in the world (2018)

As of January 2017, the total number of hydrogen **refuelling stations in operation** is **274** including:

- four opened at the beginning of this year,
- 92 new hydrogen refuelling stations worldwide in 2016 (**01.03.2017**)

This is the result of the ninth annual assessment by [H2stations.org](http://www.netinform.net/h2/H2Stations/Default.aspx) .

<http://www.netinform.net/h2/H2Stations/Default.aspx>

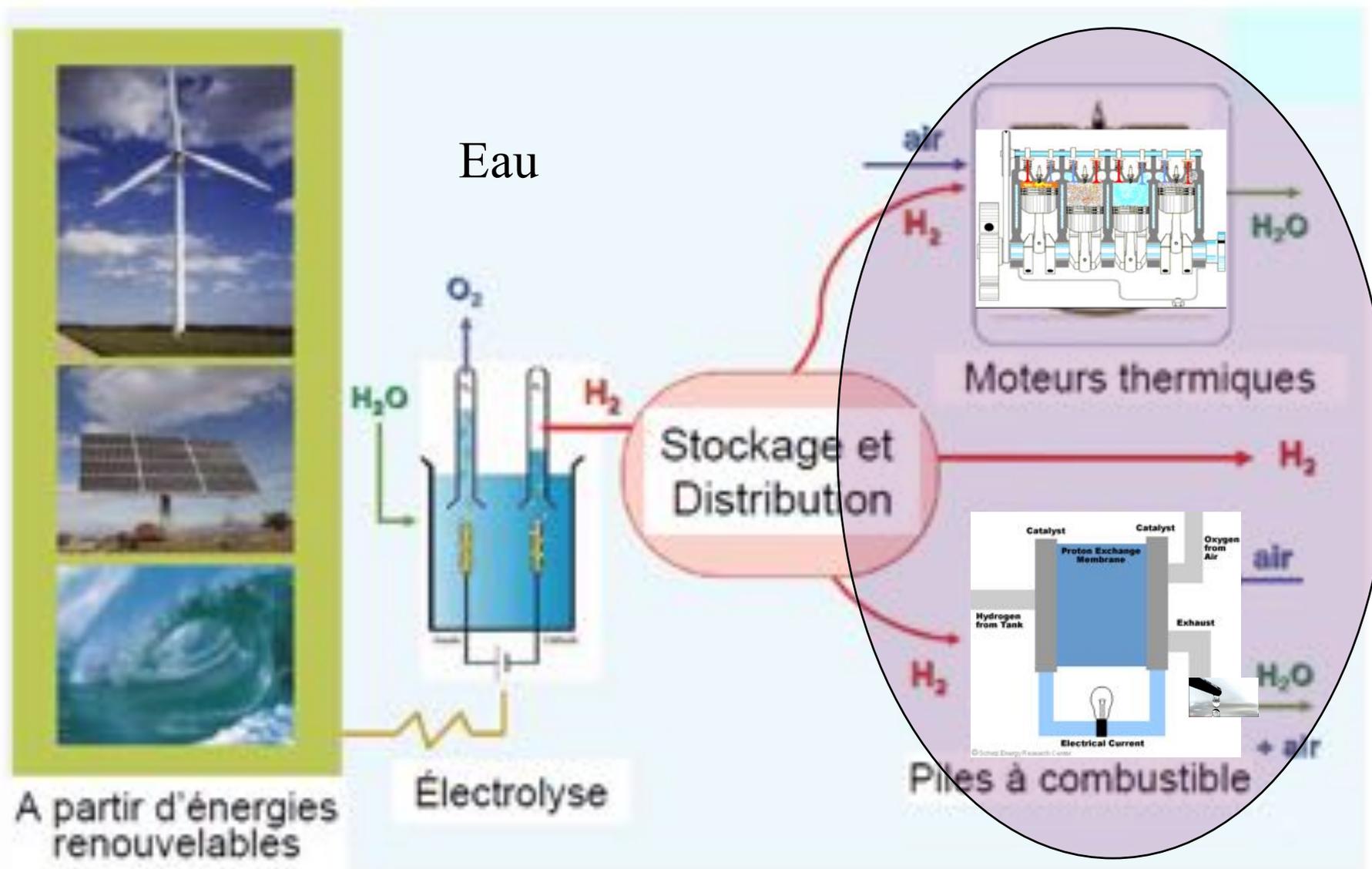
Un réel problème de stockage: consommation d'énergie, volume, usage ultérieur (dynamique stockage / déstockage) – mais une maîtrise technologique assurée

Des solutions techniques très diverses en fonction des usages, et de besoins qui vont de grammes (ou kg) à des milliers de tonnes

Des transports et distributions très bien maîtrisés, même si embryonnaires eu égard à l'usage en tant que vecteur énergétique

La pile à combustible

Reprenons notre « chaîne de l'hydrogène » Intéressons-nous aux applications



Et d'autres applications également

Un peu d'histoire

Christian Friedrich Schönbein (1799 – 1868) : German-Swiss chemist known for **inventing the fuel cell** (1838)



.... génère un courant électrique de façon continue avec des rendements élevés : actuellement supérieur à 40 %, il peut dépasser 50%

..... peut, dans le cas des piles hautes températures, atteindre un rendement total (électrique + thermique) aujourd'hui de l'ordre de 80 % à 90 %

.... admet une grande flexibilité
au niveau du combustible : gaz naturel, biogaz,
hydrogène, alcool...



<http://www.fuelcells.org/base.cgi?template=benefits>

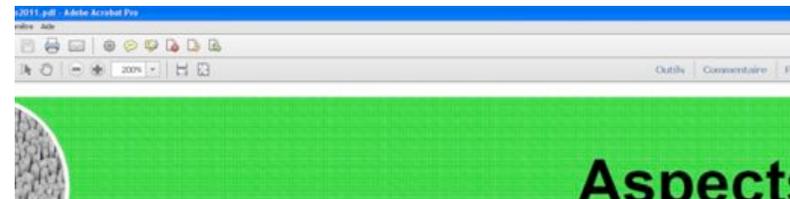
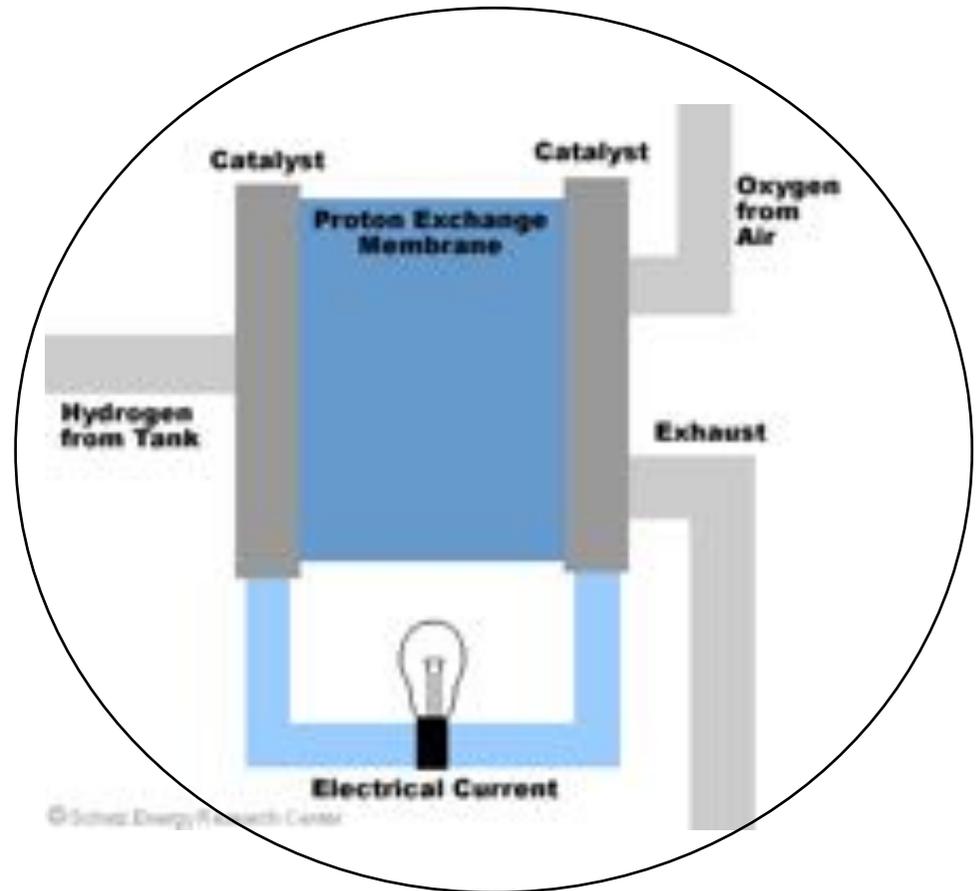
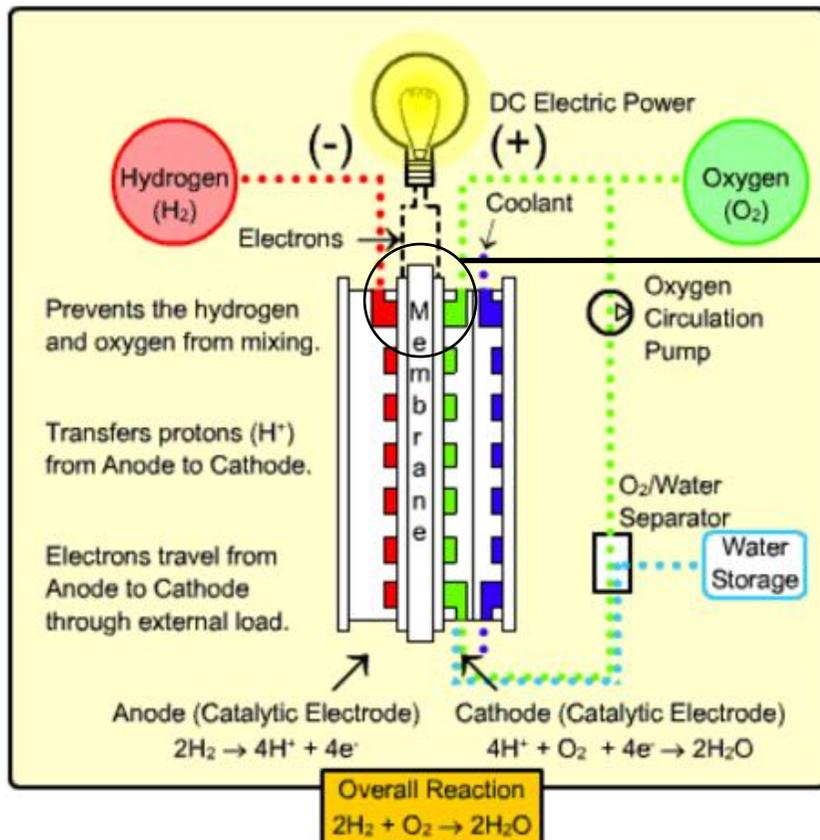
.... ne génère que de la vapeur d'eau, et aucun oxyde de soufre ni particule (quantités infimes de NOx et de CO lorsque l'hydrogène a été produit à partir de gaz naturel)

.... ne génère pas de bruit (bruit faible issu des seuls systèmes auxiliaires - ventilation, circulateurs...) et n'exige qu'une maintenance limitée (pas de pièce en mouvement)

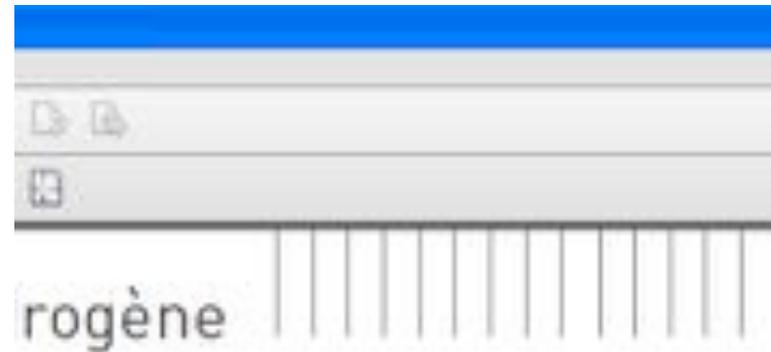
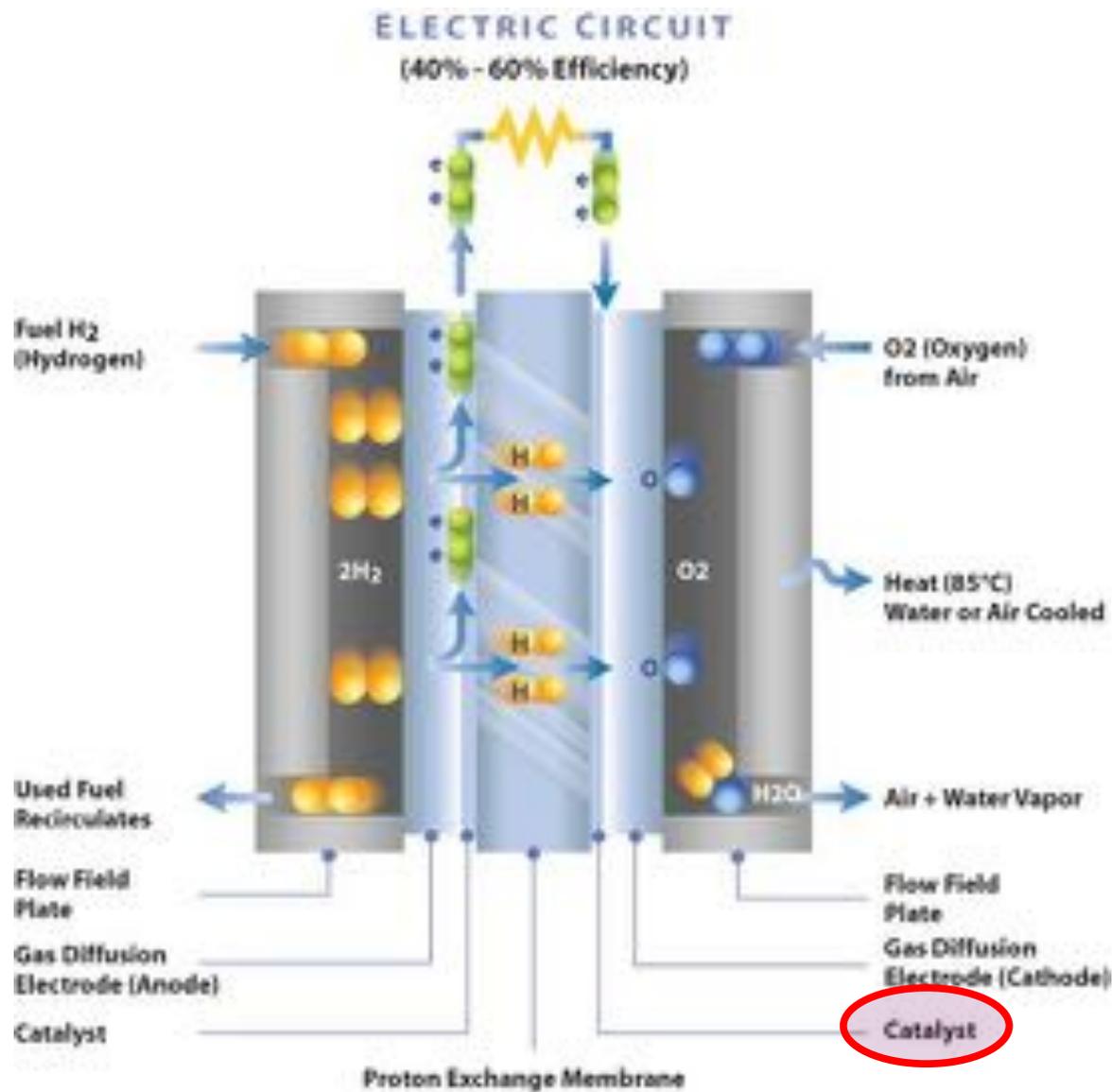
La pile PEMFC

La plus célèbre, la plus courante

Animation (c) 2003 Michigan Technological University.
Investigator: Dr. Gerald Caneba. Animator: Dr. Susan E. Hill.

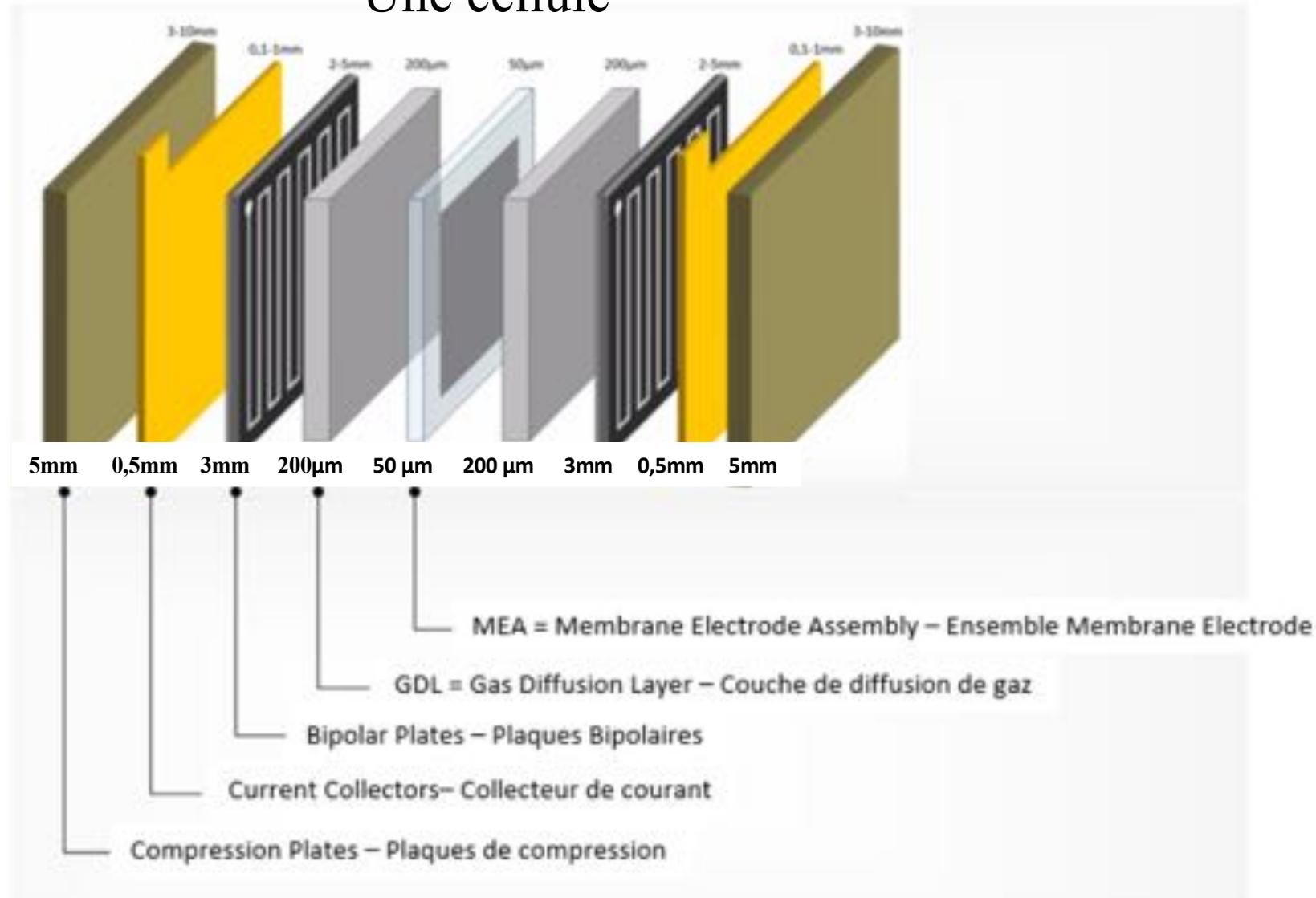


La pile PEMFC



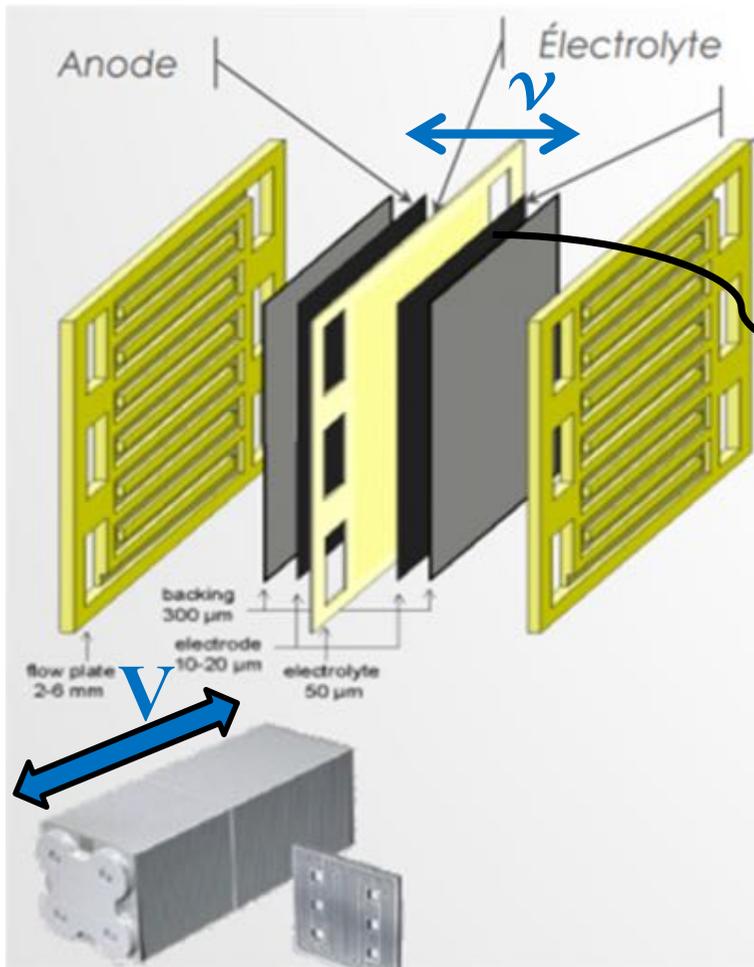
entre 0,5 et 1 A/cm²

Une cellule



La pile PEMFC

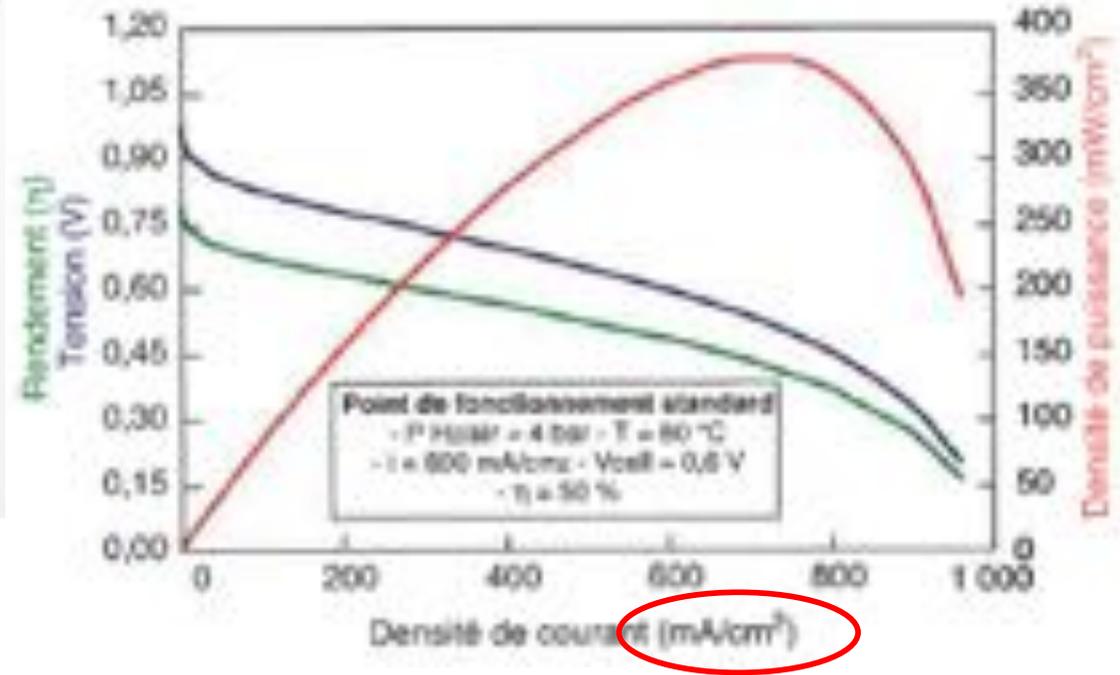
La pile à combustible est le composant « puissance »



$$V = n \times v$$

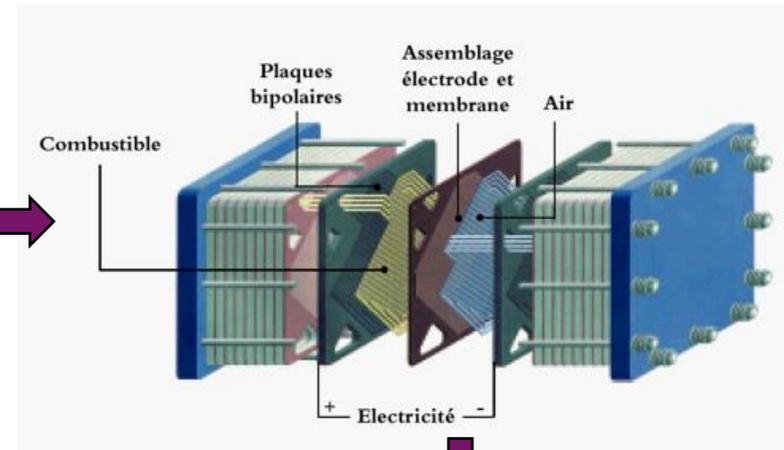


$$P = V \times I$$

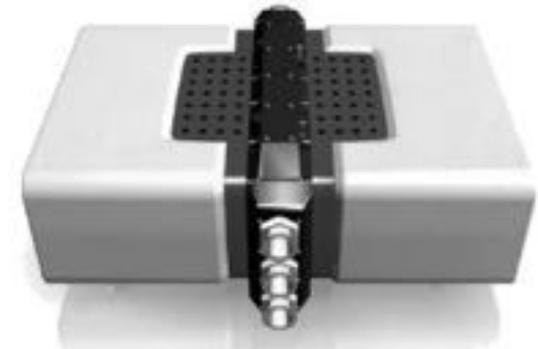


La pile PEMFC / de la cellule à la pile

Des assemblages sous forme de « stacks »



GENEPAC (GENérateur Electrique à Pile A Combustible) première pile à combustible issue du partenariat entre PSA Peugeot Citroën et le CEA (janvier 2006)



Le véhicule à pile à combustible



Exemple de la
Toyota Mirai



Batterie NiMH



Electronique de
puissance



2 réservoirs d'hydrogène
(5 kg, 700 bar)



Moteur
électrique

Autonomie :
500 km



Système pile à combustible (114 kW)
+ convertisseur



Hyundai Tucson ix35 FCEV



Capacité: 5 personnes
 Puissance pile à combustible: 100 kW
 Puissance Moteur: 100 kW
 Combustible: H₂ comprimé (5,6 kg d'H₂)
 Réservoirs : 2 réservoirs de 70 MPa (Dynetek Industries) 700 bars
 Vitesse maximum: 160 km/h
 Autonomie: 650 km
 Batterie : Lithium Ion polymère 21 kW

*Alsterwasser Zemship (Elbe –
 Hambourg) – 2008 – 100
 passagers – pile de 100 kWe –
 hydrogène stocké à 350 bars -
 projet européen*



*Micro/CEA/BIC – Axane,
 groupe électrogène
 transportable 2,5 kWe
 (Expéditions J.L. Etienne)*



Projet européen d'avion de deux
 places (baptisé Rapid 200 FC)
 alimenté par une pile à combustible
 de 20 kWe, hybridée avec une batterie
 Li-ion de 20 kWe pour le décollage
 et capable de voler une heure grâce à
 une réserve d'hydrogène de 1,5 kg
 stocké à 350 bars.



Green GT H2 ou vélo H2 ?



Pragma
Industries



Le Mans 2024 !



Projet H24

Ce projet est supporté par Michelin, qui fournit les pneus et soutient également SymbioFCCell, le fabricant de la pile à combustible intégrée dans la Green GT.

Le premier avion quatre places propulsé à l'hydrogène a décollé

PUBLIÉ LE 04/10/2016 par l'Usine Nouvelle



On trouve de tout !

Citroën GT Concept PAC hydrogène. Voiture équipée d'un moteur à hydrogène développant 400 Kw, soit quelques 646 CV.



Énormément d'initiatives, de prototypes, de toutes petites séries Contraste avec le « peu » de com sur le sujet.



Prototype de 1970 d'une Austin A-40, pile à combustible de 6 kW, réservoir d'hydrogène sous pression, placé sur le toit et contenant 2kg d'hydrogène. Elle a parcouru près de 16 000 km pendant les 3 années qu'a duré cette expérimentation. Mais la technologie alcaline était trop sensible au CO2..



[Pininfarina H2 Concept Track Car](#)

TOUT sur: <https://www.netinform.net/H2/H2Mobility/Default.aspx>

French hydrogen prototypes



FAM City H2 : first hydrogen registration in France (December 2011)



HyKangoo (SymBioFuelCell and Renault)
.... Mais quand même plus de
100 aujourd'hui en France !



Exemple de la HyKangoo



Autonomie :
320 km



Réservoir d'hydrogène
(1,7 kg, 350 bar)

Batterie lithium-ion

Système pile à
combustible
(5 kW)



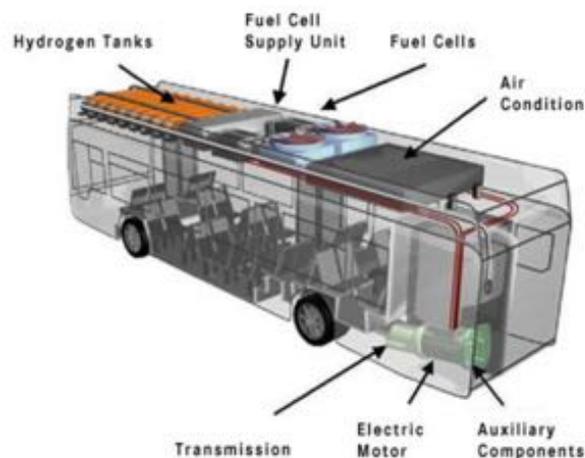
Europe / projet CUTE / 2003 – 2005

Demonstration of **27 fuel cell powered regular service buses**

Design, construction and operation of the necessary infrastructure for hydrogen production and refuelling stations.

Ecological, technical and economical analysis of the entire life cycle and comparison with conventional alternatives. Quantification of the abatement of CO₂ at European level

Amsterdam (Netherlands), Barcelona (Spain), Hamburg (Germany), London (United Kingdom), Luxembourg, Madrid (Spain), Porto (Portugal), Stockholm (Sweden) and Stuttgart (Germany)
each fuel cell bus costs € 1.25 M



A total mileage of more than **500 000 km**

About **2.5 million passengers** so far have enjoyed a journey on the buses. Thousands have visited the filling stations

<https://www.fuelcellbuses.eu/category/demos-europe>

FUEL CELL ELECTRIC BUSES

- Fuel cell electric buses
- Concepts
- Benefits
- Demos in Europe**
- History

HYDROGEN REFUELLING STATIONS

- Concepts
- Hydrogen supply and storage
- Refuelling FCSEs
- Demos in Europe

PERFORMANCE DATA

- Performance data

START TO IMPLEMENT

- Start to implement
- Pre-procurement
- Procurement
- Delivery
- Maintenance

FRAMEWORK

- Policy
- Safety

BUS LOCATIONS

Legend: ■ In operation ■ Planned

MILAN

Project CHC

- 5 buses, 12 m/2 axles
- Hydrogen storage: 35 kg
- Bus Manufacturer: Mercedes/Evobus
- Fuel Cell manufacturer: Ballard
- Operator: SASA spa-AG
- In operation since 2013

[Read more](#)

OSLO

Project CHC

- 5 buses, 13 m/3 axles
- Hydrogen storage: 35 kg, 7 tanks
- Bus Manufacturer: Van Hool
- Fuel Cell manufacturer: Ballard
- Operator: Ruter
- In operation since 2013
- Max. nr of passengers = 74

[Read more](#)

STUTTART

Project NIR/NOW/CEP

- 4 buses, 12 meter/2 axles
- Hydrogen storage: 35 kg
- Manufacturer - Mercedes/Evobus

www.20minutes.fr/france/2229807-20180301-pau-ville-devoile-febus-premier-bus-hydrogene-france

20 PLANÈTE Pau dévoile le Fébus, le premier bus à hydrogène de France

ACCUEIL > PLANÈTE

Pau: La ville dévoile son Fébus, le premier bus à hydrogène de France

TRANSPORTS Ce bus à haut niveau de service électrique, alimenté par de l'hydrogène, doit être mis en service d'ici à septembre 2019...

Mickaël Bosredon | Publié le 03/03/18 à 08h08 — Mis à jour le 03/03/18 à 08h08

0 COMMENTAIRE 869 PARTAGES

[WhatsApp](#) [Facebook](#) [Twitter](#) [Facebook Messenger](#) [Google+](#) [Pinterest](#) [LinkedIn](#) [Imprimer](#) [Envoyer](#)



Le Fébus, premier bus à haut niveau de service à hydrogène, sera déployé en 2019 à Pau. — Ville de Pau

À LIRE AUSSI

- 16/01/18 | TRANSPORTS**
VIDEO. Un bus s'embrase en plein Paris, les passagers évacués à temps
- 12/02/18 | MOBILITES**
Pour doper la pratique du vélo, Rennes bâtit une voie rapide pour cyclistes
- 08/02/18 | TRANSPORTS**
Il y aura une nouvelle ligne de métro à Lyon...mais pas avant 2030

D'ACTU 1 SUR 2

Du concret !

The U.S. is the world leader in fuel cell forklift deployment, with **more than 4,000 systems either deployed or on order.**

Many customers are coming back and ordering more units for additional facilities, including Coca-Cola, Walmart and Sysco. **Plug Power is the leading manufacturer**, working with Ballard Power Systems to develop their fuel cell system. Oorja Protonics is also selling hundreds of their direct methanol range extenders for forklifts.



Du concret !

Several companies, including fuel cell manufacturers Protonex, Smart Fuel Cell, UltraCell and UltraElectronics AMI, are developing smaller, **portable fuel cell units for battery charging and auxiliary power** for use in military, surveillance and emergency response applications.

*myFC Develops Powertrekk
Small Hydrogen Fuel Cell*



Les siliciures Na₂Si et Ca₂Si, réagissent violemment avec l'eau pour libérer de l'hydrogène et/ou des silanes (SiH₄)

Très astucieux Mais problème de déchet

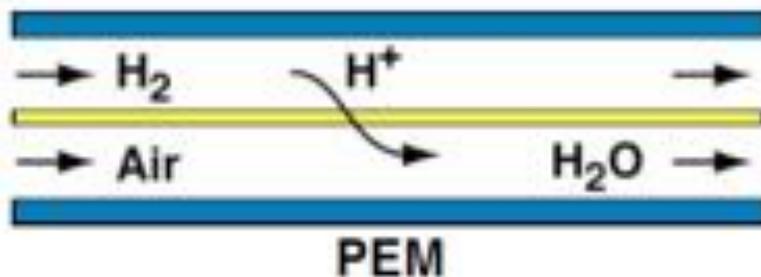
Cartouche 10 l d'H₂, soit 0,9 g
À raison de 33 kWh/kg, 33
Wh/g, si rendement pile 50%:
16 Wh, soit 12 piles AA
Contenu stable dans le temps



Les principales différences par rapport aux PEMFC

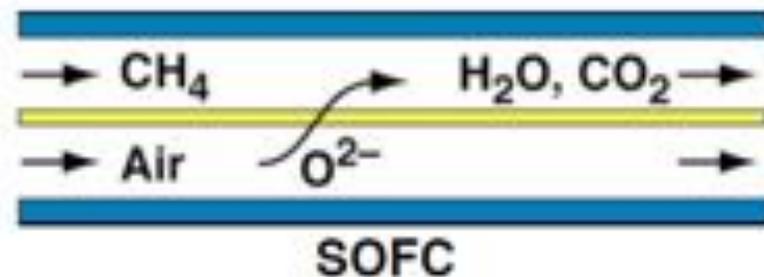
Proton Exchange Membrane (PEM)

- Polymer electrolyte
- Proton-conducting electrolyte
- Low temperature ($\sim 100^\circ\text{C}$)
- Requires H_2 fuel
- CO is a poison
- Needs good reforming/separation
- Precious-metal catalysts
- Low thermal inertia
- Fairly mature



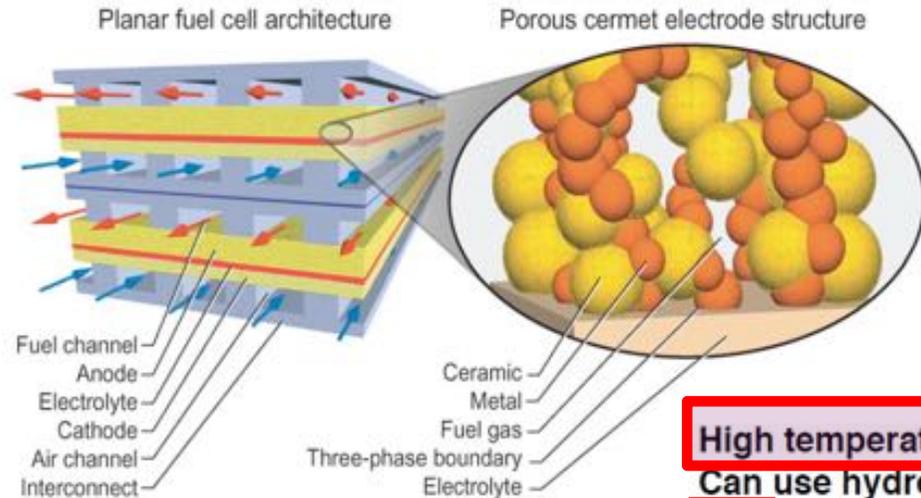
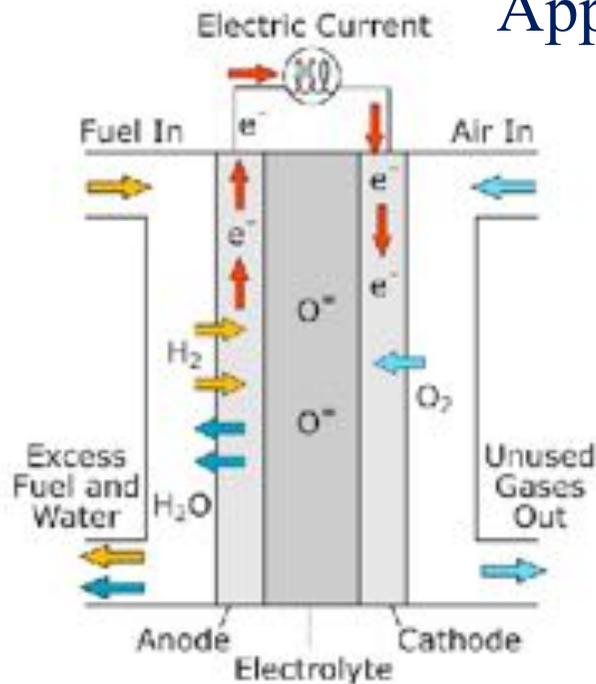
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

- Ceramic electrolyte
- Oxygen-ion conductor
- High temperature ($\sim 700^\circ\text{C}$)
- Can use hydrocarbon fuel
- CO is not a poison
- May use reforming or CPOX
- Inexpensive catalysts
- Large thermal inertia
- In development



La pile SOFC

Applications stationnaires / rendements élevés



High temperature (~700°C)

Can use hydrocarbon fuel

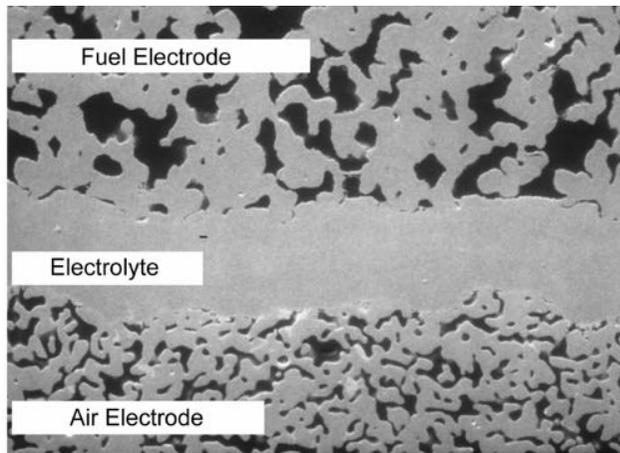
CO is not a poison

May use reforming or CPOX

Inexpensive catalysts

Large thermal inertia

In development



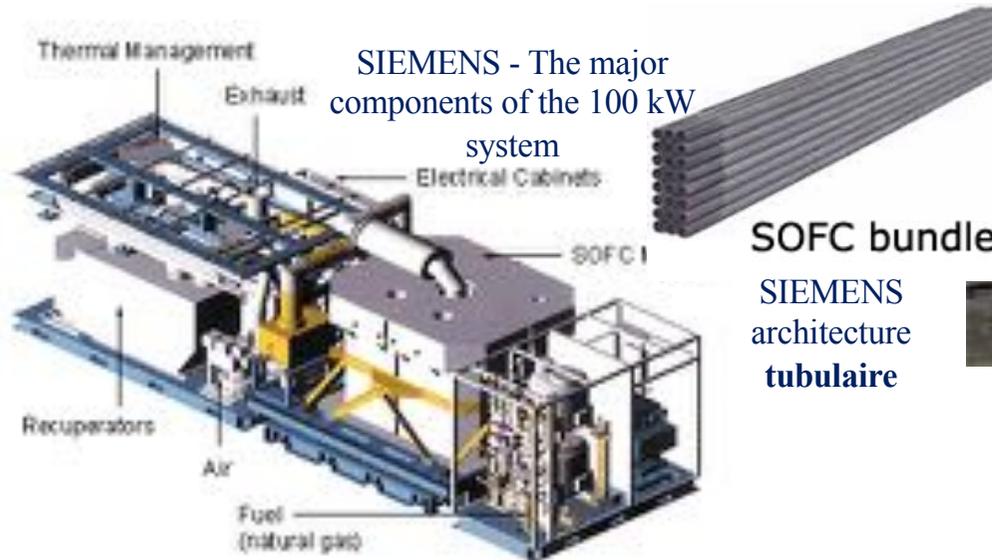
100 μm

Anode : Ni/YSZ cermet (ceramic-metal composite) (low cost, chemically stable at high temperatures and thermal expansion coefficient close to that of the YSZ electrolyte)

Electrolyte : ZrO_2 (zirconia) doped with small amounts of Y_2O_3 (yttria) - yttria-stabilized zirconia (YSZ).

Cathode : $(La_{1-y}Sr_y)MnO_{3-\delta}$ (LSM) - perovskite material

Divers types de piles SOFC



SIEMENS architecture tubulaire



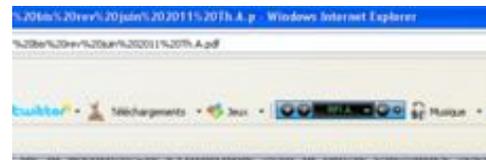
SIEMENS - 250 kW CHP SOFC System



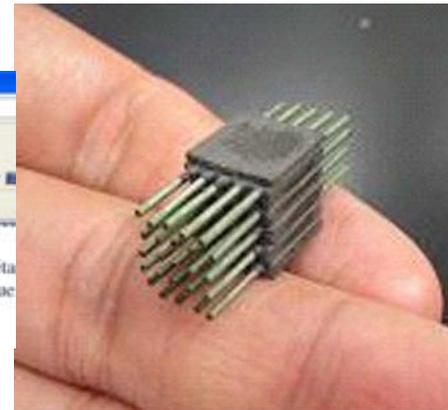
SIEMENS - A 100 kW SOFC cogeneration system installed at RWE in Essen, Germany



TOPSOE architecture planaire



chnologie cylindrique est de pouvoir mettre les joints d'étanchéité à l'extérieur, réduisant ainsi les conséquences de contraintes mécaniques sur la fiabilité.

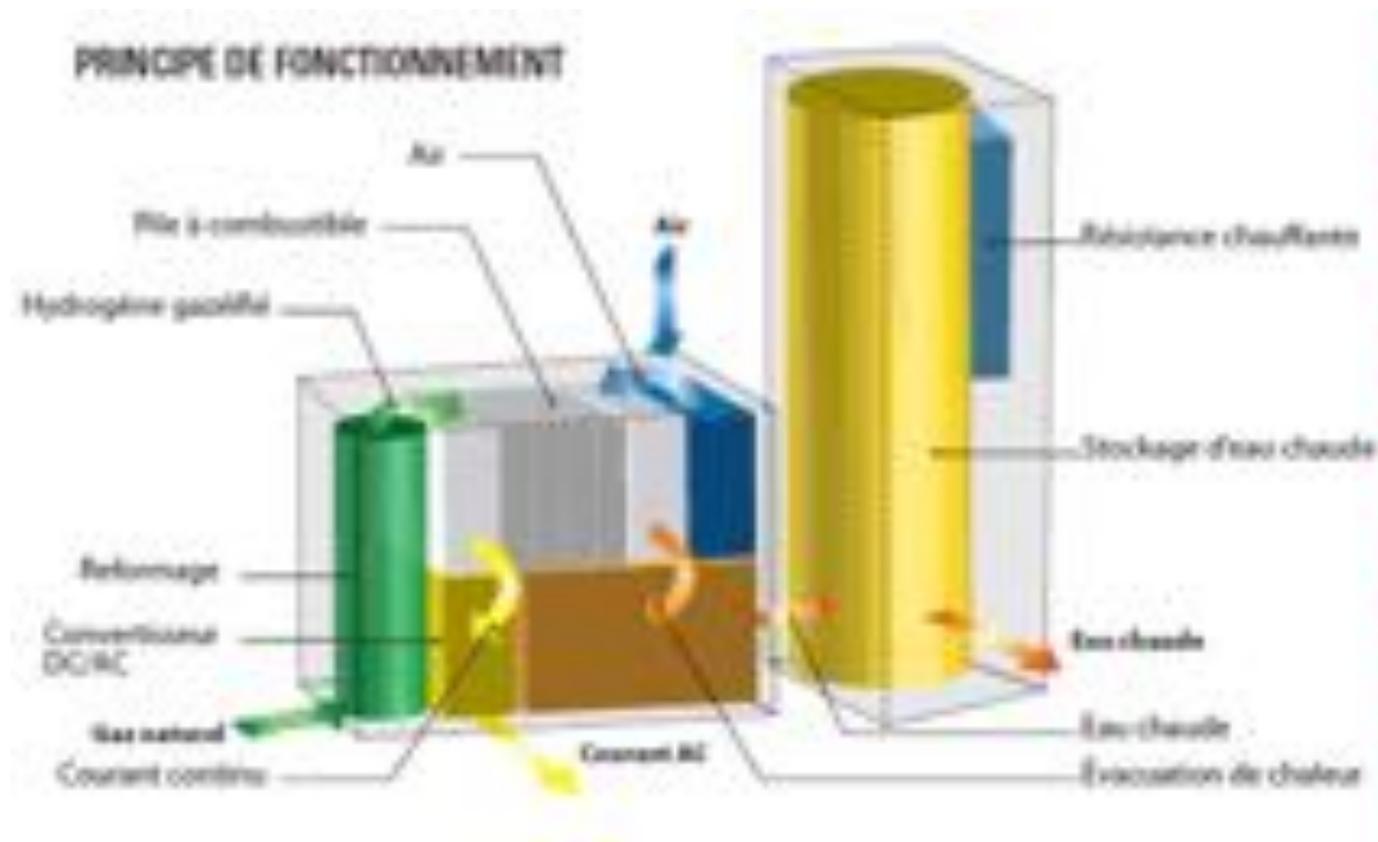


The world's smallest solid-oxide fuel cell (SOFC) - National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST - Japon). Operable at 550°C. 25 needle-like modules, each with a diameter of 0.8mm. 3W of electricity



SOFC VTT (Finland)

Un usage massif de piles SOFC en stationnaire au Japon: plus de 200 000 aujourd'hui !



La cogénération permet d'obtenir un haut rendement avec la pile à combustible. Outre la pile elle-même, un système complet intègre en entrée le module pour fabriquer l'hydrogène et en sortie un module électrique avec conversion de courant continu vers alternatif ainsi qu'un échangeur pour chauffer l'eau.

La pile à combustible, ce « miroir » de l'électrolyse qui permet de produire de l'électricité à T et P ambiantes en « empruntant » l'électron libéré lors de la dissociation de l'hydrogène sur un catalyseur, avant de le restituer pour la recombinaison avec l'oxygène qui produit de la vapeur d'eau

Plusieurs milieux et températures explorés afin d'accroître la variété de combustibles utilisables, d'usages les plus adaptés et les meilleurs rendements possibles

Des usages multiples tant en mobilité qu'en stationnaire, aujourd'hui les technologies sont au point, avec des rendements remarquables

Une absence de bruit et de pollution à l'usage (émissions de CO₂ si combustible carboné)

Des dimensions allant du microscopique à la puissance industrielle

Et ce n'est qu'un usage de l'hydrogène, qui reste un élément chimique donc à l'utilisation beaucoup plus vaste

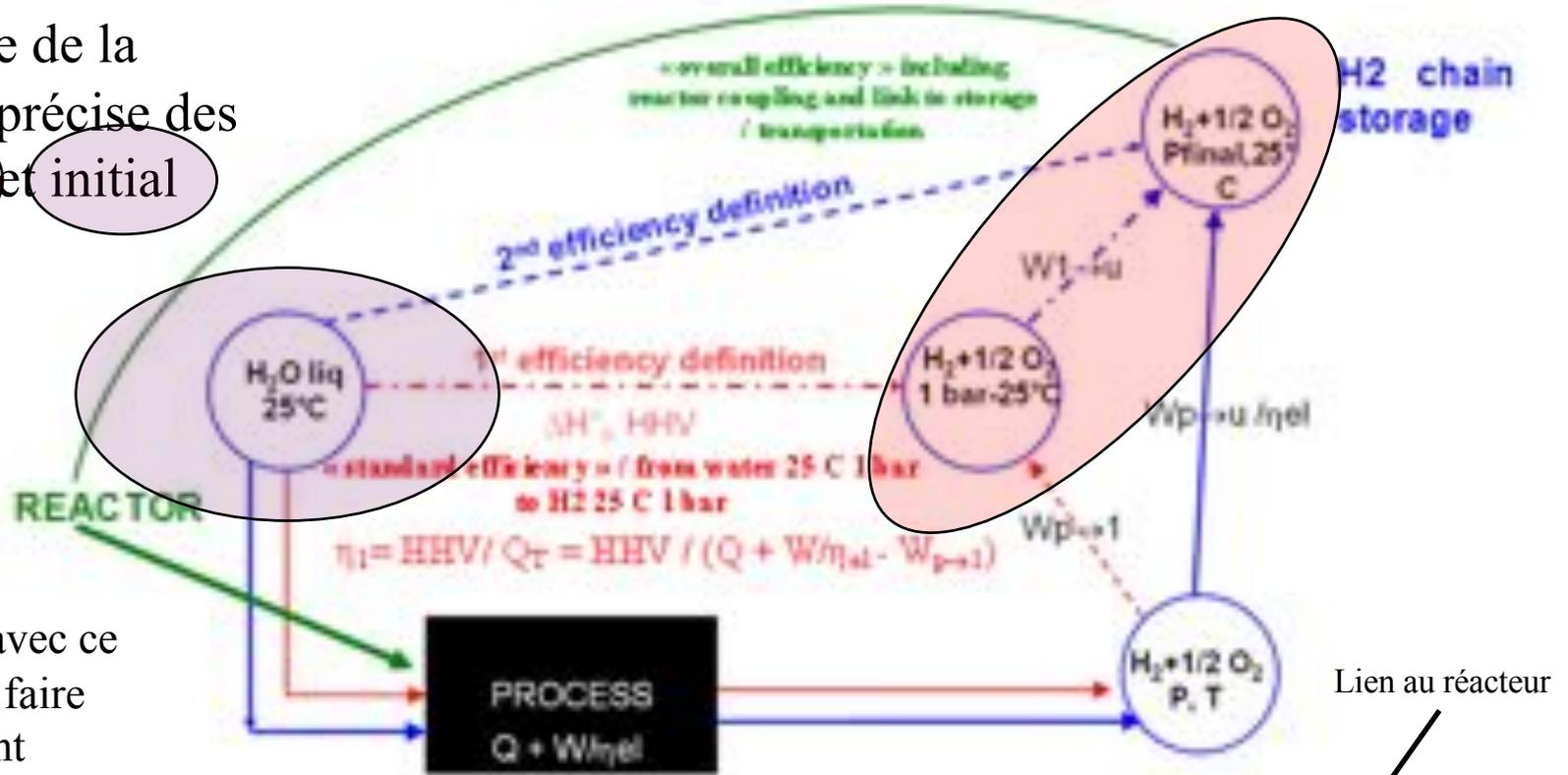
Réserve

L'épineuse question des « rendements »

Le cas de la production d'hydrogène

Importance de la définition précise des états final et initial

État « frontière » avec ce que l'on veut en faire ultérieurement



$$\eta_2 = (HHV + W_{l \rightarrow u}) / (Q + W/\eta_{el} + W_{p \rightarrow u} / \eta_{el})$$

$$\eta_3 = (HHV + W_{l \rightarrow u}) / (Q + W/\eta_{el} + W_{p \rightarrow u} / \eta_{el} + [Q_c + W_c / \eta_{el}])$$

Le moteur thermique à Hydrogène

➤ Good points

- Energy efficiency of the motor is 20% to 25% better than that of a gasoline ICE due to leaner air fuel ratio and higher compression ratio.
- Maintenance is much the same as a gasoline ICE.
- Not so much extra cost of the vehicle as there is no fuel cell. Extra cost only for the tank and for the specified ICE.
- For the public, 1 revolution instead of 2 (new energy but same motor)

➤ Bad points

- Production of NOx exhaust as there is no carbon to form CO or CO2.
- Heavy engine because of low possible compression inside the motor.
- Distribution of hydrogen is an important problem.

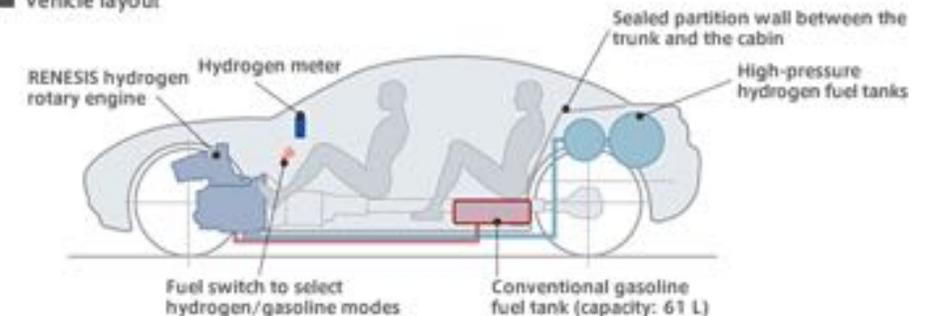
Source : EFONET workshop 7 PCRD 2009

BMW Hydrogen 7 – réservoir cryogénique,
consommation env. 4 kg H₂/100 km



MAZDA RX-8 / réservoir sous pression 350 bar
Hybride essence - hydrogène

■ Vehicle layout



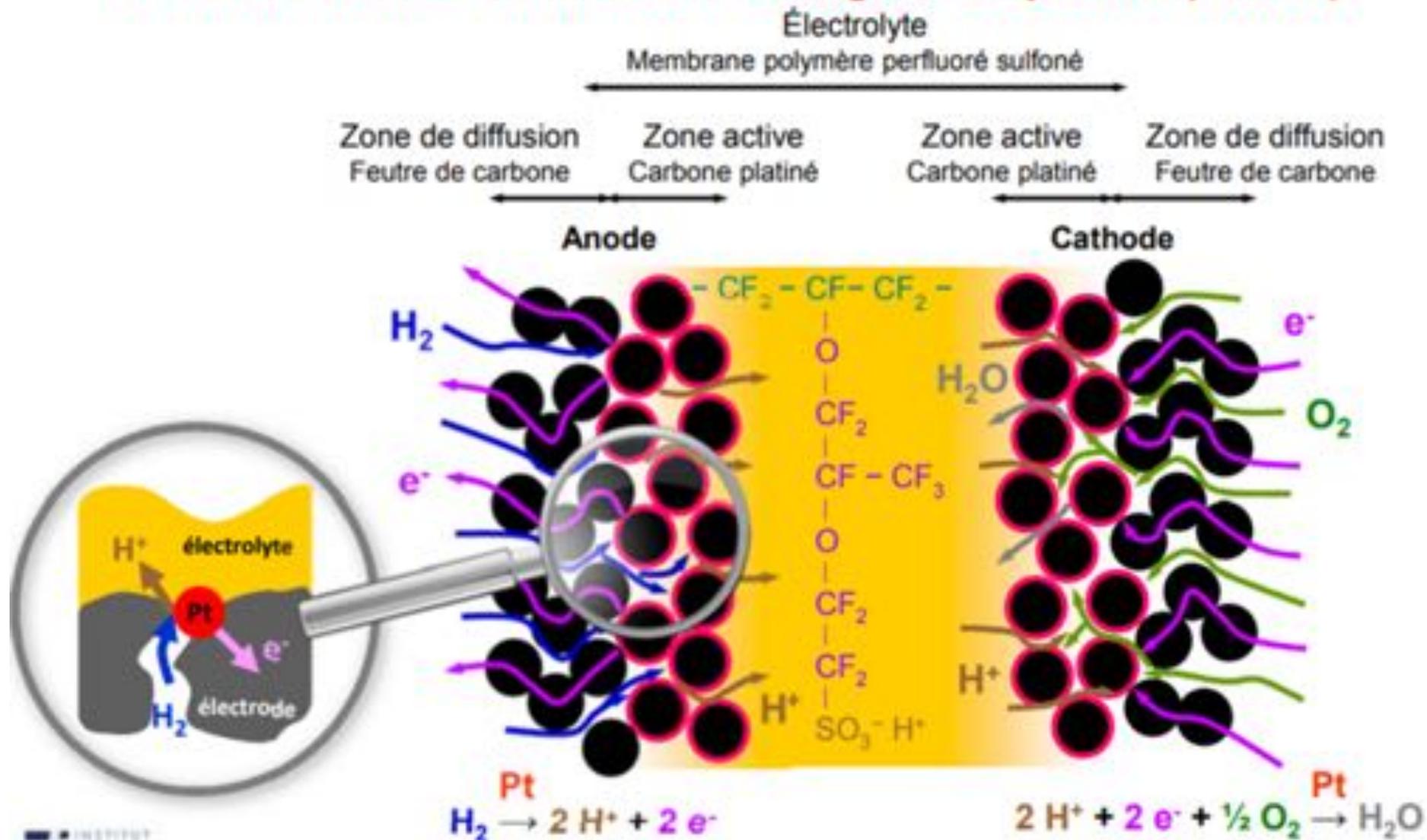
Plutôt délaissé aujourd'hui principalement pour son trop faible rendement

Différents types de piles à combustible

Type de pile	Anode (Catalyseur)	Electrolyte	Cathode (Catalyseur)	Température	Applications
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré ($SO_3^- H^+$) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60-90 °C	Portable Transport Stationnaire
Méthanol direct (DMFC)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 H^+ + 6 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré ($SO_3^- H^+$) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60-90 °C	Portable Transport
Acide phosphorique (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	PO_4H_3 (85-100 %) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	160-220 °C	Transport Stationnaire
Alcaline (AFC)	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ (Pt, Ni)	KOH (8-12 N) $\leftarrow OH^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$ (Pt-Au, Ag)	50-250 °C	Spatial Transport
Carbonate fondu (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$ (Ni + 10 % Cr)	$Li_2CO_3/K_2CO_3/Na_2CO_3$ $\leftarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ ($NiO_x + Li$)	650 °C	Stationnaire
Oxyde solide (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ (Cermet Ni-ZrO ₂)	$ZrO_2-Y_2O_3$ $\leftarrow O^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ (Perovskites $La_xSr_{1-x}MnO_3$)	750-1050 °C	Stationnaire

La pile PEMFC

Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)



Un « petit » retour sur la molécule chimique ...

Hydrogène « chimique » : Sidérurgie

Production de **carburants de synthèse** pour moteurs à combustion : **procédés CtL, BtL**

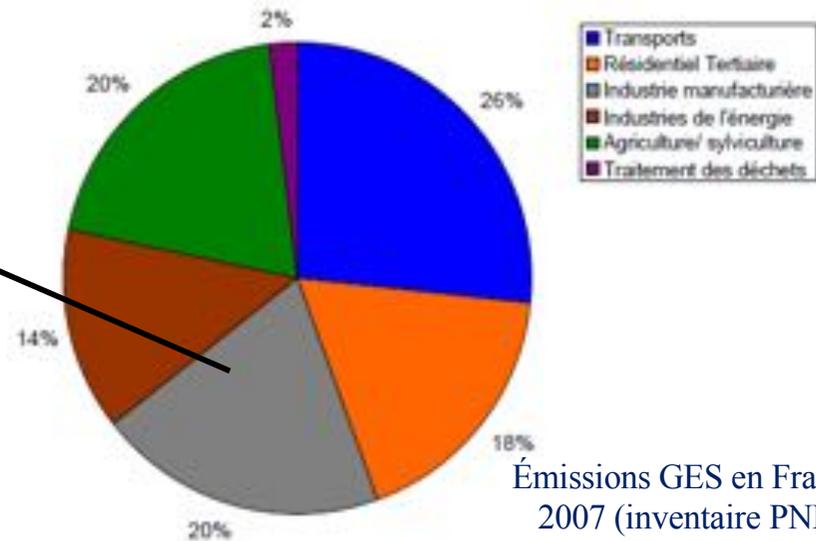
... et on repart sur le vecteur énergétique

Hydrogène « énergétique » : stockage de l'énergie

Le marché potentiel de la sidérurgie (France)

Sidérurgie Française : pour production acier, actuellement : **1,8 t CO₂ / t HRC** → 31 Mt CO₂ / an : ~ 6% émissions Françaises, 30% du secteur industriel (hors industries de l'énergie)

Objectif projet européen ULCOS : **MAXI 900 kg CO₂ / t HRC**



Émissions GES en France en 2007 (inventaire PNLCC CITEPA / déc. 2008)

Actuellement, c'est le procédé de réduction par coke qui est utilisé - Possibilité d'utiliser l'hydrogène pour une réduction directe du minerai de fer Fe₂O₃ ou Fe₃O₄ : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$

Quantité d'hydrogène nécessaire pour l'ensemble de la production française :

Masse d'H₂ nécessaire pour réduire une tonne d'acier : 60 kg

	Années					
	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Production d'acier (Mt/an)	19	17	18	19	20	21
Masse d'hydrogène (Mt/an)	1.14	1.02	1.08	1.14	1.20	1.26

Quantité aujourd'hui volontairement produite

Carburants de synthèse – retour sur le « pivot » $xH_2 + y CO$

Reformage du méthane - Production d'un « gaz de synthèse » $CO + H_2$:



Et $H_2 \geq 2 CO$

<http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-procede-fischer-tropsch-5494/>

L'équation originale de la réaction de Fischer-Tropsch

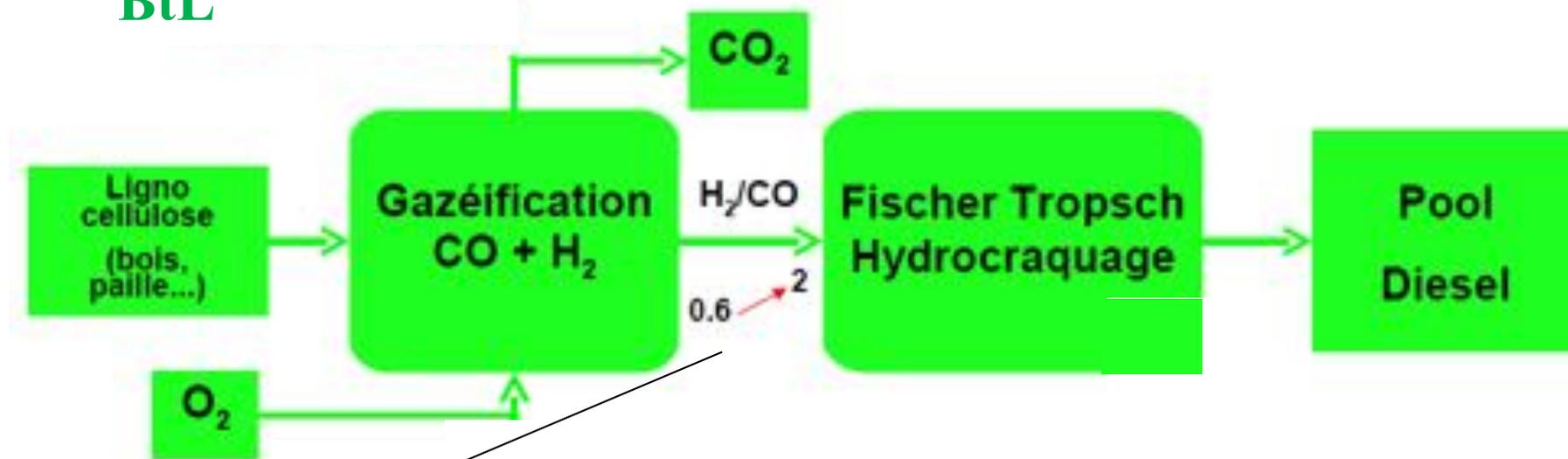


Le procédé Fischer-Tropsch, du nom des chimistes allemands qui l'ont inventé en 1923, est une réaction chimique qui permet de synthétiser par catalyse des hydrocarbures à partir de monoxyde de carbone et d'hydrogène.

Ce procédé est notamment utilisé pour transformer des hydrocarbures solides, comme le charbon, ou gazeux, en carburants liquides, sortes de pétrole de synthèse. Ce sont les filières CTL (Coal to Liquids, soit transformation du charbon en liquides) et GTL (Gas to Liquids, soit transformation du gaz en liquides).

Le BtL et le CtL (Coal to Liquid)

BtL



Mais : la synthèse de biocarburant nécessite $H_2 / CO = 2$

Si toute la matière et l'énergie, en particulier le complément H_2 , vient de la biomasse : rendement « masse » = env. 15%

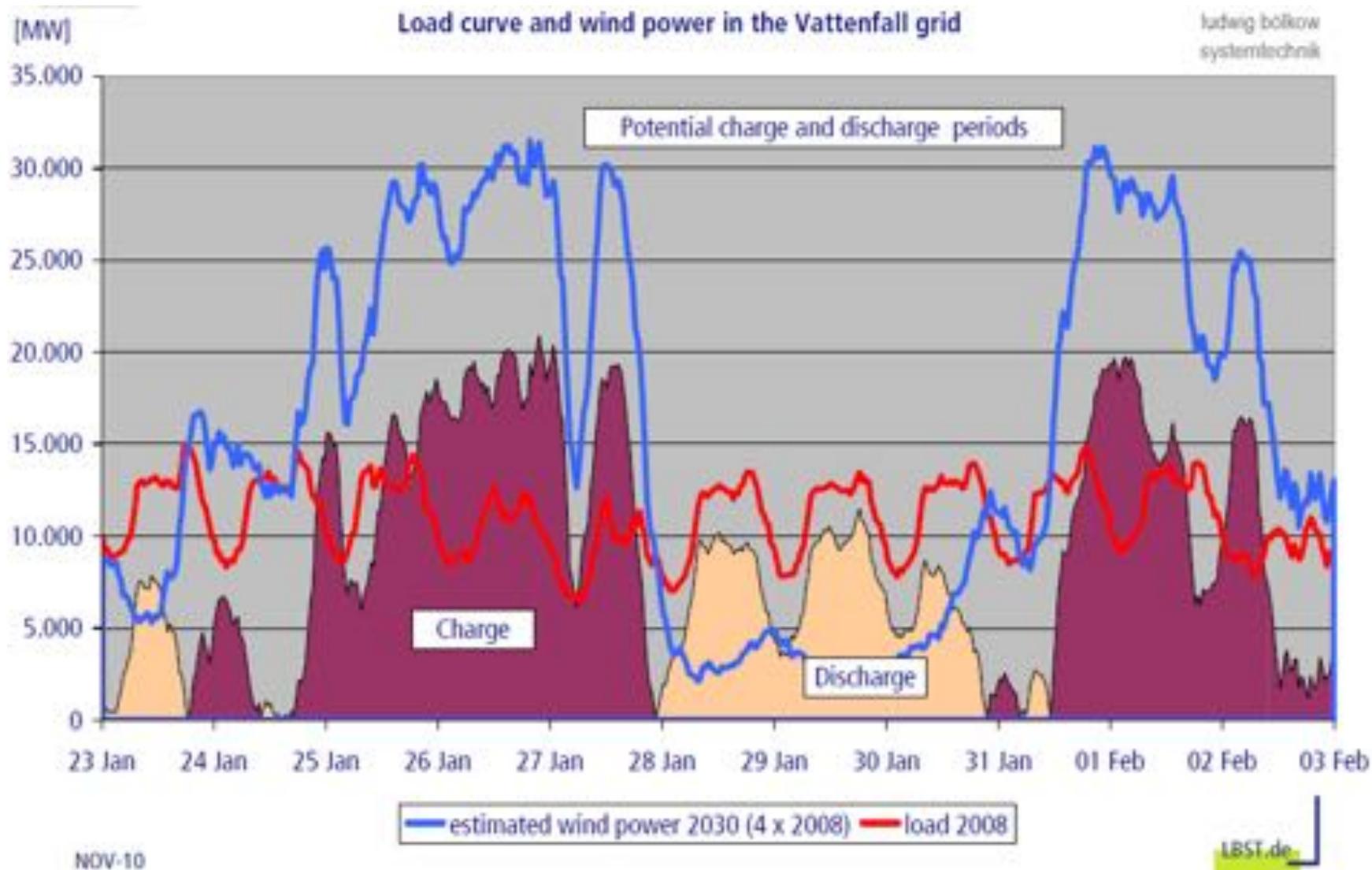
Importance de l'origine du complément H_2 nécessaire !

Si toute l'énergie et l' H_2 complémentaire viennent de l'extérieur : rendement « masse » = env. 45%

Apporter le complément H_2 de l'extérieur optimise l'usage de la biomasse: rendement « masse » (rendement « carbone »)

La situation offre / demande d'électricité

Cas du réseau géré par Vattenfall (D)



Norsk Hydro et Enercon



Alimentation électrique autonome de l'île d'UTSIRA (220 habitants, site isolé en Norvège)

Moteur à hydrogène de 55 kW, PAC de 10 kW

Electrolyseur de 10 Nm³/h

2 éoliennes de 600 kW

Las Palmas, Canaries

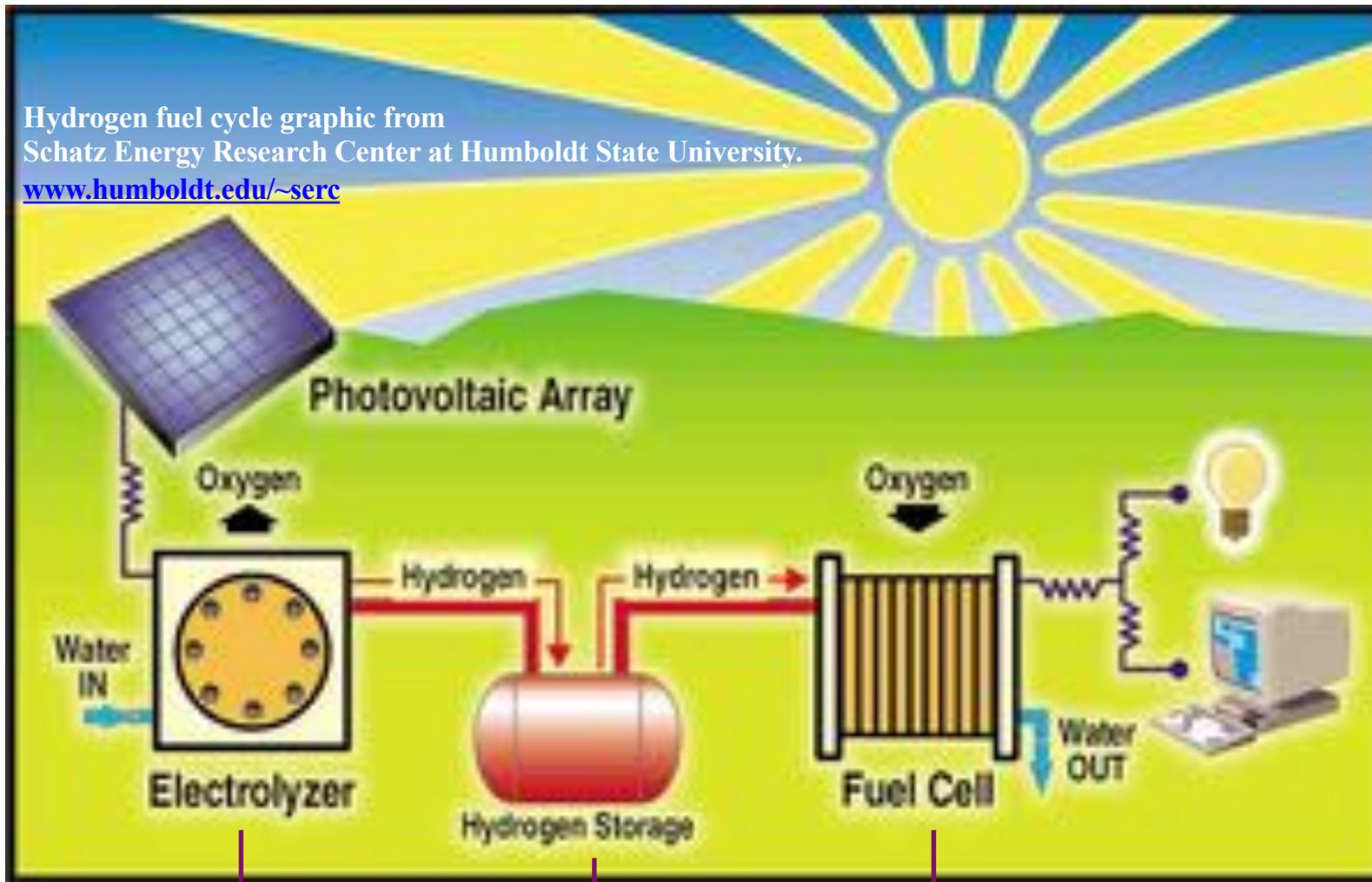


Intégration des énergies renouvelables et des technologies de l'hydrogène pour obtenir un système autosuffisant en énergie, via le stockage de l'énergie éolienne par l'hydrogène

Electrolyseur Solantis Energy alcalin 40 kW à 25 bars, 10 Nm³/h purificateur avec désalinisateur 40 kW

Pile de 30 kW

La situation offre / demande d'électricité



65%

90%

50%

But low global efficiency: **ca. 30%**

Projet PEPITE, Cadarache

Projet d'Etude et d'expérimentation de
Puissance pour la gestion des énergies
Intermittentes par les technologies
Electrochimiques

PàC : 200kW Helion

(3.5MW dont 0.6 dédiés à l'hydrogène)



Projet MYRTHE, Vignolia, Corse



550 kWc PV

Ecrêtage de puissance fournit par le parc PV
(car puissance maximale à fournir au réseau
limitée), et fournir de l'électricité le soir.

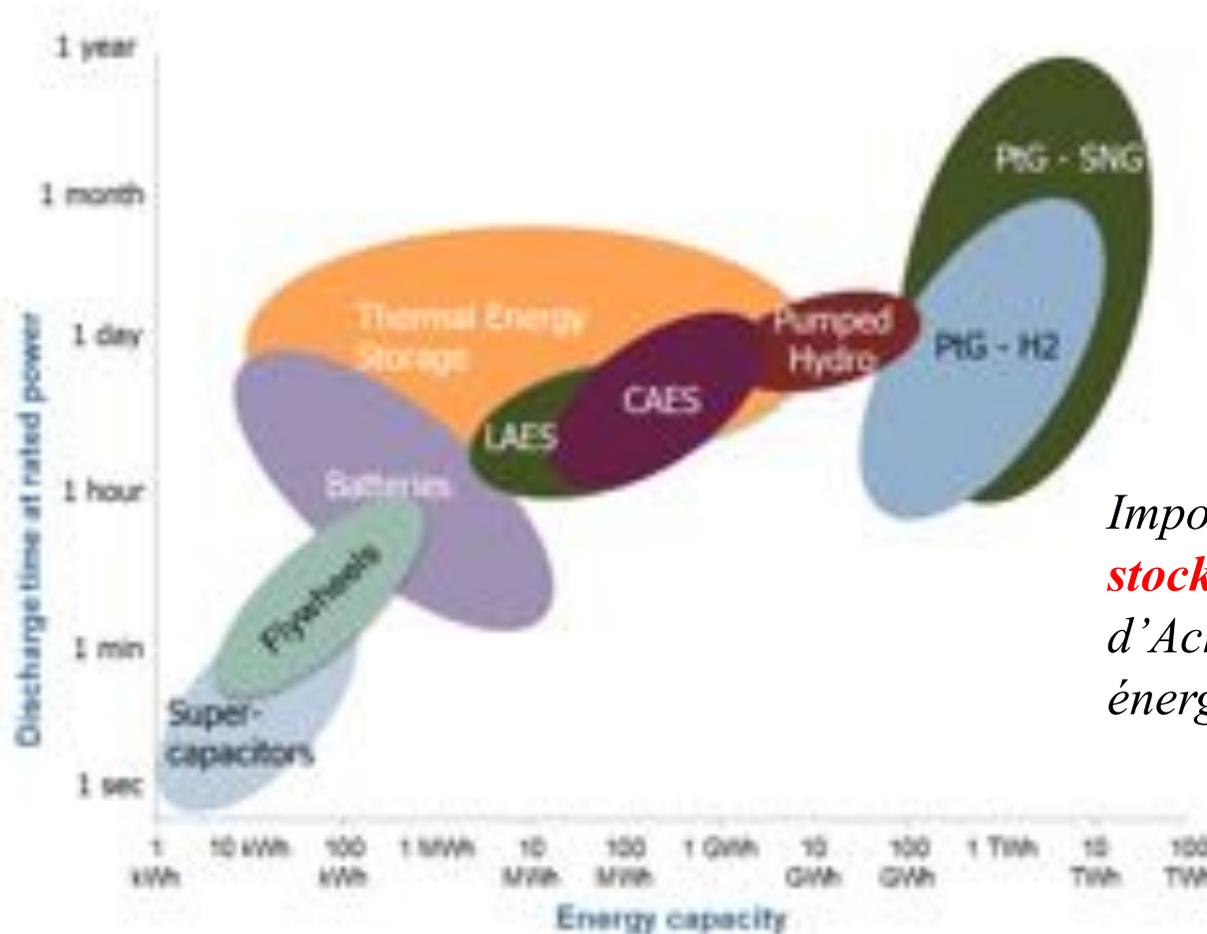
Forte collaboration publique/privé. 18 M€. Groupe Rafalli,
Université de Corse, Collectivité territoriale, Héliion, ADEME

Electrolyseur : 43 Nm³/h Helion
phase 14 : 10 Nm³/h 10 bars

Associer batteries et hydrogène pour le stockage Le ticket gagnant ?

Des technologies qui ne jouent pas dans la même cour

FIGURE 4: MAPPING STORAGE TECHNOLOGIES ACCORDING TO PERFORMANCE CHARACTERISTICS

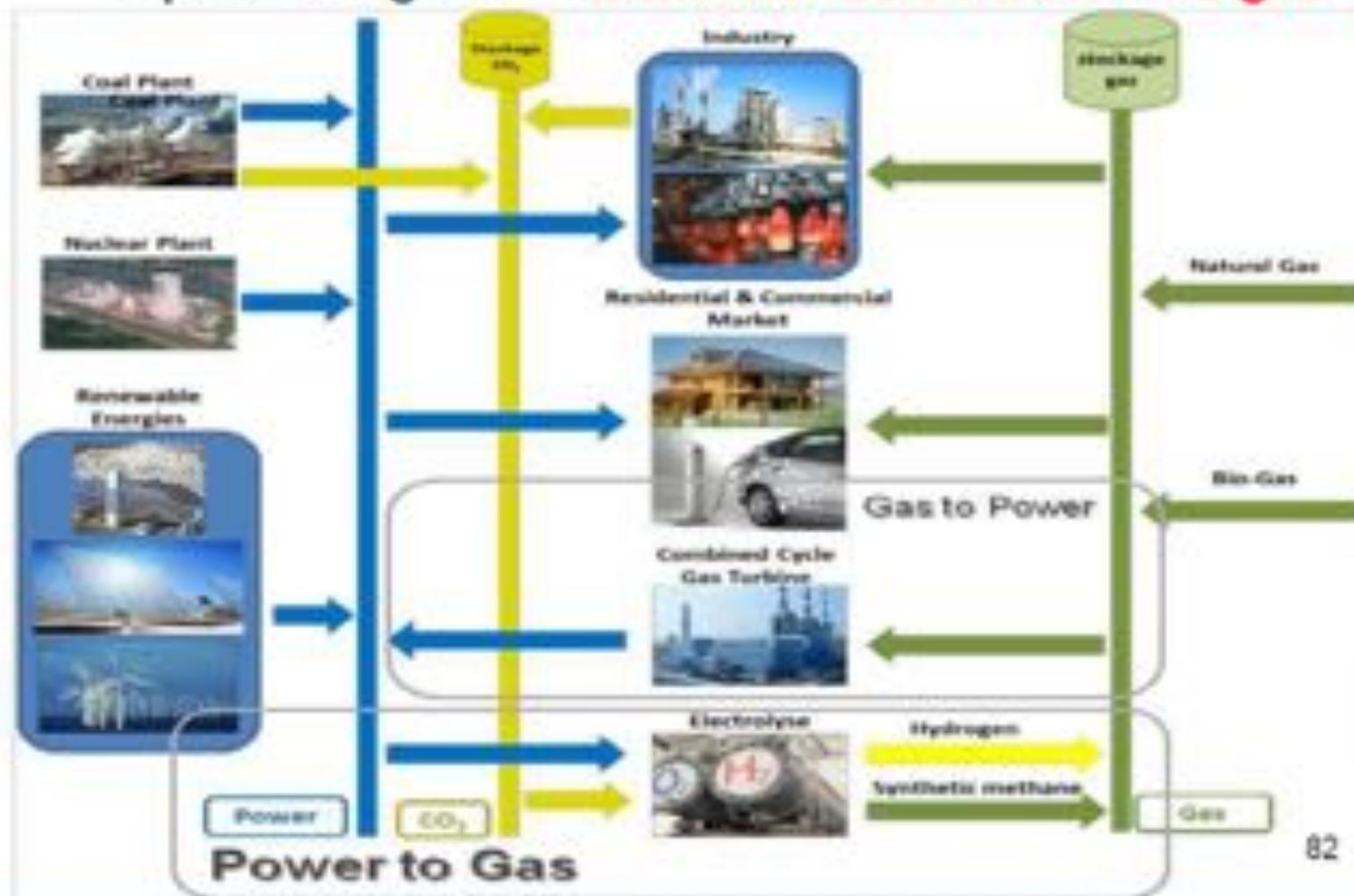


Source: PwC (2015) following Sterner et al. (2014)
CAES: Compressed Air, LAES: Liquid Air, PtG: Power to Gas.

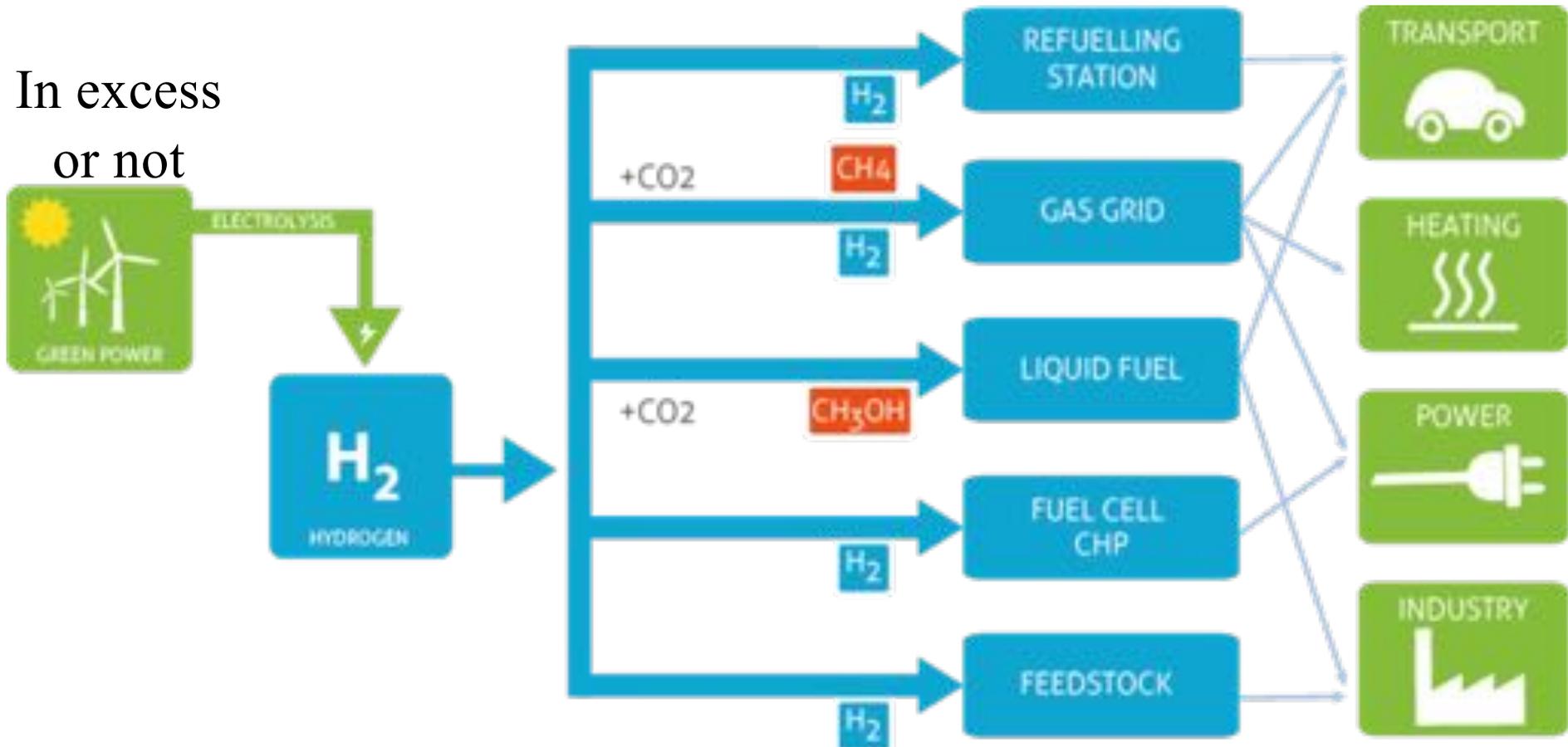
*Important, lorsqu'on sait que le **stockage saisonnier** est le talon d'Achille de la transition énergétique ...*

On en parle de plus en plus ... Le Power To Gas

Prévisions Mix 2050 : surplus de 15% de la production d'électricité à gérer. Une solution P2G « power to gas » **Interconnection électricité gaz**



<http://www.power-to-gas.be/valorisation-routes>



.... même si chacun a sa propre définition

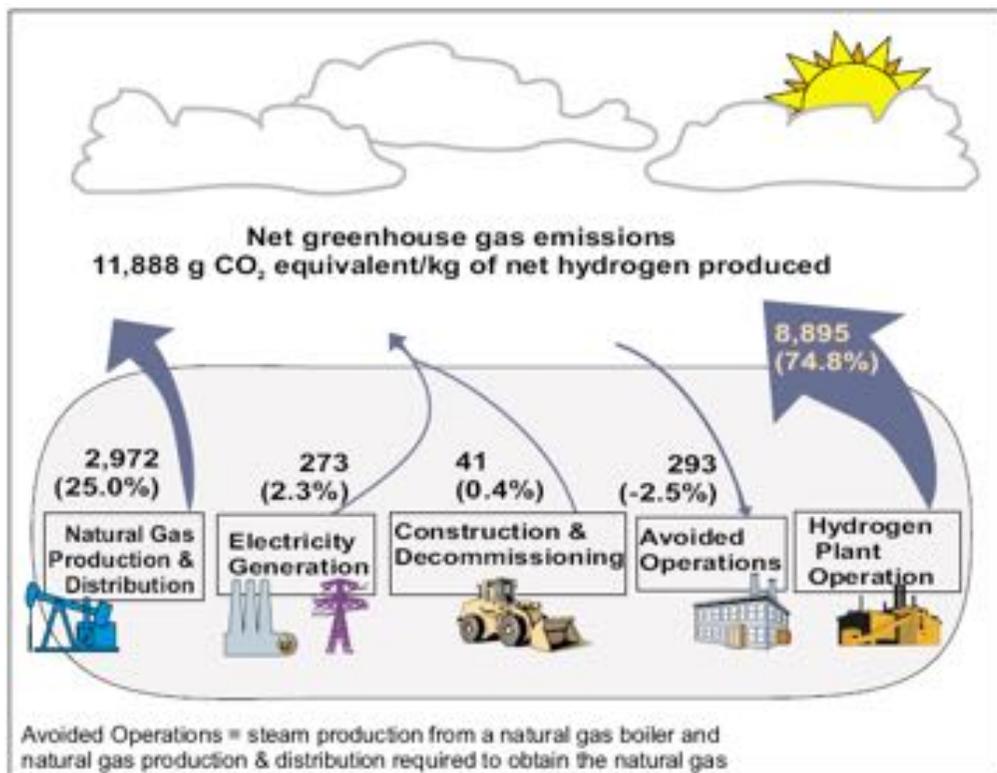
Bien d'autres usages de l'hydrogène: en tant qu'élément chimique (sidérurgie, carburants de synthèse, Power to Gas, turbines) et en tant que vecteur énergétique: stockage d'énergie, notamment intermittente
- attention à la « chaîne de rendements » dans ce dernier cas !

Les usages chimiques vont toujours dans le sens d'une réduction des émissions de GES et / ou de consommation de matière première

Les usages énergétiques se placent en concurrence avec d'autres technologies de stockage d'énergie / nombreuses études en ce sens

Les émissions de GES

Reformage du méthane



Analyse du Cycle de Vie du **SMR** en CO₂ équivalent (NREL)

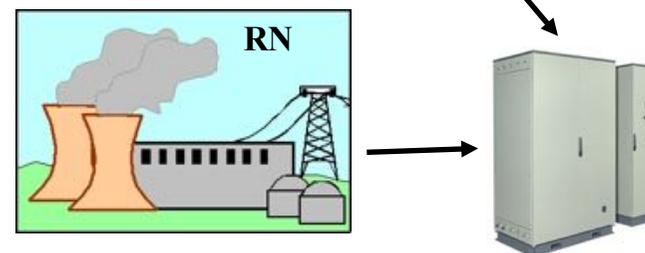
Soit env. 10 à 12 kg CO₂ / kg H₂

(Mémento sur l'Énergie)

Electrolyse alcaline



MIX électrique



ELECTROLYSE

~ 5 kWh / m³ H₂

Env 60 kWh / kg H₂

Émissions de CO₂ (g/kWh) :

RN : 5 - Mix France : 90 -

Mix EU 27 : 340

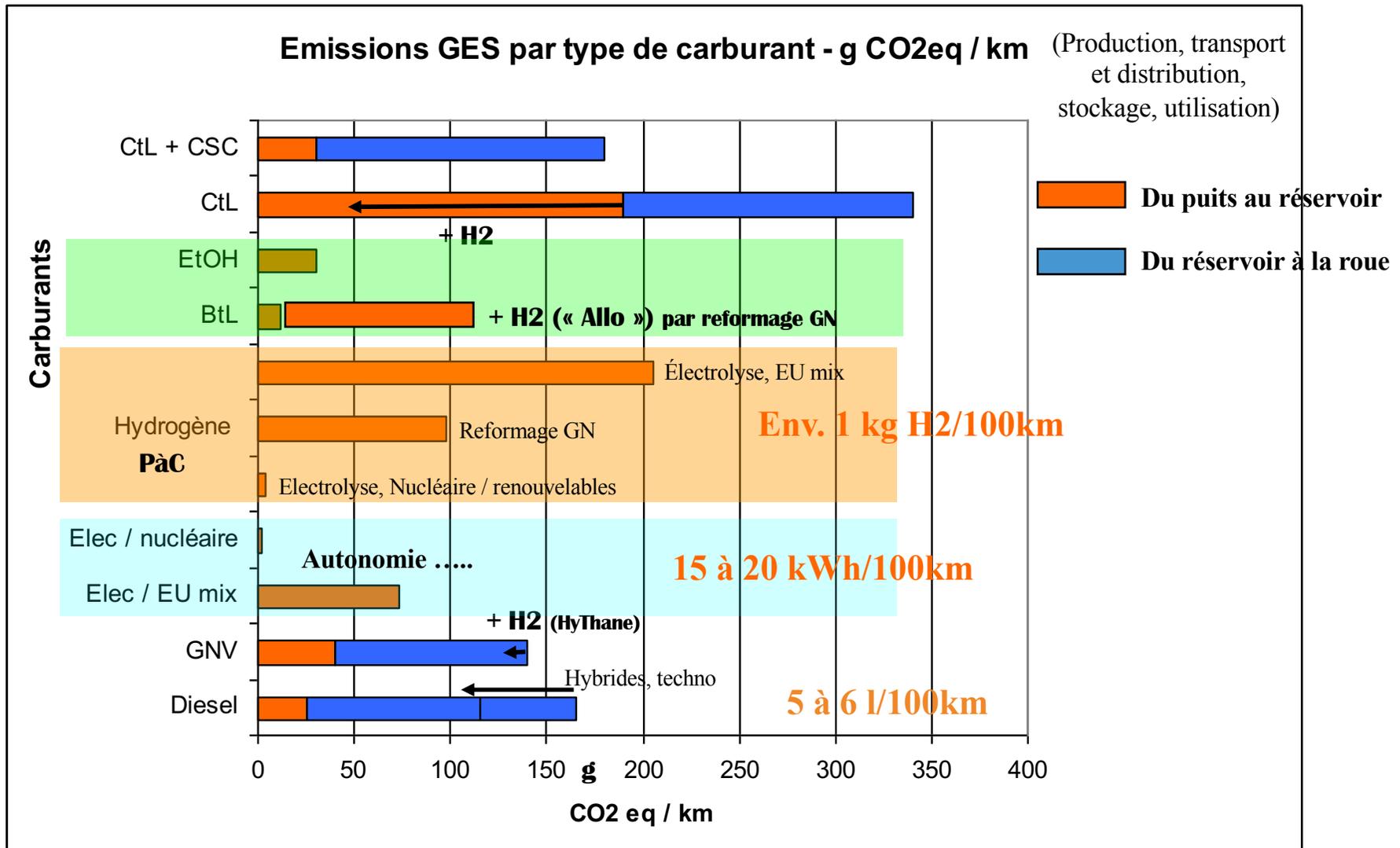
Émissions de GES du procédé de production « classique » par reformage du méthane : de 10 à 12 kg CO₂ / kg H₂ selon les sources

Émissions de GES du procédé de production par électrolyse : dépend essentiellement du mix électrique considéré : de quasiment rien à près de 20 kg CO₂ / kg H₂, environ 3 kg CO₂ / kg H₂ avec le mix français

Les émissions de CO₂ (prod par électrolyse vs. prod par reformage CH₄) **diminuent** avec une **production par électrolyse** avec un **mix énergétique français et nucléaire** ou **majoritairement EnR** (augmenteraient avec un mix européen)

Les émissions de GES

Les émissions du puits à la roue



(Sources : Eucar Concawe, HyWays, Roads2HyCom, IFP, Renault)

(+ env. 50g/km pour fab. Véhicule, maintenance, ...)

Des émissions de GES qui vont essentiellement, et énormément, dépendre du mode de production de l'hydrogène

Le mode de production par électrolyse est potentiellement le moins émetteur

Des émissions qui peuvent être comparables à celles d'autres technologies sur l'ensemble de la chaîne (du puits à la roue), mais nulles à l'usage final

Ce qui conduit à un avantage certain dans tous les cas: aucune émission là où elles ne sont pas captables et stockables, pas de polluants et particules, aucun bruit à l'usage

Les coûts

Durée d'exploitation
(années)

Dépenses *Recettes*

Valeur résiduelle

$$\text{Coût global} = I_0 + \sum_{t=1}^N \frac{D_t - R_t}{(1+a)^t} - \frac{V_N}{(1+a)^N}$$

Investissement

Taux d'actualisation

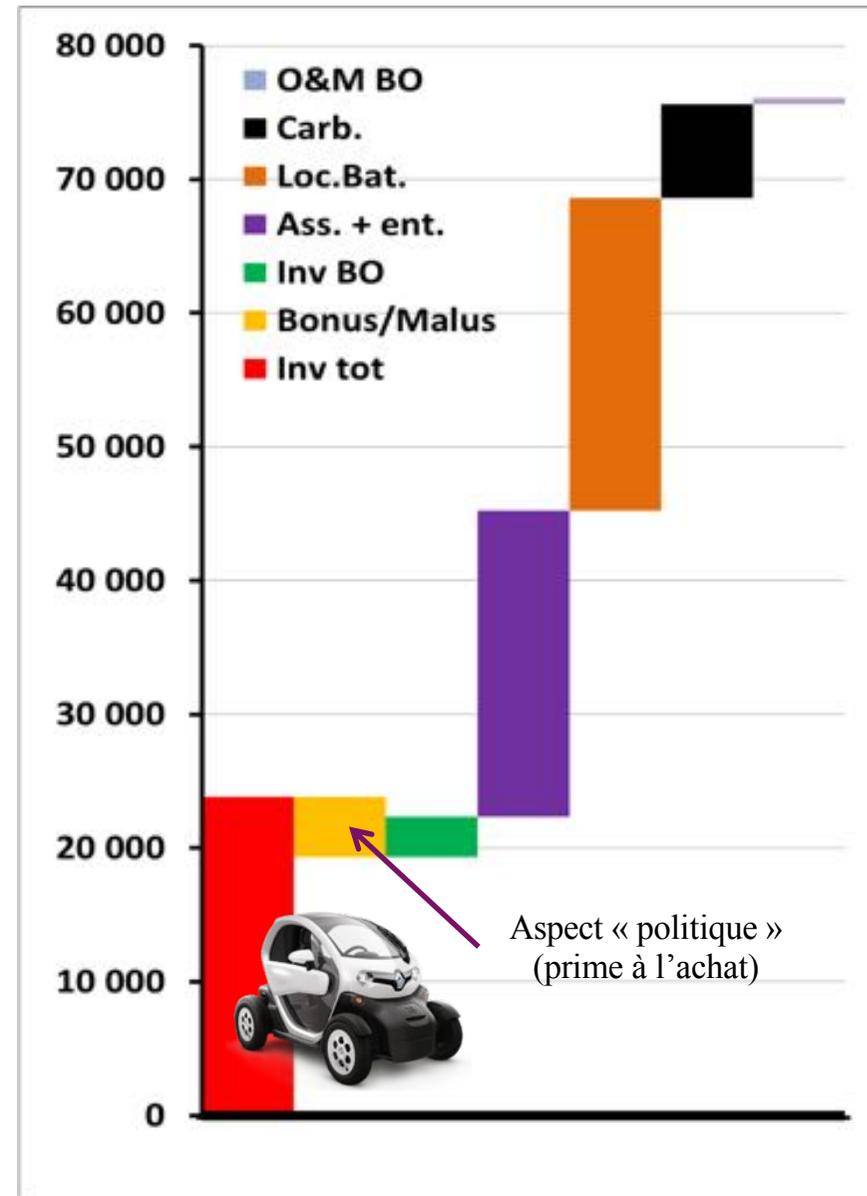
The diagram illustrates the components of the global cost formula. A purple arrow points from 'Durée d'exploitation (années)' to the upper limit 'N' of the summation. Another purple arrow points from 'Investissement' to 'I0'. A purple arrow points from 'Dépenses' to 'Dt' in the numerator of the summation term. A purple arrow points from 'Recettes' to 'Rt' in the numerator. A purple arrow points from 'Valeur résiduelle' to 'VN' in the numerator of the final term. A purple arrow points from 'Taux d'actualisation' to 'a' in the denominator of the final term.

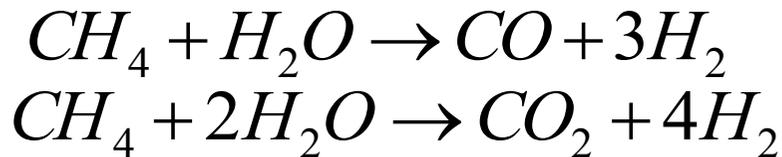
Décomposition d'un « coût » / exemple mobilité (VE)

Investissement +
fonctionnement et entretien +
fluides (électricité, essence, gaz, ...)

Coût « actualisé » (ramené à sa
valeur d'aujourd'hui), notamment
en prenant en compte un « taux
d'actualisation » (= rémunération
du risque = rendement du capital
investi)

Prise en compte d'une « durée de
projet » (durée d'exploitation), qui
intègre les durées de vies des
systèmes, donc les achats et ventes





Coût très sensible au prix du gaz (peut représenter jusqu'à 80% du coût final)

Avec prix du gaz de 40 €/MWh (prix 2009-2011) :
2,0 €/kg.

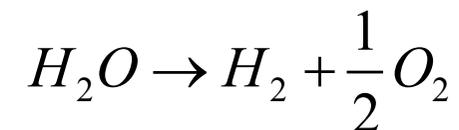
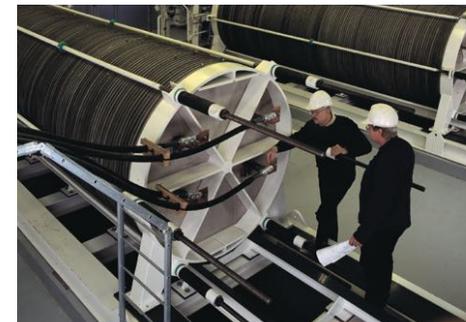
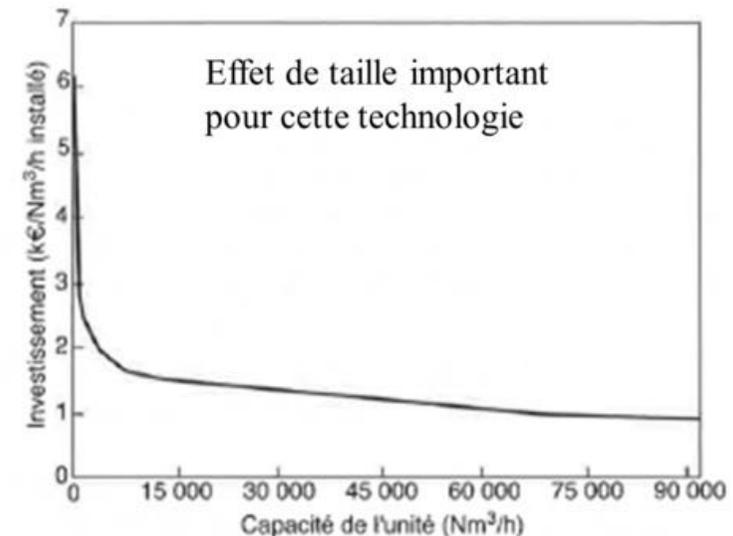
Effets d'apprentissage proche de la saturation

Coût de production très dépendant du prix de l'électricité (~70% du coût) Si on a un coût de l'électricité de 50 €/MWh (EPR dédié ?) : **4 €/kg** - des réductions de coût sont plutôt attendues par effet de série et une mise en commun des auxiliaires de l'installation (dispositifs de stockage, distribution des gaz...)



→ impact des fonctionnements intermittents

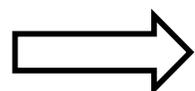
Évolution du **coût d'investissement unitaire** d'une unité de production d'hydrogène en fonction de sa capacité.



Electrolyse PEM

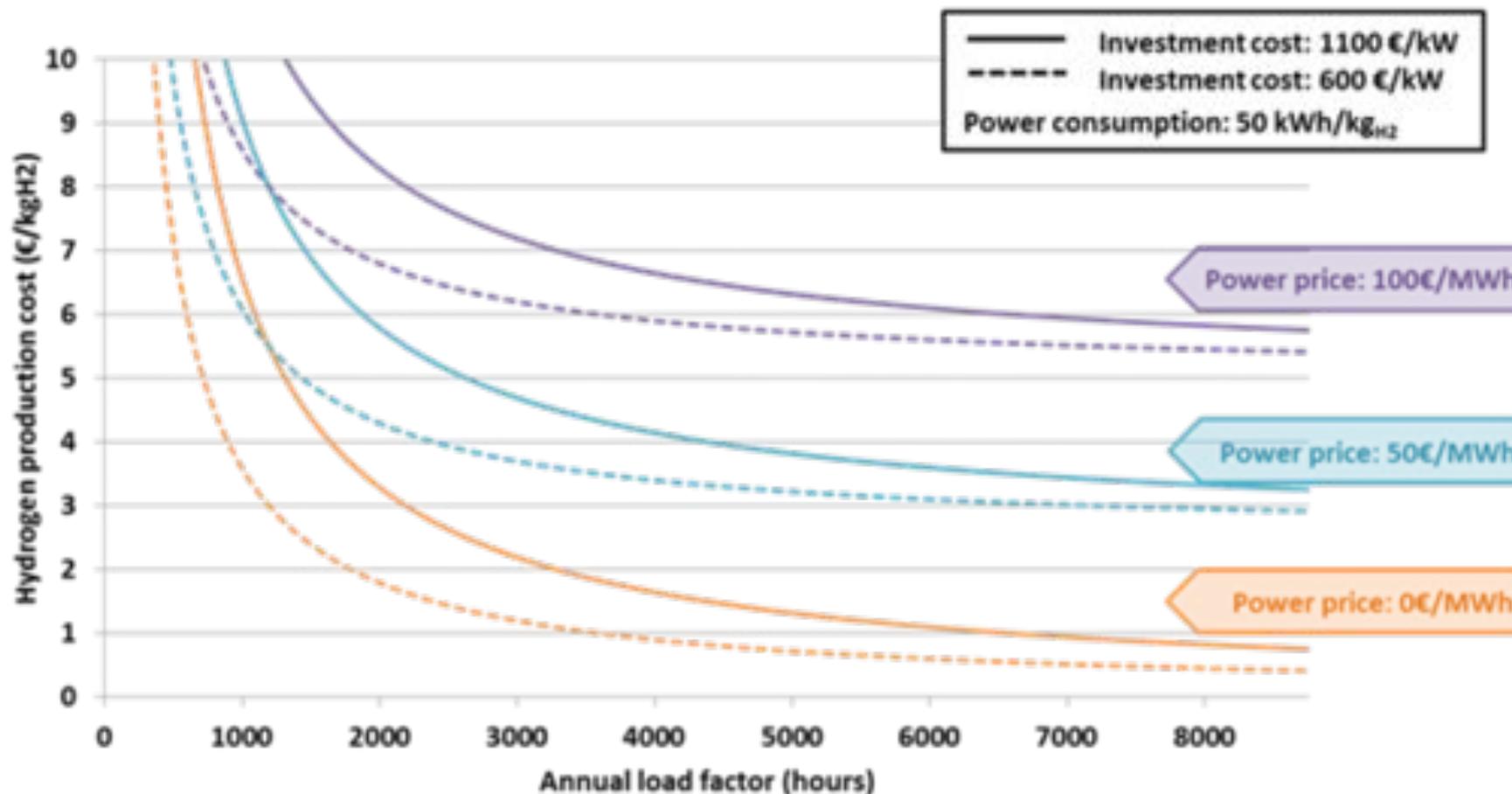
Au départ conçue pour des applications spatiales et militaires, efficaces mais chères, les récents progrès conduisent à des coûts similaires à l'électrolyse alcaline, pour de nombreuses raisons:

- *Capacité à surmonter les problèmes de charge partielle, de courant faible, et de travail à forte pression qui handicapent les électrolyseurs alcalins.*
- *Capacité à fonctionner à des densités de courant élevées, d'où réduction des coûts d'investissements.*
- *Temps de réponse dynamique rapides (de l'ordre de la seconde), donc utilisation d'énergies intermittentes tout à fait possible, larges plages opérationnelles et niveau de pureté de gaz très élevé (99,999%).*
- *Simplicité des équipements auxiliaires, exclusivement eau et électricité.*
- *Efficacité et durée de vie des stacks garanties pour plus de 60 000 heures.*
- *Niveau de maintenance inférieur à celui des électrolyseurs alcalins traditionnels.*
- *Dimensions encore modestes (max env. 200 Nm³/h), mais AREVA H2Gen a dévoilé un concept d'usine de production d'hydrogène de grande capacité de 60 MW lors de la Foire d'Hanovre.*



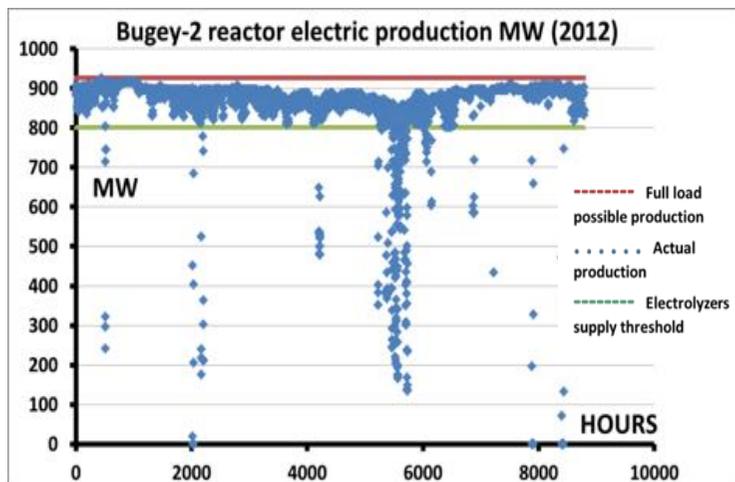
L'investissement est aujourd'hui très proche de celui de l'électrolyse alcaline (c.a. 1000€/kW)

Impacts du taux de charge et du prix de l'électricité



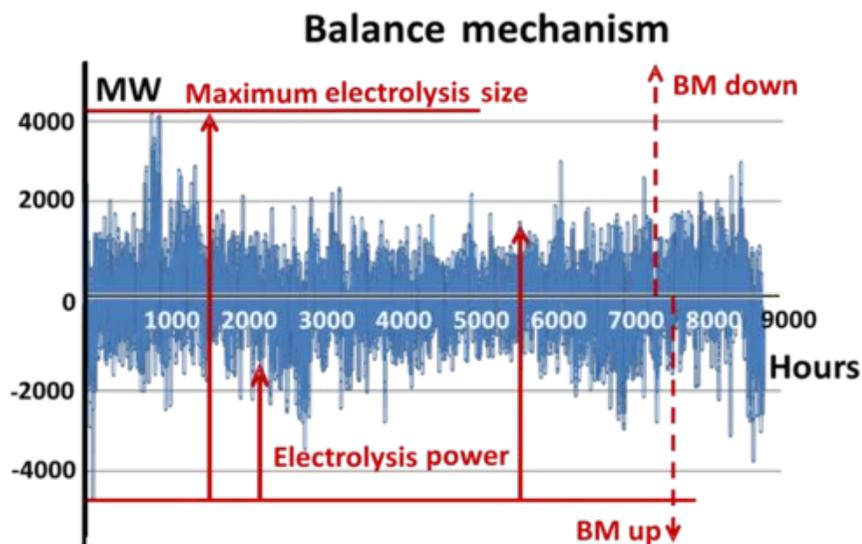
Electrolyse: et si cela rendait des services au réseau ?

HYDROGEN PRODUCTION TO COMPENSATE FOR LOAD FOLLOWING IN NPP



Dans cette zone, au lieu d'assurer le suivi de charge par le RN, on le fait travailler à pleine puissance et on aiguille la puissance en tant que de besoin vers une production d'hydrogène par électrolyse

HYDROGEN PRODUCTION TO COMPENSATE FOR THE BALANCING MECHANISM

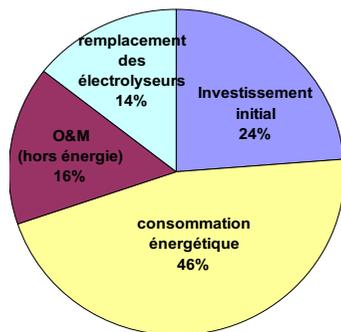


(mécanisme d'ajustement)

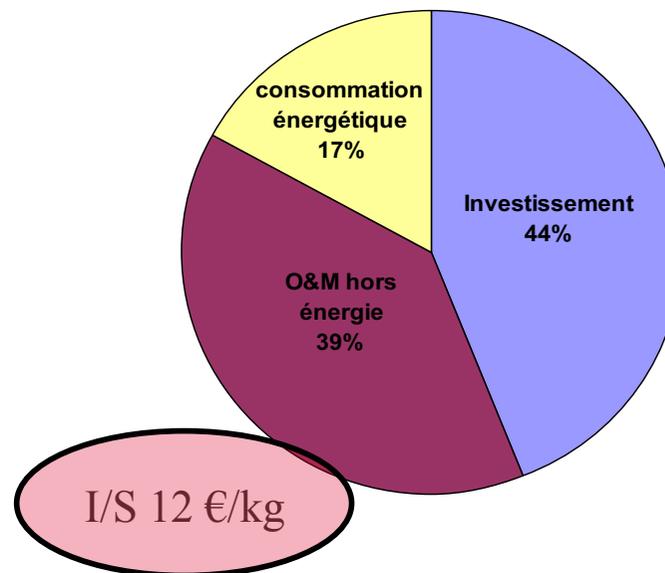
Au niveau du réseau: plutôt que de compenser les variations de la demande à la hausse et à la baisse en réglant la puissance, on travaille à puissance élevée et on aiguille vers la production d'H₂ en tant que de besoin: à minima, on diminue la plage de variation demandée au réseau.

Production d'hydrogène : bilan comparé de divers autres procédés

Remontage du coût de production pour les procédés I/S et EHT



EHT 3,6 €/kg



I/S 12 €/kg

A partir de
biomasse

Etude 2001 par méthode MASIT : 1,68 €/kg
 Etude INNOHYP CA 2005 : 1,20 à 1,68 €/kg
 Rapport HYWAYS 2007 : 2,64 €/kg
 BDD H2A NREL 2008 : 1,52 à 1,64 €/kg

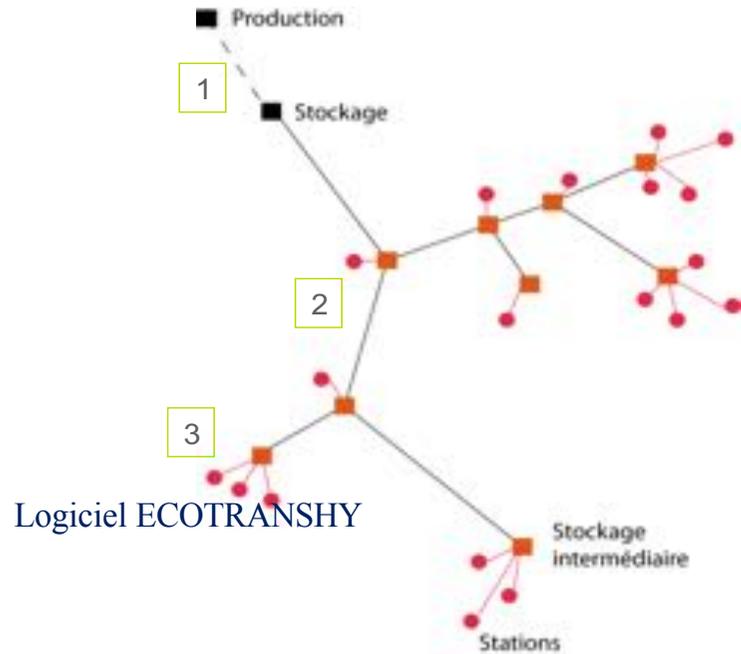
Coût de Production H2 estimé : 1,5 à 2,5 €/kg

Vaporemformage du gaz naturel 1,2 à 1,5 €/kg
Electrolyse alcaline couplée au mix électrique français ≈ 3 €/kg

(source : F Le Naour – Salon des ENR 2010)

Le transport, le stockage massif

Résultat majeur du projet national HyFrance3 (2009 – 2011)



Hydrogen filling
stations
distribution in
2050 for a
penetration rate of
16% in Rhône-
Alpes and PACA
regions

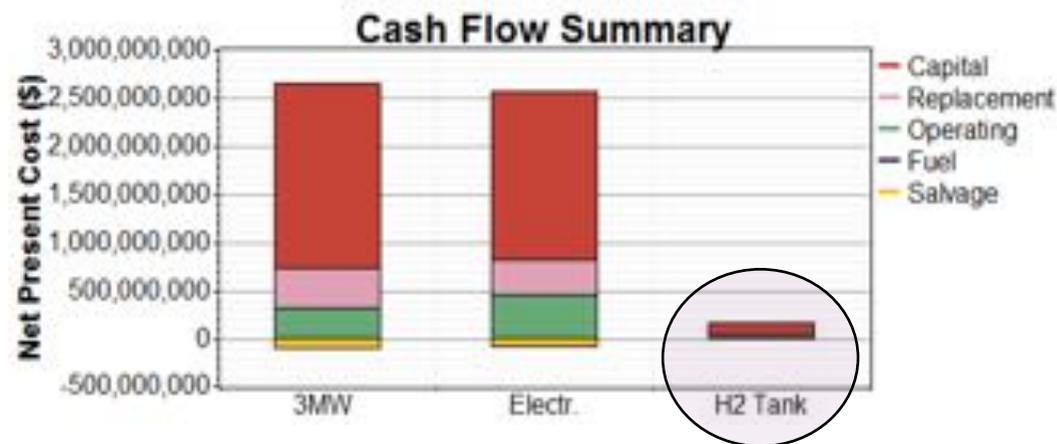
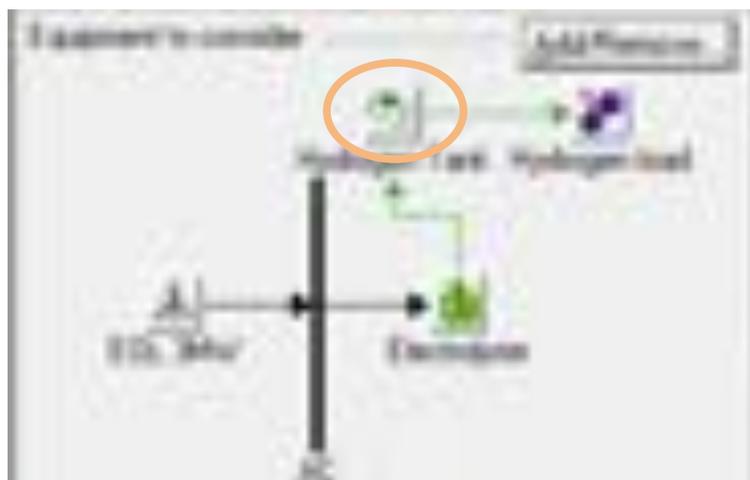


2050 : 345 stations si taux pénétration 16% H2, 860 stations avec 40% H2

Débit total -> 2050	687 000	1 581 000 (tonnes)
Longueur totale	654 km	874 km
Coût unitaire moyen (2050)	413 €/t	432 €/t
Coût de déploiement (cumul->2050)	1953 M€	3552 M€

**Soit un coût
de transport
d'environ
0,5 €/kg H2**

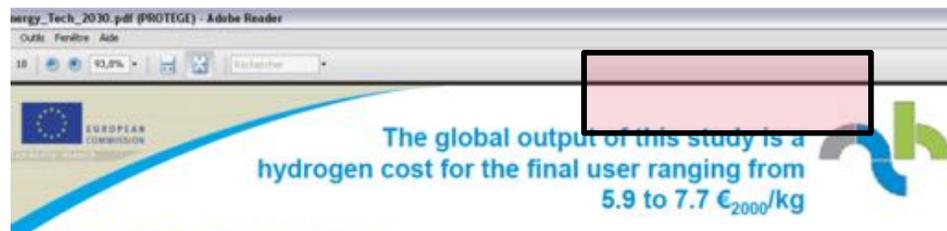
“Assessing the Potential, Actors and Relevant Business Cases for Large Scale Underground Hydrogen Storage in Europe



Calcul « cas Français » par le CEA: résultats similaires à ceux des autres pays (D, Ro, Sp, NL, GB), le coût du stockage massif est très minoritaire.

Un coût très réduit pour le stockage massif souterrain, moins de 0,5€/kg de la supply chain

Des bilans globaux qui n'évoluent guère



Results: Cost for the Final User

- In order to evaluate the cost of hydrogen for the final user, 2 pathways have been considered:
 - **The most mature pathway:** hydrogen produced from steam methane reforming, transported by tube trailers and stored at the filling station
 - **The less CO₂ emitting pathway:** hydrogen is produced by electrolysis, transported by tube trailers and stored at the filling station
- The result for the final user would be an hydrogen available between 49 and 64 €₂₀₀₀/GJ

	Pathway 1		Pathway 2	
	Description	Costs (€ ₂₀₀₀ /GJ)	Description	Costs (€ ₂₀₀₀ /GJ)
Production	Natural gas steam reforming	37,40	Electrolysis	52,52
Transport (50 km)	Tube trailer	6,72	Tube trailer	6,72
Storage	On-site gaseous storage	5,00	On-site gaseous storage	5,00

**Projet Européen Roads2HyCom
(2005 – 2009)**



2012 - 2015

CEA, Air Liquide, Engie, BRGM, Hincio, Alpea

7.5 €/kg at the fuel station

considered in order to be on-par with gasoline prices, given the consumption of a medium sized FCEV of 1kg H₂ / 100km similar to an ICE that consumes 6l gasoline / 100 km.

A “premium” price (or a tax reduction) at the pump might very well be envisaged for green hydrogen in order to monetize its environmental added-value compared to conventional fuels. In that case,

10 €/kg could also be considered

**Soit un coût global de 8 à 10 €/kg à la pompe
(par la voie de production électrolytique)**

La production d'hydrogène reste globalement le plus important facteur de coûts, et dans la production la consommation énergétique (électricité) et de matière première (gaz)

Les cycles thermochimiques sont en voie d'abandon à cause de leurs coûts / l'électrolyse haute température semble très prometteuse

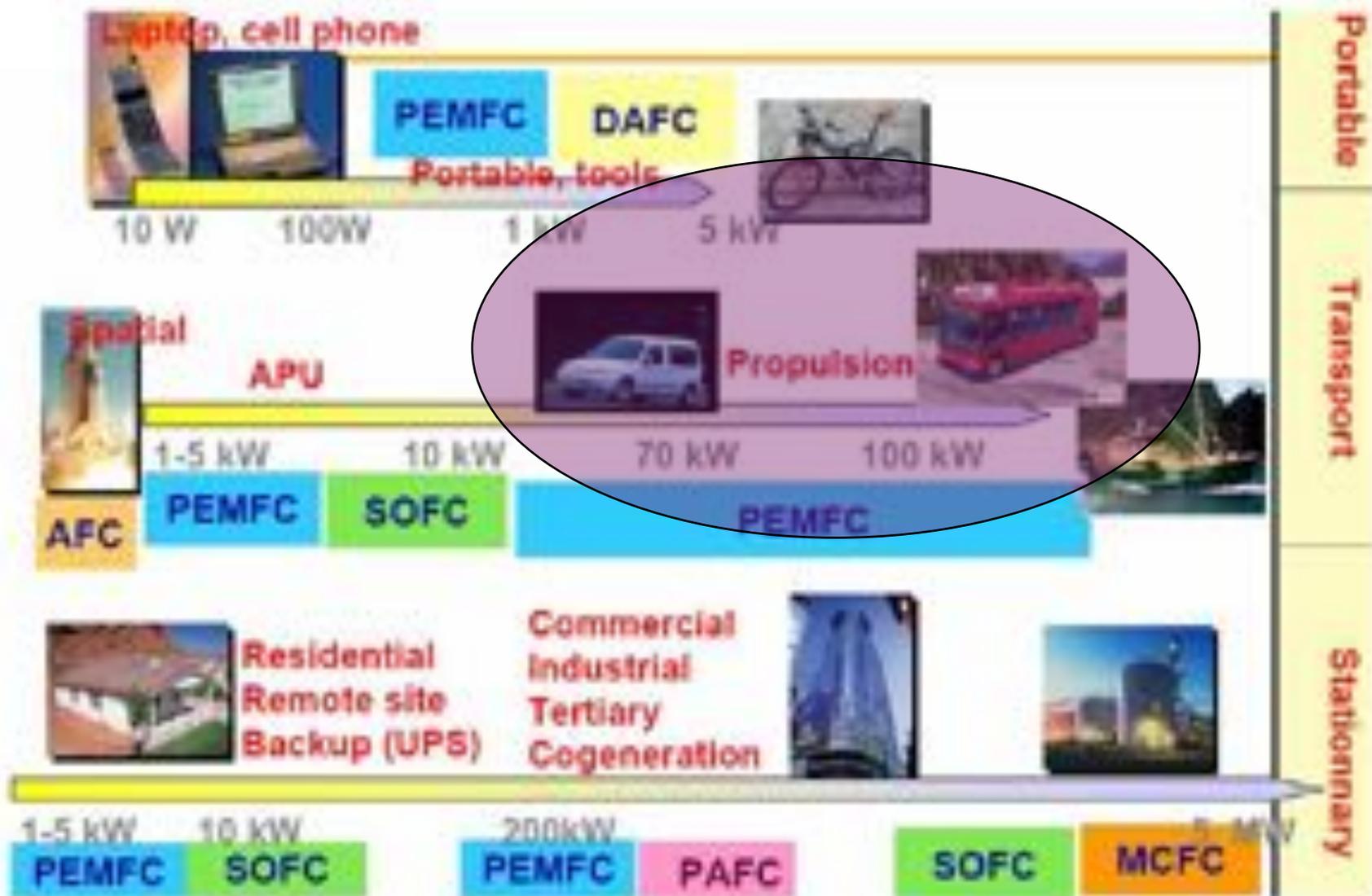
L'électrolyse alcaline reste la solution « de référence » des études, projets et applications, l'électrolyse PEM la rejoint à grand pas. Contrairement au reformage, l'électrolyse ne bénéficie que peu d'un facteur d'échelle (usages décentralisés envisageables)

Les coûts des stockages restent très dépendants de leurs usages (voir plus loin), sauf celui du stockage massif récemment révélé comme très peu cher

L'usage en véhicules

Une grande variété de piles à combustible

Aux caractéristiques et domaines d'applications différents



Réduire les coûts des Piles à Combustible (PàC) et des réservoirs très haute pression

L'usage en véhicules : la nécessaire recherche d'une réduction drastique des coûts des PàC

1- La voie production massive

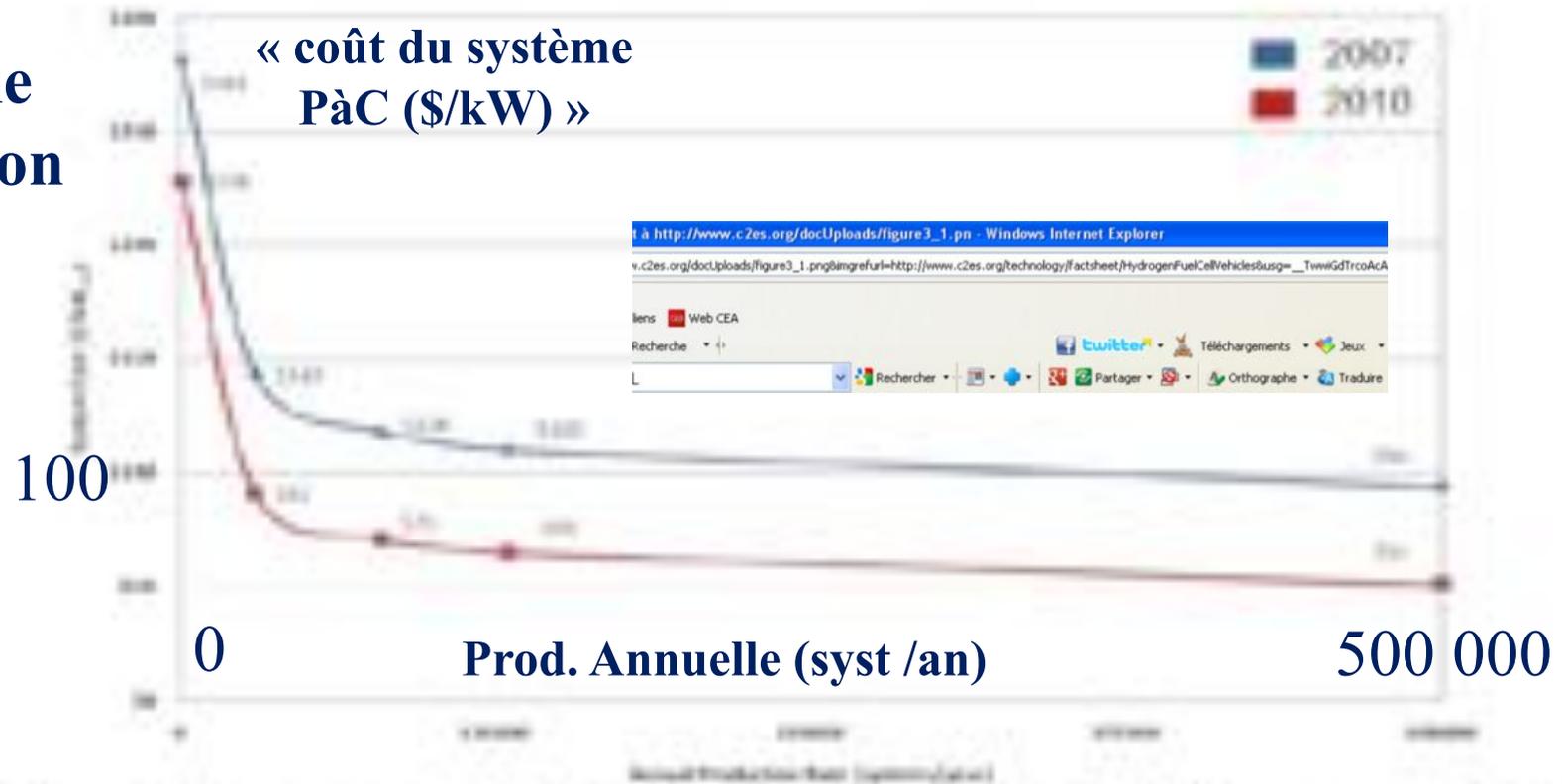


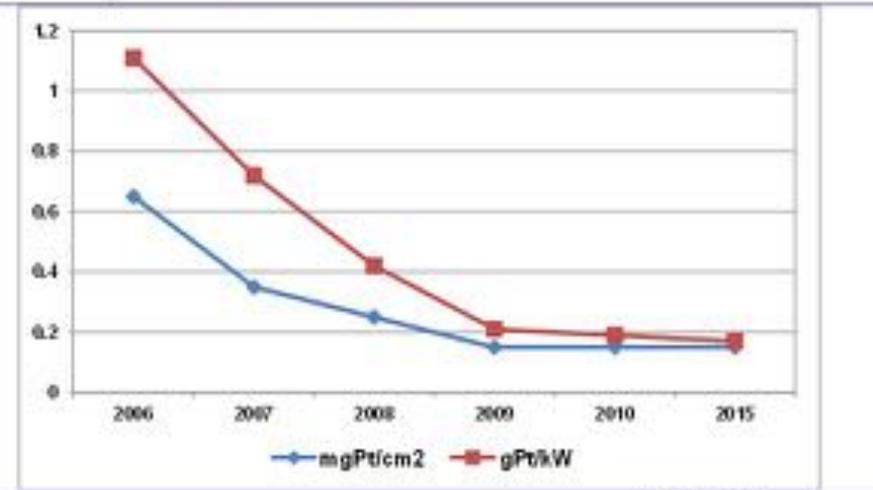
Figure 2. Projected cost of 80-kW_{net} transportation fuel cell systems at 1,000, 30,000, 80,000, 130,000, and 500,000 units/year.

Mais également : **augmentation de la durabilité**; objectif : > **5000 h** pour les applications automobiles, **20 000 h** pour les applications stationnaires

2- La voie réduction de la charge en platine

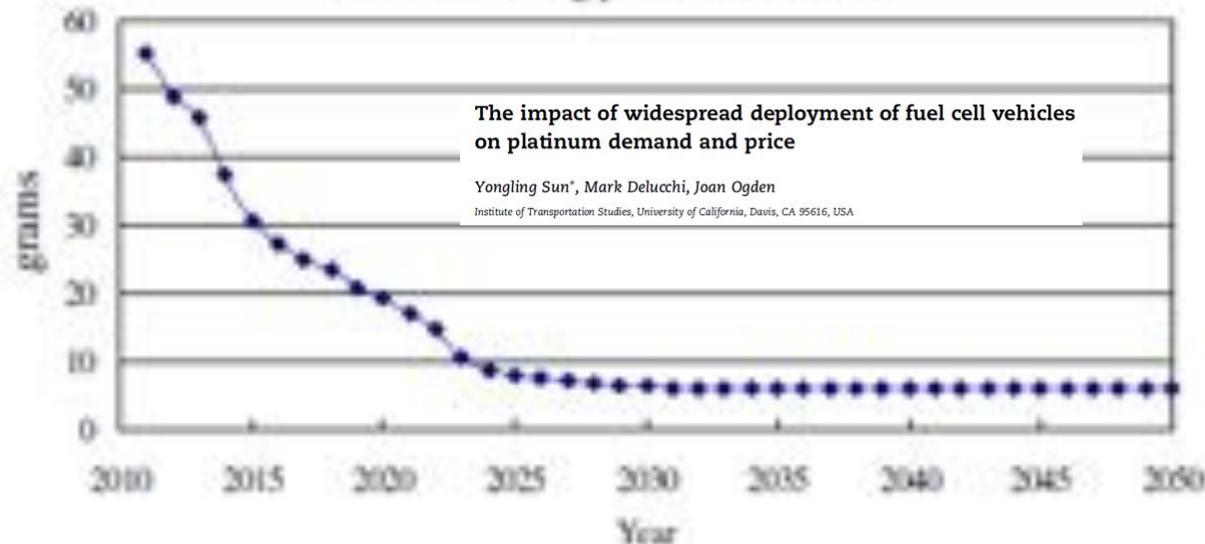
Accent R&D porté sur la **réduction de la quantité de platine** (déjà réduction facteur 10 depuis 2001 / objectif : 0,1g/kW)

Platinum Loadings in PEM Fuel Cells: 2006-2015



(Source: DOE)

Platinum loading per FCV over time



Aujourd'hui,
typiquement 5 g dans
un pot catalytique

Réservoir ULLIT 350 bars de 36 litres : (sur devis) 4700 € environ, pour 900g d'H₂ stockés, soit environ 5200 €/kg (mais production actuelle faibles quantités).

L'étude menée dans le projet POLYSTOCK a montré qu'un **coût de fabrication de 400€/kg (d'hydrogène stocké)** pouvait être atteint pour des productions massives de ce type de réservoirs.

Pour du 700 bars, on peut garder en tête les mêmes ordres de grandeurs de prix rapporté au kg d'hydrogène stocké (au augmente la capa de stockage et on rajoute des fibres de carbone, au final le prix au kg est du même ordre de grandeur).

Le stockage embarqué

Objectif	2015	2015	Ultime*
	meilleur	ancien	meilleur
Densité massique du système (% pds) (kWh/kg)	[3,5] (1,8)	[9] (3,0)	[7,5] (2,5)
Densité volumique du système (g/L) (kWh/L)	[40] (1,3)	[81] (2,7)	[70] (2,3)
Temps de remplissage pour remplir 5 kg (min.) (kWh/min.)	[3,3] (1,5)	[2,5] (2,0)	[2,5] (2,0)
Coût du système (\$/kgH ₂) (\$/kWh _{stocké})	n.d. n.d.	[67] (2)	n.d. n.d.

Pour les applications futures, le DoE place la barre à 67\$/kg H₂...

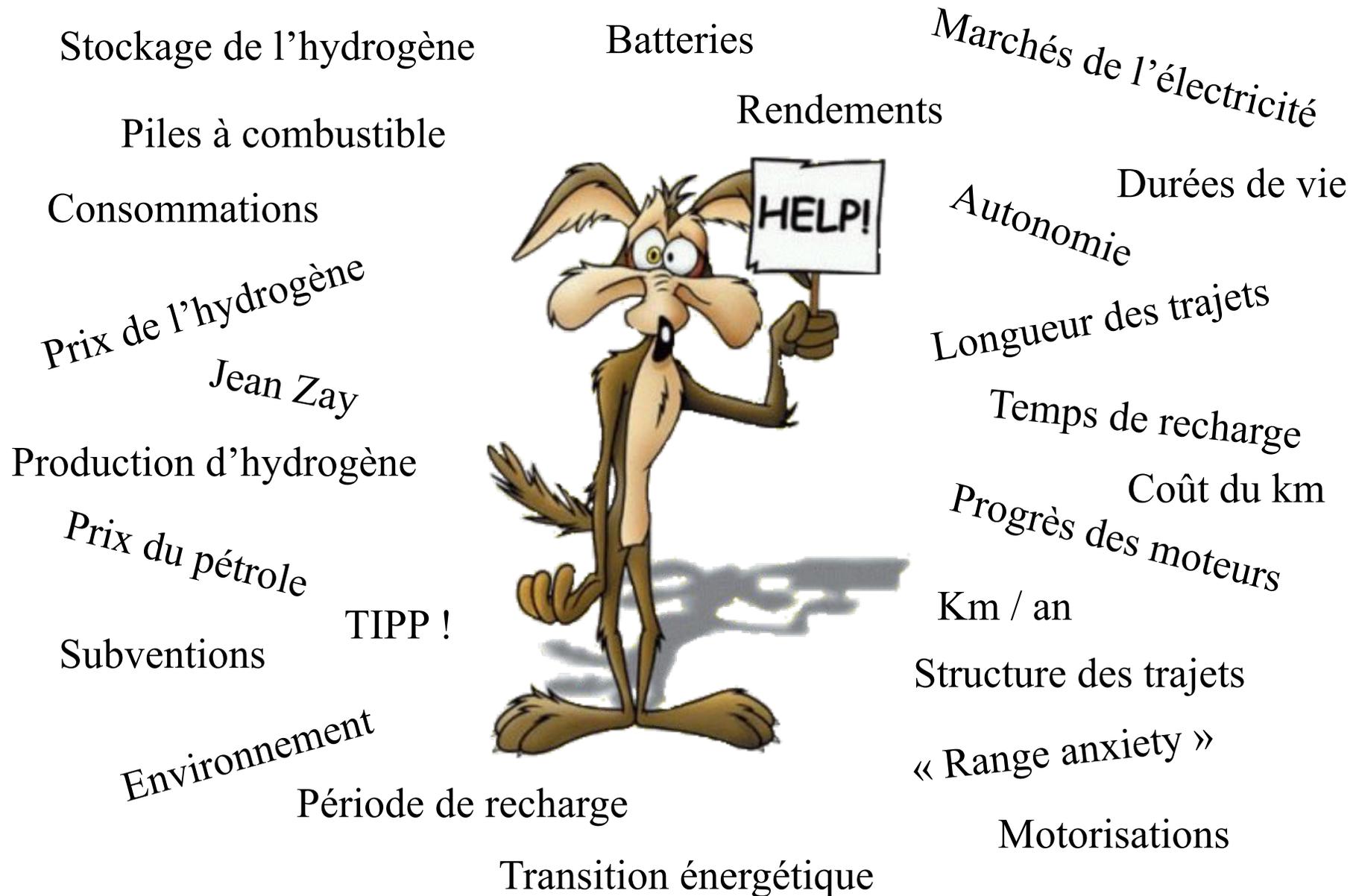
200 to 100€/kg stored ca. 2030 - 2050

Vision « inverse »: quel coût objectif pour
l'hydrogène sur le lieu d'utilisation ?

(cas particulier d'un marché viable: la mobilité)

*Un raisonnement sur les **COÛTS***

La mobilité est un sujet bien complexe



L'usage en véhicules

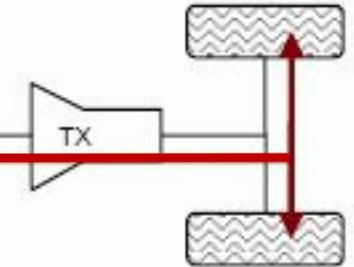
H2 en alternative
aux batteries

Véhicule « classique »

Automobile moyenne
française : 70 à 100 kW

Réservoir
carburant

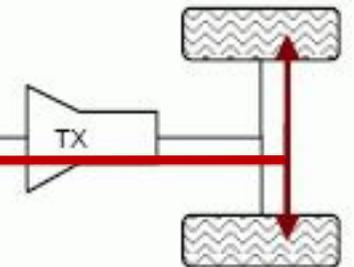
ICE



Véhicule électrique à
hydrogène seul

Réservoir H2
+ PàC

Mot.
Elec

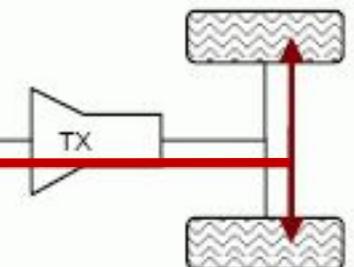


H2 en complément
des batteries

Véhicule électrique à
pile à combustible en
RE (Range Extender)
de batterie plug-in

Réservoir H2
+ PàC

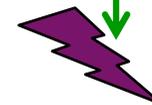
Mot.
Elec



PàC 5 kW



Batterie plug-in



HyKangoo (SymBioFuelCell and Renault)

L'hydrogène peut jouer un rôle central dans la mobilité suivant 2 axes

1^{er} axe VE: l'hydrogène en alternative aux batteries (1/2)

**Batterie
Autonomie ET
puissance**



+ récupération au freinage, soutien au réseau (V2G) et réglage fréquence primaire

*Pour 100 km
Ca. 20 kWh*

Autonomies encore limitées à quelques centaines de km (progrès possibles)

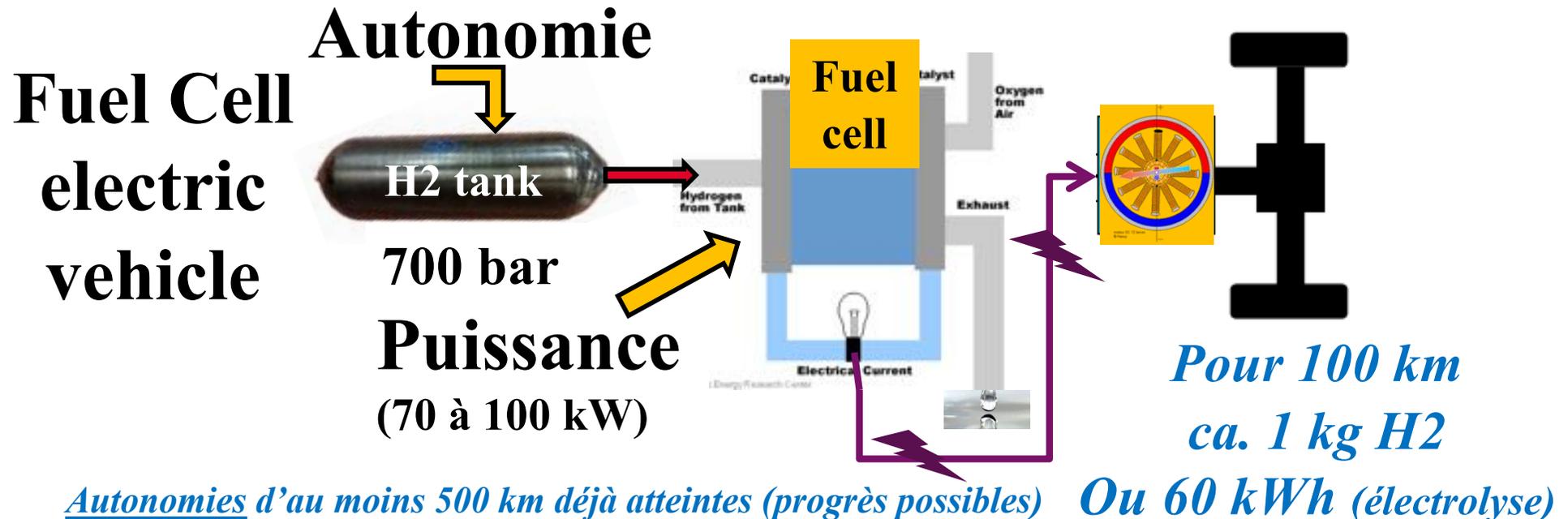
Recharges (très) lentes (ou recharges rapides nécessitant un renforcement du réseau)

Compétitivité vs. véhicules MCI assurée si productions massives et progrès sur batteries

.... et accrue sensiblement si taxe CO2 sur MCI, subventions d'Etat (ou investissements à taux bas, nuls, voire négatifs), taxes réduites ou nulles au départ

L'hydrogène peut jouer un rôle central dans la mobilité suivant 2 axes

1^{er} axe VE: l'hydrogène en alternative aux batteries (2/2)



$$[\text{€}_{FC\text{system}}, \text{€}_{H2\text{pump}}] = [\text{€}40/\text{kW}, \text{€}7/\text{kg}]$$

.... et accrue sensiblement si taxe CO2 sur MCI, subventions d'Etat (ou investissements à taux bas, nuls, voire négatifs), taxes nulles au départ sur H2

..... ET industrie hydrogène valorisable dans autres applications

Mais: la mobilité, c'est des besoins spécifiques

Diagramme « moyen »
de mobilité (France)
15 500 km/an
(rapport CGDD 2011)



Besoin total



Beaucoup de trajets de
courtes distances



Notion de « range-extend » hydrogène

Un complément à
satisfaire

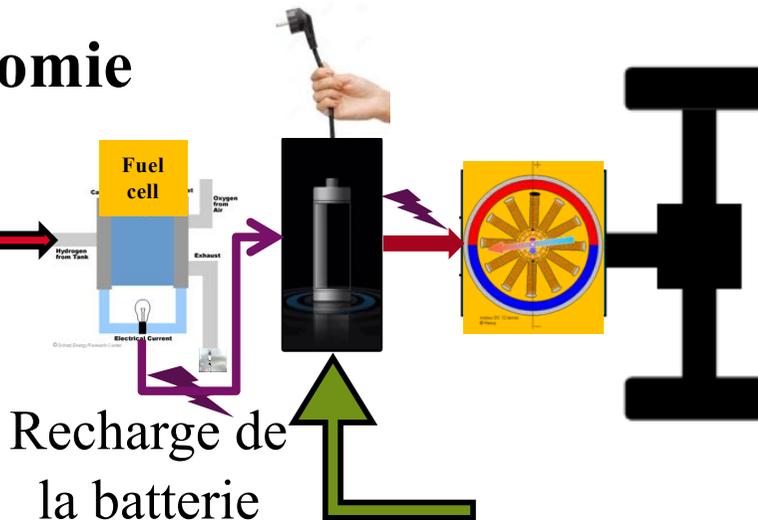


L'hydrogène peut jouer un rôle central dans la mobilité suivant 2 axes

2^{ème} axe VE: l'hydrogène en complément des batteries

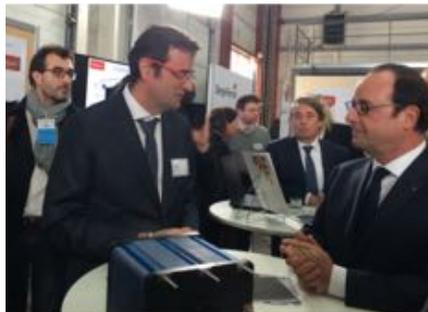
Plug-in battery
+ **FC range extender**

Ajout d'autonomie



Recharge de la batterie

Un peu d'autonomie, Puissance, + récupération au freinage, soutien au réseau (V2G) et réglage fréquence primaire



*... d'où des **PàC de bien plus petites puissances (la PàC coûte en puissance) dimensionnées sur la Vitesse moyenne du véhicule (typiquement 10 à 15 kW max au lieu de 100 kW)***

$[\text{€}_{FC\text{system}}, \text{€}_{H2\text{pump}}] = [\text{€}40/\text{kW}, \text{€}10 \text{ à } 15/\text{kg}]$

$[\text{€}_{FC\text{system}}, \text{€}_{H2\text{pump}}] = [\text{€}40/\text{kW}, \text{€}7/\text{kg}]$ en « full H2 »

A real interest to associate hydrogen (fuel) and rechargeable battery!

A (daily) electric mobility satisfied by charging the battery on the network (20 kWh / 100 km)

+

A fuel cell far less powerful than for "full hydrogen" mobility (60 kWh / 100 km)

=

**An acceptable hydrogen cost much higher at the pump
So the market is reachable, benefits and taxes
become possible**

And a bonus ! at least 5 times less critical materials

[On the compétitivité of electric driving in France: Impact of driving patterns](#)

by: The Duigou, A .; Guan, Y .;Amalric, Y.

RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS Volume: 37 Pages: 348- 359 Published: SEP 2014

[On the comparison and the complementarity of batteries and fuel cells for electric driving](#)

By: The Duigou, Alain; Smatti, Aimen

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Volume: 39 Issue: 31 Pages: 17873-17883 Published: October 2014

A real interest to associate hydrogen (fuel) and rechargeable battery!

HyKangoo (SymBioFuelCell and Renault)

FC 5 kilowatts! (city and suburbs delivery)



Autonomy: 160 km battery (rather 80 km ...) + 160 km H₂ (1,6 kg)
Cost lower than full H₂ or battery electric vehicle

The **Horizon Hydrogène Énergie (H2E)** program (Air Liquide) :
innovation platform / **19 partners** / Hydrogen Energy industry in France by meeting the needs of the
early markets. **€ 190 millions over 7 years**. Funded by the partners + **€ 67 millions** grant from
French innovation agency **Oseo**.
Investissement R&D entreprise

**Calls for projects launched in 2011
(ADEME):**

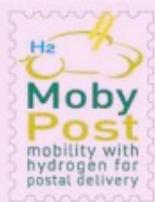
- important fleet demonstrations in the East of France in 2013 : MoBilHyTest,
- development of the use of H2/NG mix : GRHYD.

*Projet national (co-financement
ADEME, ANR, ...)*

Initiative départementale



Le conseil général de la Manche a inauguré
lundi la première station-service d'hydrogène en
France, destinée à cinq véhicules de la
collectivité fonctionnant avec ce carburant.



MOBILITY WITH
HYDROGEN FOR
POSTAL DELIVERY

Start of the project: February 2011 - Project Duration: 36 months -
MobyPost is co-financed by **European funds from the FCH-JU-
2009-1** Grant Agreement Number 256834

Projet européen

Pour tester la mobilité hydrogène ...

.... Demandez à Son
Altesse Sérénissime



....Ou faites le vous-même !



Taxis à
Paris, pont
de l'Alma



IMPACT ULHyS

Université de Lorraine Hydrogène Sciences et Technologies

Le projet IMPACT ULHyS, Université de Lorraine Hydrogène Sciences et Technologies, a pour ambition de fédérer les actions de recherche sur l'hydrogène-énergie au sein de LUE. Ce projet est animé par Fabrice Lemire, porteur scientifique et par Huguette Desvire, projet manager, soutis par un Comité de pilotage d'une dizaine de professeurs représentant les axes stratégiques du projet.

Construit autour des laboratoires historiquement reconnus dans l'hydrogène, le projet ULHyS implique de nouveaux acteurs. Ce sont notamment 10 laboratoires qui sont impliqués et qui contribuent à construire une vision et stratégie de cette filière technologique.



La coopération participe à différentes actions nationales et européennes :



10101010
00101111
2011

CONFIANCE DANS LE NUMÉRIQUE

RESSOURCES NATURELLES ET ENVIRONNEMENT

SPÉCIALISÉS

ÉNERGIE DU FUTUR ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

IMPACT ULHyS

- Hy - PRODUCTION
- Hy - PILE À COMBUSTIBLE
- Hy - STOCKAGE
- Hy - SÉCURITÉ
- Hy - ÉCONOMIE

INDICATEURS DE LA QUALITÉ ET DES COMPÉTENCES

NANCY

Il se chauffe à l'hydrogène

La première maison de la métropole chauffée à l'aide d'une pile à combustible vient d'être équipée à Vandœuvre. Le propriétaire, Eric Caissial, et l'installateur, présentent les enjeux et les avantages de cette technologie écoénergétique.

12/04/2019 | LE PREMIER ÉCO-LOGE | 10/4/2019 LE PREMIER ÉCO-LOGE | 10/4/2019 | [EDITION ABONNÉ](#)

La première maison de la métropole chauffée à l'aide d'une pile à combustible vient d'être équipée à Vandœuvre. Le propriétaire, Eric Caissial, et l'installateur, présentent les enjeux et les avantages de cette technologie écoénergétique.



Partager    

C'est un peu « grâce au coût élevé du carburant à la pompe » que l'hydrogène est aujourd'hui compétitif, s'il est massivement développé, dans la mobilité

La compétitivité dans la mobilité est réalisée si le déploiement des véhicules à pile à combustible devient « massif »

La mobilité est un sujet complexe, et la variété des usages devrait conduire à l'intérêt de faire habilement coopérer les stockages d'énergie par batterie et par hydrogène

La solution « range-extend » semble être la plus adaptée à un démarrage à la fois suffisamment massif et prudent de la mobilité hydrogène: nombreuses utilisations en démonstration En France

Merci de votre attention !

ENERGY OBSERVER : DES PERSPECTIVES
"ASSEZ INCROYABLES" POUR LA FILIÈRE
HYDROGÈNE (EDOUARD PHILIPPE)

**Une technologie n'a pas besoin
d'être plus performante pour être
adoptée mais que c'est parce qu'elle
est de plus en plus adoptée qu'elle
devient performante (François
Lévêque, Mines ParisTech)**

«Pour l'instant, on est à un point zéro, l'idée c'est de développer la filière. Avec l'hydrogène, on va notamment résoudre cette difficulté de l'intermittence des énergies renouvelables, parce qu'on peut le stocker durablement» (Nicolas Hulot)

alain.le-duigou@cea.fr

« Le plan hydrogène de Hulot a été salué par les industriels. Mais il faudra plus que les 100 millions d'euros pour doper la filière. » (La Tribune)

Plan hydrogène : un outil d'avenir pour la transition énergétique



Le Vendredi 1 juin 2019





Association française
pour l'hydrogène et
les piles à combustible

ACCUEIL ASSOCIATION DOCUMENTATION ACTUALITÉS ESPACE MEMBRES

ESPACE PRESSE CONTACT

AFHYPAC
Association française
pour l'hydrogène et
les piles à combustible

HYNNOVATIONS
NEWSLETTER #Hy

À LA UNE...

faurecia

FAURECIA ET LE CEA
VONT DÉVELOPPER
ENSEMBLE UNE PILE À
COMBUSTIBLE

10 septembre 2017

Pendant cinq ans, le CEA et
Faurecia vont travailler sur un projet
de recherche et développement

POUR UNE FILIÈRE
HYDROGÈNE
D'EXCELLENCE EN
AUVERGNE-RHÔNE-
ALPES

14 septembre 2017

Porte d'une concentration
exceptionnelle des acteurs de la

MERCEDES PRÊT À
COMMERCIALISER SA PILE
À COMBUSTIBLE

11 septembre 2017

Un regard évêché saura distinguer
les quelques signes de
reconnaissance de la version F-Cell
du SUV Mercedes-Benz GLE : un

DÉRIERS ARTICLES

11 septembre 2017
LA PILE À COMBUSTIBLE EST-ELLE
L'AVENIR DE L'AUTOMOBILE ?

08 septembre 2017
DE NOUVEAUX MEMBRES
REJOignent LE « HYDROGEN
COUNCIL »

07 septembre 2017
CAPÉNERGIES S'INTERESSE DE
PRES À L'ELECTROMOBILITE

07 septembre 2017
SIFV - LA GRANDE OFFENSIVE

Adhérer à l'Association

Merci de votre attention !



alain.le-duigou@cea.fr

Réserve

Hydrogène : « La filière française va enfin décoller » (La Tribune, 29/01/2014)

Suite à des initiatives dès 2010 (HyPac, AFHYPAC, « pressions » auprès des ministères)

Suite à la publication d'un rapport de l'OPECST "l'hydrogène : vecteur de la transition énergétique ?", le ministre du redressement productif a annoncé la rédaction d'une feuille de route pour structurer la filière à l'échelle nationale.

Dans le Tarn, Arnaud Montebourg veut booster la filière de l'hydrogène

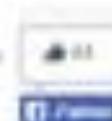
Le ministre du redressement productif a notamment visité le site de Trfy à Labrousse-Candès. Il s'agit de lancer une véritable filière française de l'hydrogène. *Énergie de l'avenir*

Par France Presse - Publié le 29/01/2014 à 11:51 - Mis à jour le 29/01/2014 à 11:51



© Myriam Bricau - France 3 Midi-Pyrénées - Arnaud Montebourg lors de sa visite dans le Tarn.

Et si l'hydrogène devenait une source d'énergie principale ? En visite dans le Tarn ce lundi, Arnaud Montebourg s'est intéressé à cette filière, notamment en visitant le site de Trfy, établissement public pour la valorisation des déchets dans le Tarn. Le site de Labrousse-Candès est le premier au monde à transformer les déchets ménagers en





MOBILITÉ HYDROGÈNE FRANCE

Proposition d'un plan de déploiement national des véhicules hydrogène

H2 MOBILITÉ FRANCE :

CONSORTIUM REGROUPANT
L'ENSEMBLE DES ACTEURS DE LA
FILIÈRE : DES ENTREPRISES DE
L'ÉNERGIE AUX UTILISATEURS

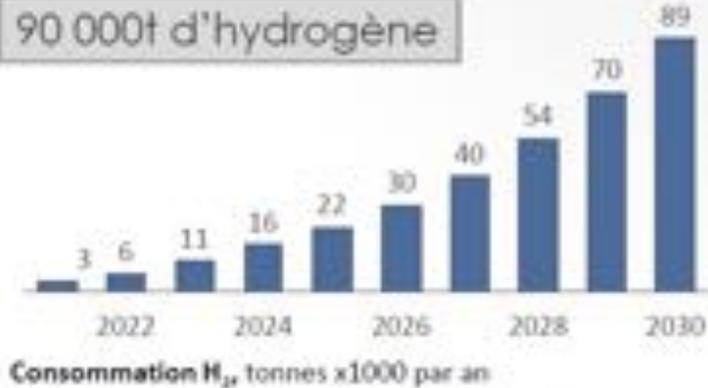
Gouvernement	
Entreprises de l'énergie	
Producteurs d'hydrogène et stations	
Véhicules et systèmes pile à combustible	
Electrolyseurs	
Centres de Recherche	
Associations régionales et pôles	
Associations européennes et françaises	

LE MARCHÉ DES VÉHICULES HYDROGÈNE POURRAIT REPRÉSENTER EN 2030 :

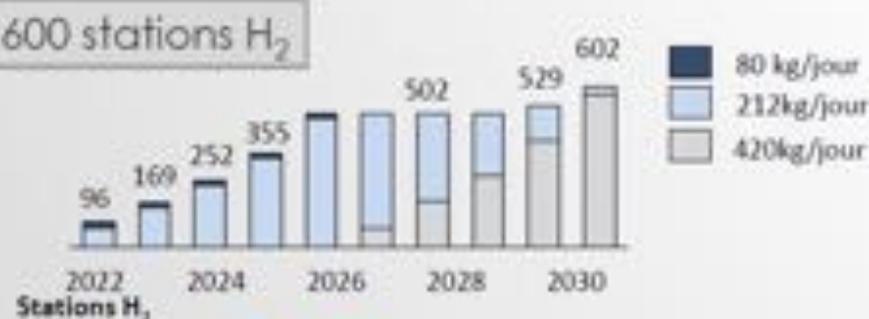
800 000 véhicules



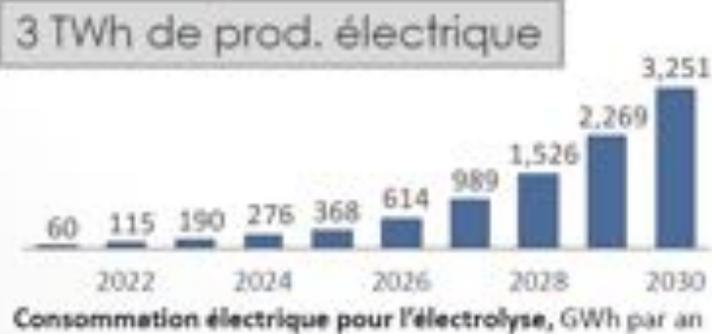
90 000t d'hydrogène



600 stations H₂



3 TWh de prod. électrique



L'APPROCHE FLOTTE CAPTIVE : UNE MANIÈRE DE DÉMARRER LE MARCHÉ, AVANT UN DÉPLOIEMENT NATIONAL COMPLET

Déployer les premiers Clusters

Faire les Clusters

Couverture nationale

Clusters

- Des investissements raisonnables
- Des stations H₂ chargées

Déclencheurs du plan national

- Disponibilité réelle des véhicules à des prix de marché
- une réglementation adaptée
- Un support politique clair
- Des intentions marquées des clients

Déploiement national

- Déploiement d'une infrastructure qui donne une bonne qualité de service aux clients

Le plan de couverture réel sera défini lors des prochaines étapes.

2017

2020

2025

2030

Source : www.ademe.fr

■ Area where H₂ provides coverage & H₂ in place as of 2014 — Highway with H₂

CONCLUSIONS ET PROCHAINES ÉTAPES

UN PLAN RÉALISTE POUR LE DÉPLOIEMENT D'UNE
INFRASTRUCTURE HYDROGÈNE NATIONALE A ÉTÉ
ÉTABLI

IL PERMET UN DÉMARRAGE RAPIDE D'UN
MARCHÉ RENTABLE

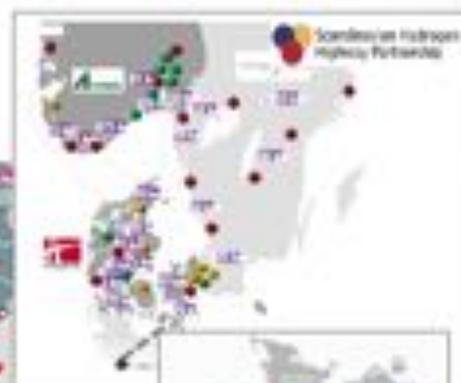
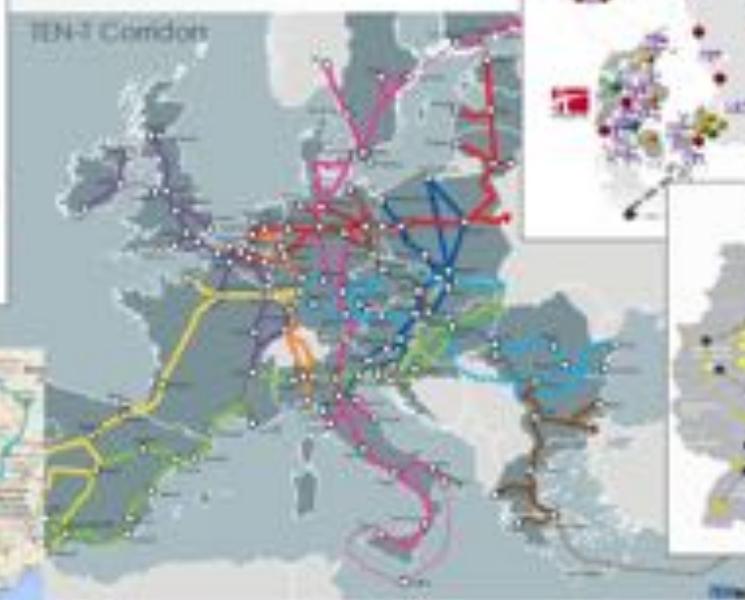
RÉFÉRENCES

AFHYPAC : <http://www.afhypac.org/>

Etude ADEME : [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis -
ademe-hydrogene-et-te-201602.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-hydrogene-et-te-201602.pdf)

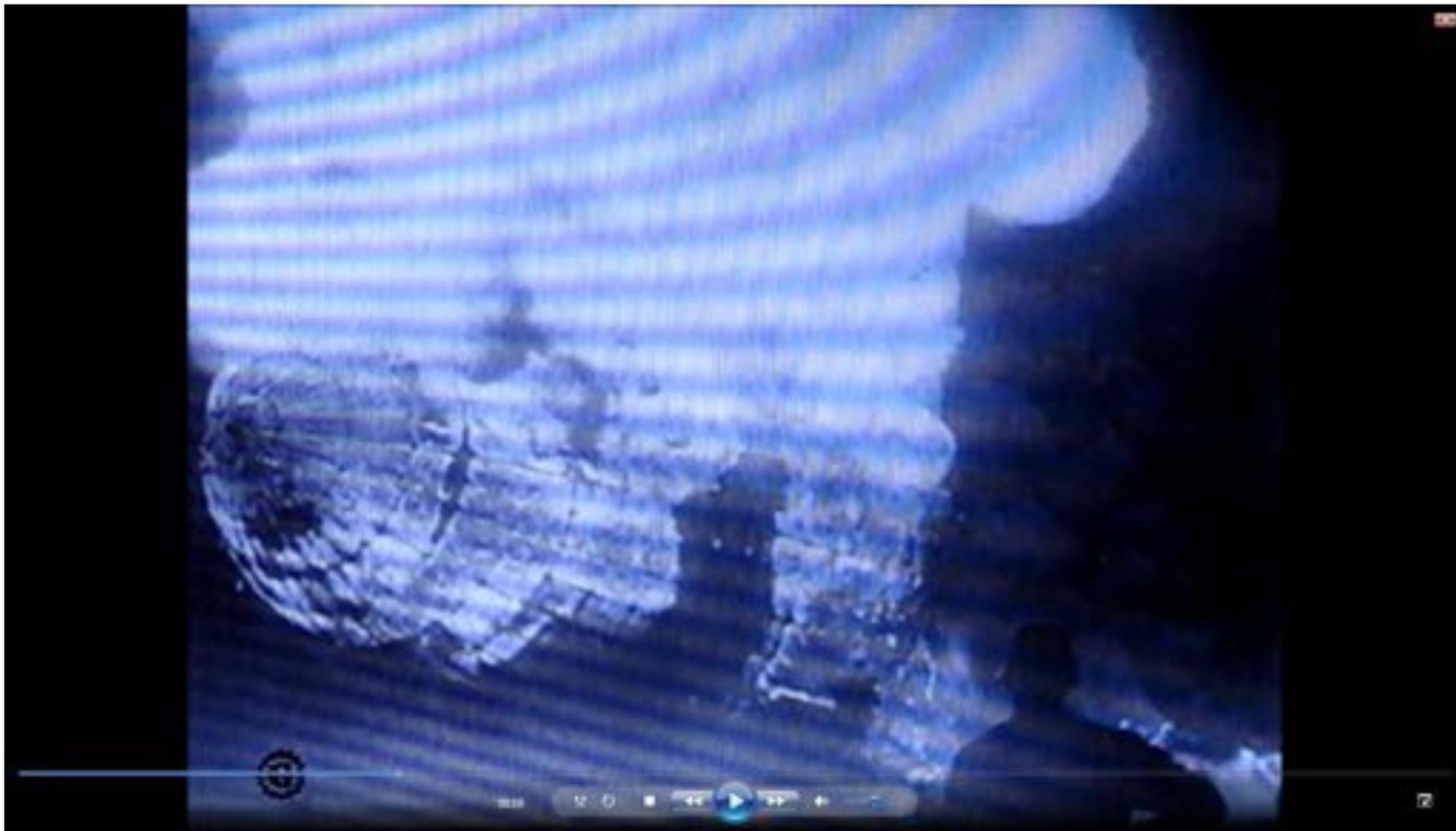
Etude Mobilité Hydrogène France : [http://www.afhypac.org/mobilite-hydrogene-
france/](http://www.afhypac.org/mobilite-hydrogene-france/)

LE REGROUPEMENT DES INITIATIVES H2 MOBILITÉ EXISTANTES PERMET D'INITIER UN RÉSEAU HYDROGÈNE EUROPÉEN



Source : 

La question de la Sûreté



..... qui tend à s'estomper

La question de la Sûreté

Nécessité d'éloignement par rapport à la source d'énergie nucléaire, pour des raisons **de sûreté**



	German Guide (< 30 kPa)	American Guide (< 7 kPa)
al Plant	121 m	814 m

Des distances d'éloignements qui dépendent fortement des hypothèses et des réglementations

Des questions déjà prises en compte : cas du couplage des procédés hautes températures aux RN

HYTHEC

SAFETY ASSESSMENT



Chemical Plant – VHTR interaction

Fires and explosions: (HYSAFE)

Safety Distance :

$$R = k * M^{1/3}$$

R: distance in m.

M: mass of TNT equivalent in kg
(1 kg H₂ \diamond 26.5 kg TNT)

	German Guide (< 30 kPa)	American Guide (< 7 kPa)
Chemical Plant One hour production = 3.5 t of H ₂ gas	121 m	814 m
Storage Facility Without the domino effect: One tank = 100 t of cryogenic liquid	171.1 m	2490 m
Storage Facility With the domino effect: 20 tanks = 2000 t of cryogenic liquid	466 m	6761 m

German BMI Guideline (overpressure 30 kPa)

k = 8 gaseous (production plant)

k = 3.7 cryogenic liquids (storage tanks)

US-NRC Regulatory Guide (overpressure 7 kPa)

k = 18



Réglementation Hydrogène et Piles à combustible

Comité technique **ISO3 TC 197 “ Technologies de l’Hydrogène ”** créé en 1990 afin d’élaborer des normes dans le domaine des systèmes et dispositifs de production, de stockage, de transport, de mesurage et d’utilisation de l’hydrogène. Secrétariat Canada, la France, par l’intermédiaire de l’AFNOR (Association Française de NORmalisation), est membre participant de l’ISO TC 197 (autres pays : USA, Allemagne, Italie, Norvège, Suède, Argentine, Japon)

Différentes publications issues de l’ISO TC 197 :

ISO 13984 : 1999 « Liquid Hydrogen - Land vehicle fuelling system interface » (*Connecteurs de remplissage des véhicules en hydrogène liquide*)

ISO 13985 : 2006 « Liquid hydrogen – Land vehicle fuel tank »

ISO 14687 : 1999 & ISO 14687 : 1999/Cor 1 : 2001 « Hydrogen fuel - Product specification » (*Spécifications du carburant hydrogène*)

ISO/PAS 15594 : 2004 « Airport H2 fuelling facility » (*Spécifications techniques concernant la distribution d’hydrogène dans les aéroports*)

Etc

Comité technique **IEC4 TC 105 “ Technologies des Piles à Combustible ”** créé en 1996 afin d’élaborer des normes dans le domaine des **technologies de Piles à Combustible** pour les applications stationnaires et mobiles (Allemagne secrétariat, canada, France, ...)

La question de la Sûreté un monde complexe

Quelques recommandations pour faire évoluer le cadre réglementaire

- Un besoin de **projets concrets**, de démonstrateurs
- L'établissement de **référentiels et normes** est indispensable pour une approche réglementaire standardisée (vs le cas par cas)
- Un travail **d'identification des contacts clés** aux ministères et d'animation de groupes de travail thématiques
- Un **pilotage au plan national** : valoriser et exploiter le retour d'expérience et informer / former le réseau DRIRE-DREAL

1 – Brochure / état des lieux, sensibilisation des décideurs

2 – Travaux en cours / Rubrique ICPE 1415 et 1416



<https://youtu.be/QNqtGkVm8w8?t=191>



UNE PREMIÈRE VOITURE ROULANT À L'HYDROGÈNE REÇUE 5 SUR 5 AUX CRASH TESTS D'EURO NCAP

- 26/10/2018

(Relaxnews) - Le tout premier véhicule à pile à combustible, le Hyundai NEXO, testé par le programme européen d'évaluation des nouveaux modèles de voiture (Euro NCAP) a brillamment récolté le score maximal de 5 étoiles.

<https://info.viamichelin.fr/actualites/une-premiere-voiture-roulant-hydrogene-recue-5-sur-5-aux-crash-tests-deuro-ncap>



Merci de votre attention !



alain.le-duigou@cea.fr

Réserve

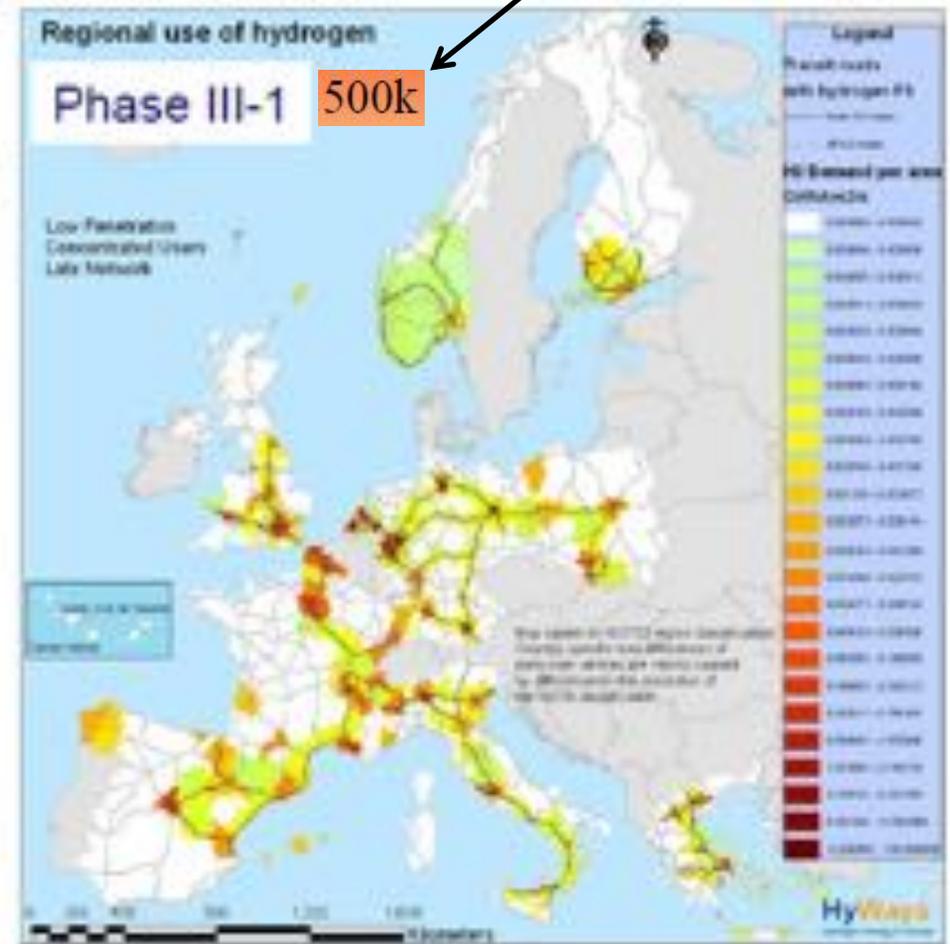
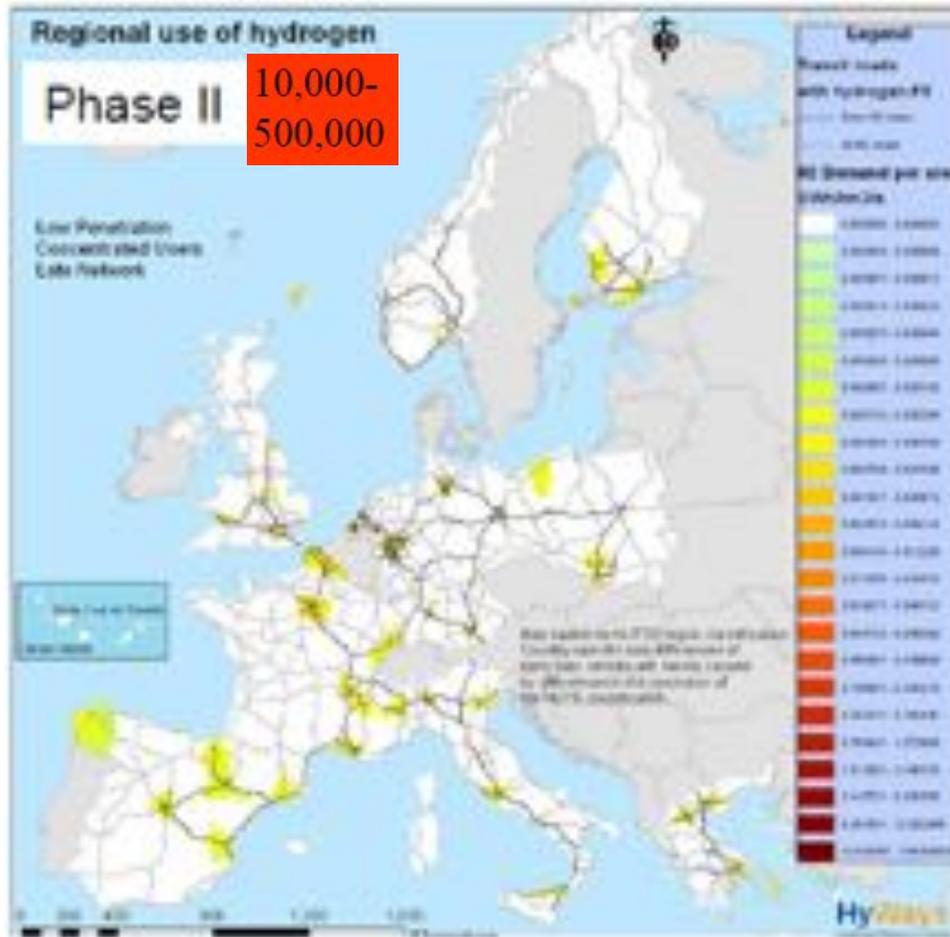
Des scénarios de développement des technologies de l'hydrogène

Les scénarios de diffusion des technologies H2

le projet HyWays / Code MARKAL

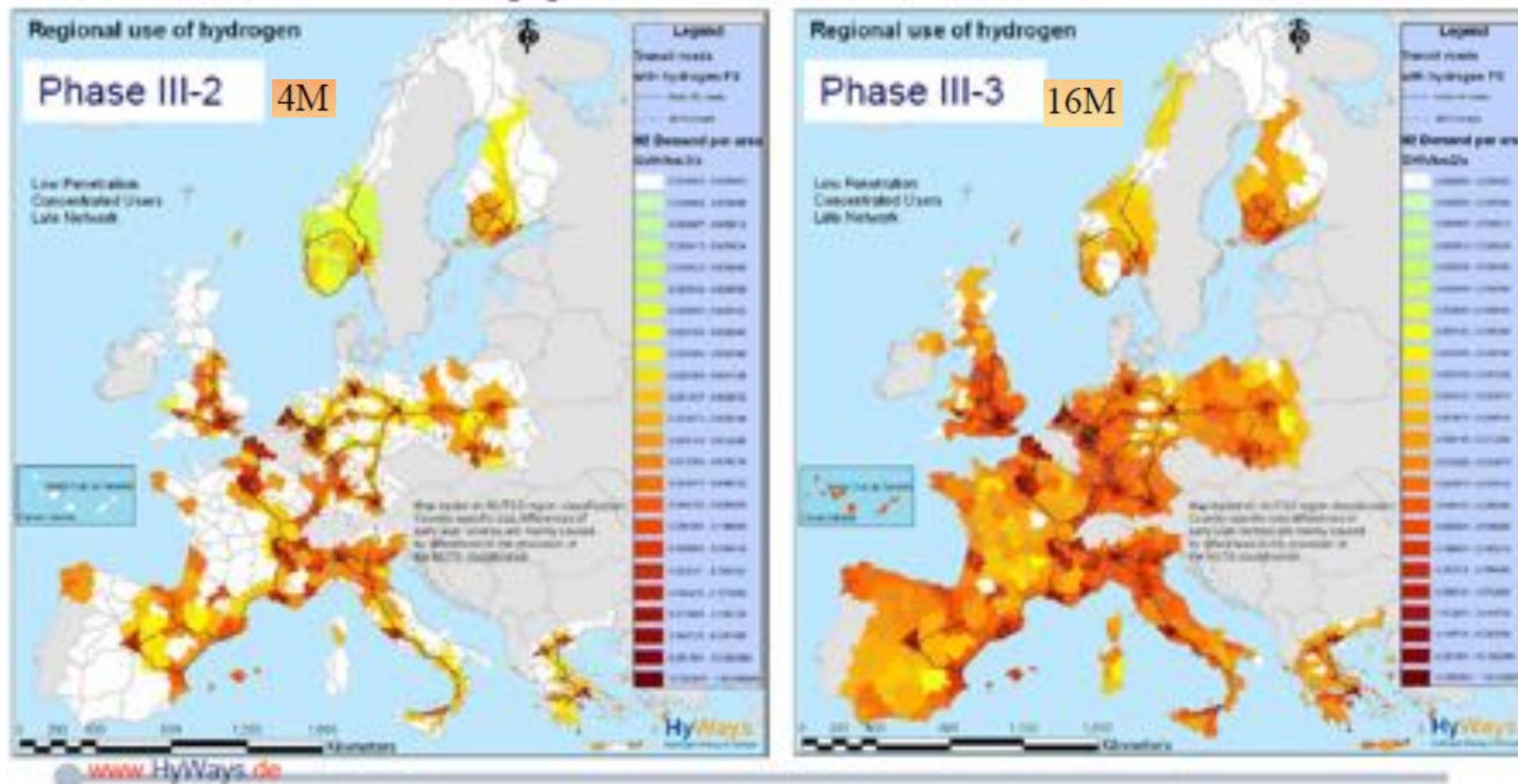
Le déploiement des infrastructures (1/2)

500 000 VL

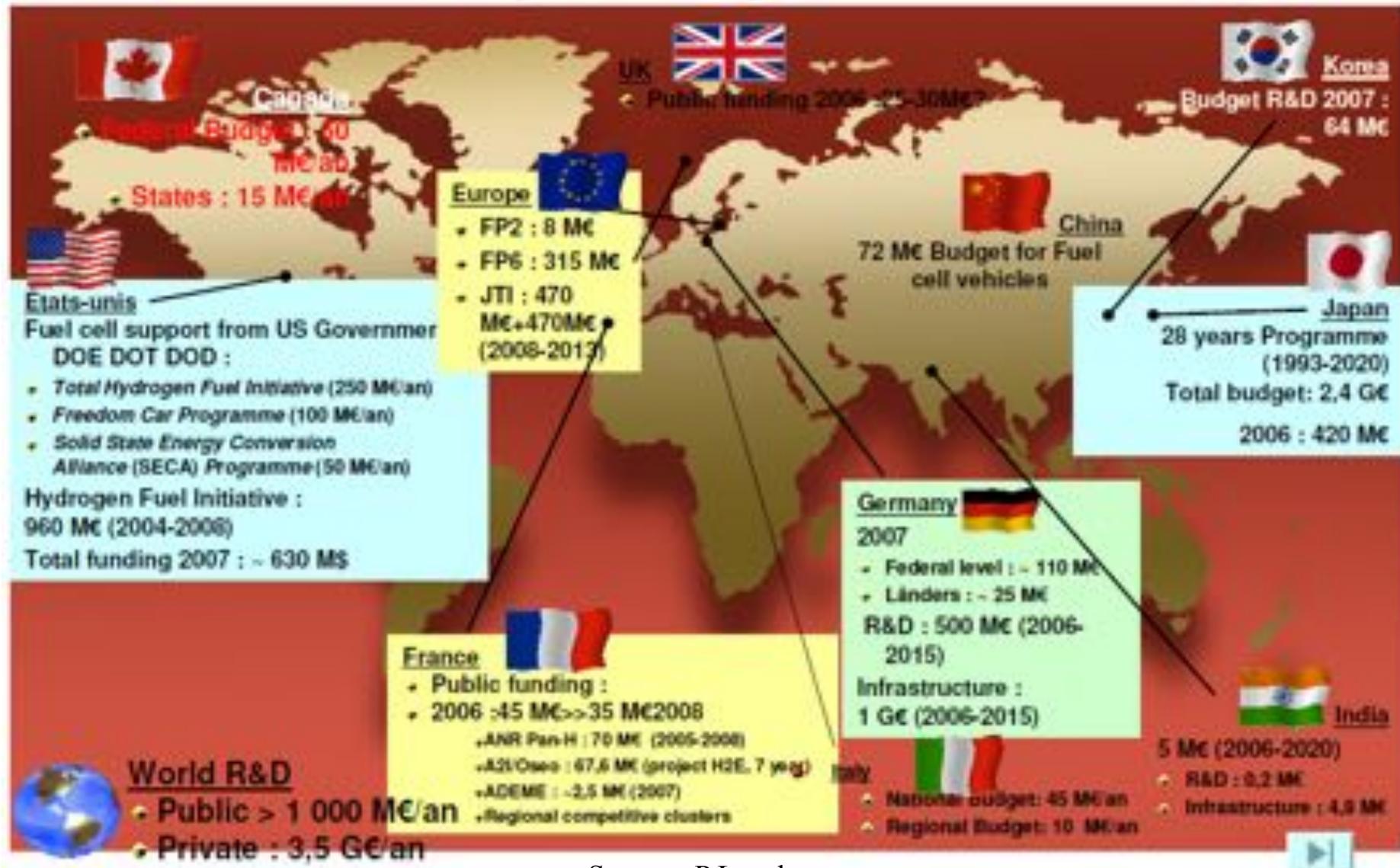


En Millions de VL

Le déploiement des infrastructures (2/2)



Fonds publics dédiés à l'hydrogène et aux piles à combustible



Source : P Lucchese

Une très large coopération internationale



International Partnership for the Hydrogen Economy



IPHE Partners



IPHE Partner Economy:

- Over \$25 Trillion in GDP, 65% of world GDP
- Nearly 3.5 billion people
- Over 75% of electricity used worldwide
- ~ 23 GtCO₂ emissions and energy consumption



Japan, Republic of Korea, China, India, Mexico, Germany, Italy, Australia, Brazil, Norway, European Commission, New Zealand.



UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR HYDROGEN ENERGY TECHNOLOGIES

UNIDO-ICHET, Satali Cilar Str. 26/4, Cavduslu, Zeytinburnu, 34015 Istanbul, Turkey

UNIDO-ICHET Activities

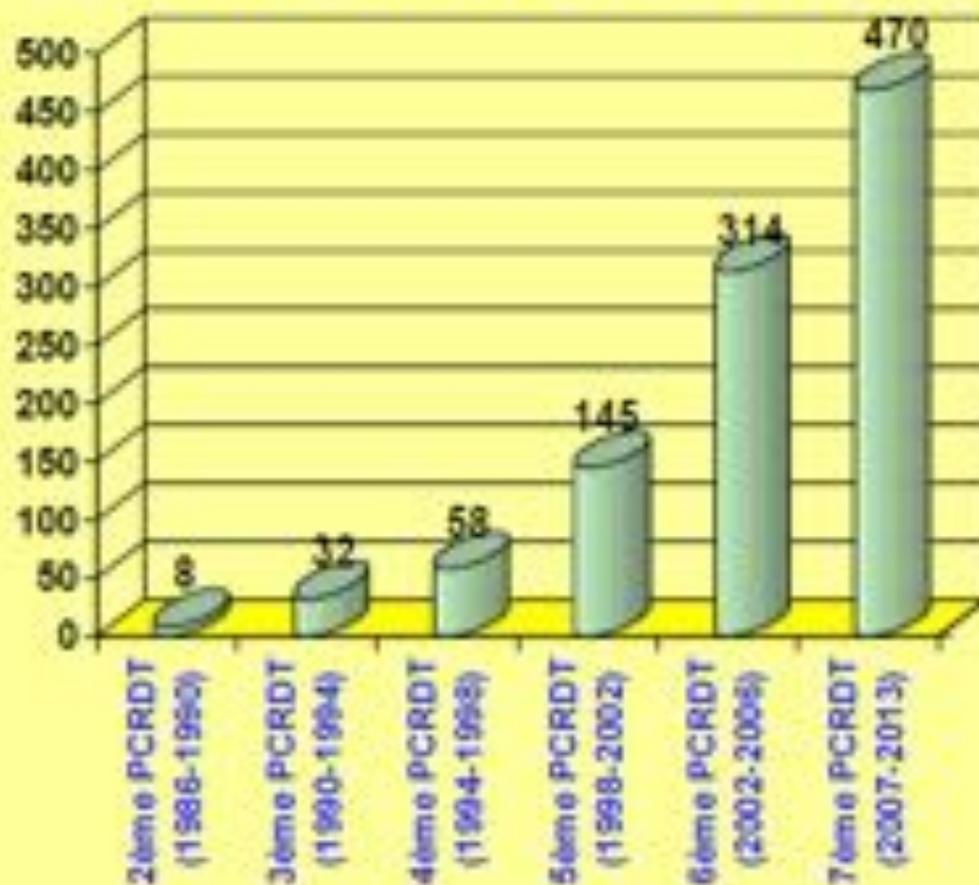
Prof. Dr. Feroz Fatih
Associate Director for Science & Technology
fatih@unido-ichet.org



Janvier 2004 : Lancement de la plate-forme technologique européenne sur l'hydrogène et les piles à combustible

European H2 and Fuel Cells
Technology Platform

Evolution des financements UE sur H2/PAC au travers des PCRDT (M€)



L'Association Française de l'Hydrogène a été créée le 30 avril 1998. En 2011, l'association a modifié sa dénomination et ses [statuts](#) pour devenir AFHYPAC (Association Française de l'Hydrogène et des Piles à Combustible).



The **Horizon Hydrogène Énergie (H2E)** program (Air Liquide) : innovation platform / **19 partners** / Hydrogen Energy industry in France by meeting the needs of the early markets. **€ 190 millions over 7 years**. Funded by the partners + **€ 67 millions** grant from French innovation agency **Oseo**.



Start of the project:
February 2011 - Project
Duration: 36 months -
MobyPost is co-financed
by European funds from
the FCH-JU-2009-1 Grant
Agreement Number 256834

To develop a **novel sustainable mobility concept**, combining a carbon neutral vehicle with a novel technology based on a solar hydrogen fuel cell system : **solar-to-wheel solution**.

Calls for projects launched in 2011 (ADEME):

- important fleet demonstrations in the East of France in 2013 : MoBiHyTest,
- development of the use of H₂/NG mix : GRHYD.

Les flottes d'entreprises passent à l'hydrogène

Très utilisés par les entreprises, notamment lorsqu'elles accueillent des plateformes logistiques, les chariots élévateurs dotés de piles à combustible hydrogène sont une solution intéressante pour se substituer aux batteries électriques alimentant d'habitude ces véhicules. Exemple, à Vatry, sur la plateforme d'Air Liquide.



L'hydrogène : des enjeux sociétaux / Les problématiques de l'acceptabilité et de la sûreté

La problématique de l'acceptabilité

Comprendre les processus d'acceptabilité peut permettre :

de mieux communiquer

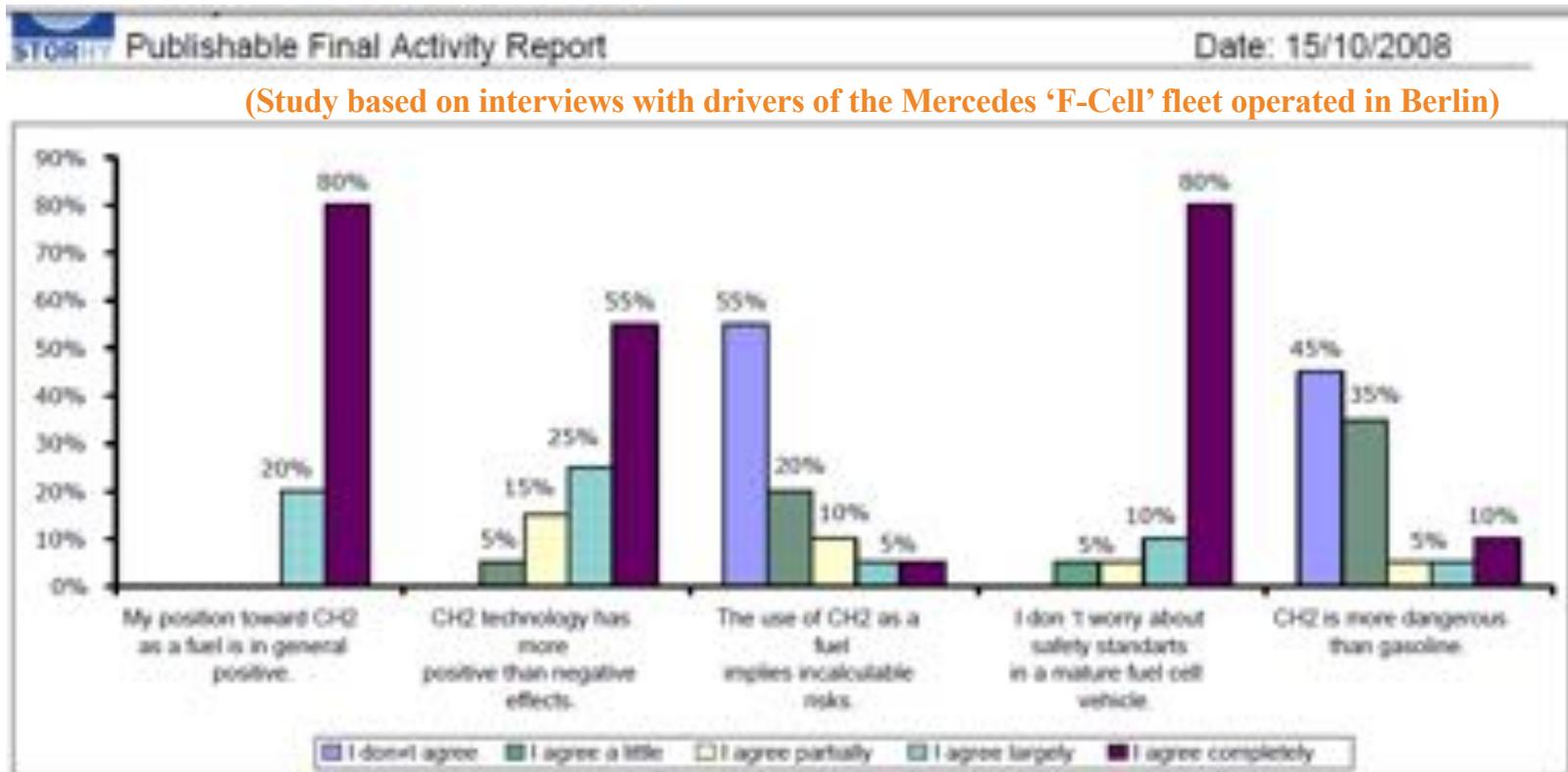
de mieux comprendre les dynamiques de pénétrations des innovations

de bâtir des plans d'affaires adaptés

de mieux orienter la recherche

L'hydrogène : des enjeux sociétaux

Études d'acceptabilité dans divers projets (STORHY – Stockage -, Roads2HyCom, ...)



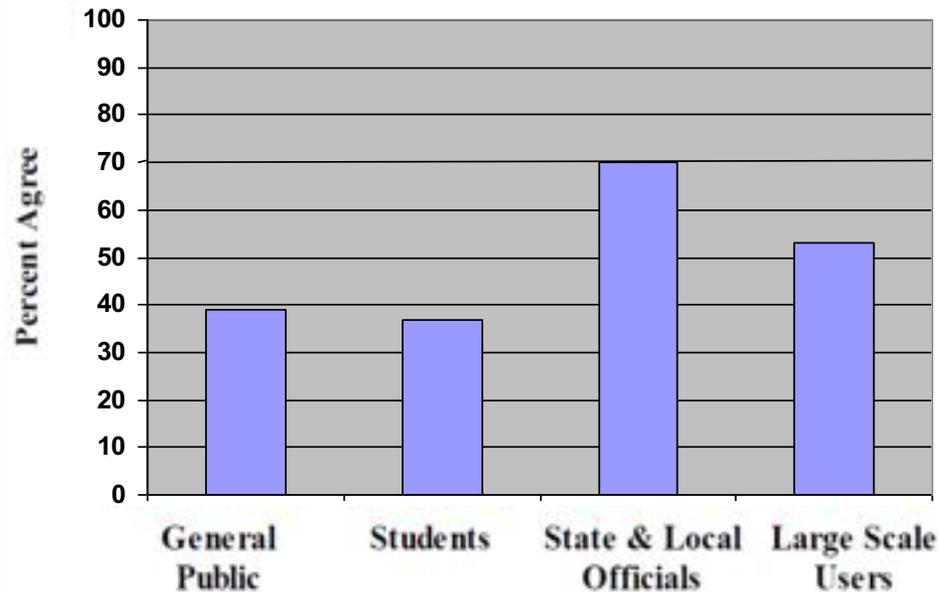
Source: Daimler

Fig. 5: Acceptance of Hydrogen Storage:
"What's your opinion about the following points concerning hydrogen, its storage and security?"

L'utilisation crée la confiance

Avant utilisation

Perception de la sûreté des technologies de l'hydrogène
% de personnes d'accord avec l'affirmation « *H2 aussi sûr que le gaz et le diesel* »

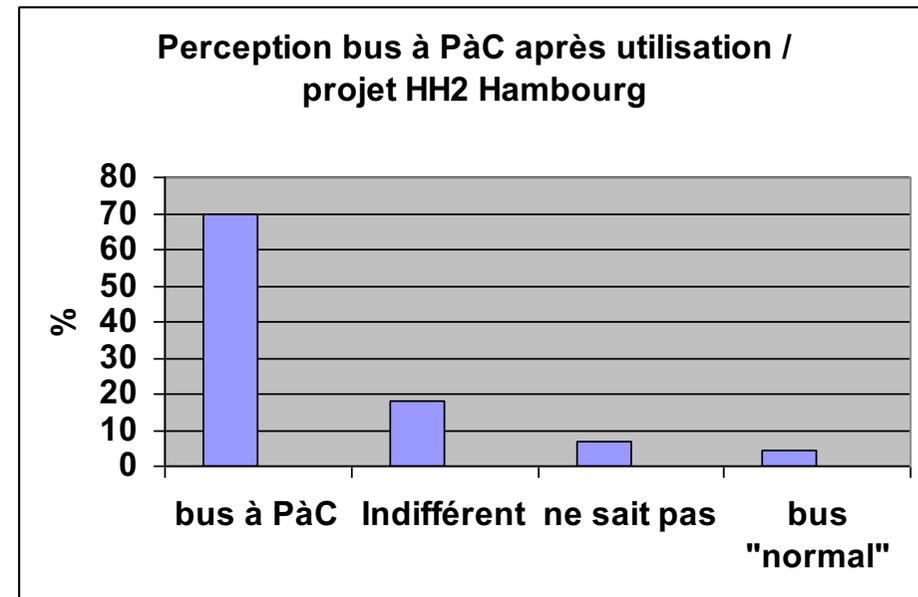


(Schmoyer et al. (2006) / Results of the 2004 knowledge and opinion surveys for the baseline assessment of the USDOE program)

Après utilisation

Projet HH2 / Hambourg 2005
Retour d'expérience sur l'introduction des nouvelles technologies de l'hydrogène (bus)

Vous préférez un bus PàC ou un bus normal ?



L'hydrogène : des enjeux sociétaux le projet AIDHY

« **A**ide à la **D**écision pour l'identification et l'accompagnement aux transformations sociétales induites par les nouvelles technologies de l'**H**ydrogène »



Projet ANR AIDHY auquel l'I-tésé a contribué:

- thématique de l'hydrogène sujette à beaucoup de polémiques (mais quelle NTE n'en crée pas ?)
- occasion d'un interfaçage très fructueux entre des disciplines diverses : technologues, sociologues, enquêteurs
- élargissement de la démarche « système » aux « SHS »
- première réflexion sur les possibles effets « en retour » vers le « pilotage » de la recherche

Des « focus groupes » à l'expression de la problématique

FG1 – Utilisateurs de véhicules individuels
FG2 – Utilisateurs de transports en commun
FG3 – Utilisateurs d'une technologie de production d'énergie éco-responsables
FG4 – Experts

Technique de recueil de données qualitatives, *fréquemment utilisée en marketing*

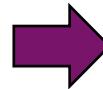


Thèmes, sujets, idées, craintes et espoirs évoqués par les participants, suscités par le mot « hydrogène » (usages transports, production de masse, nucléaire, santé, autonomie,)

Point de départ pour structurer l'enquête quantitative

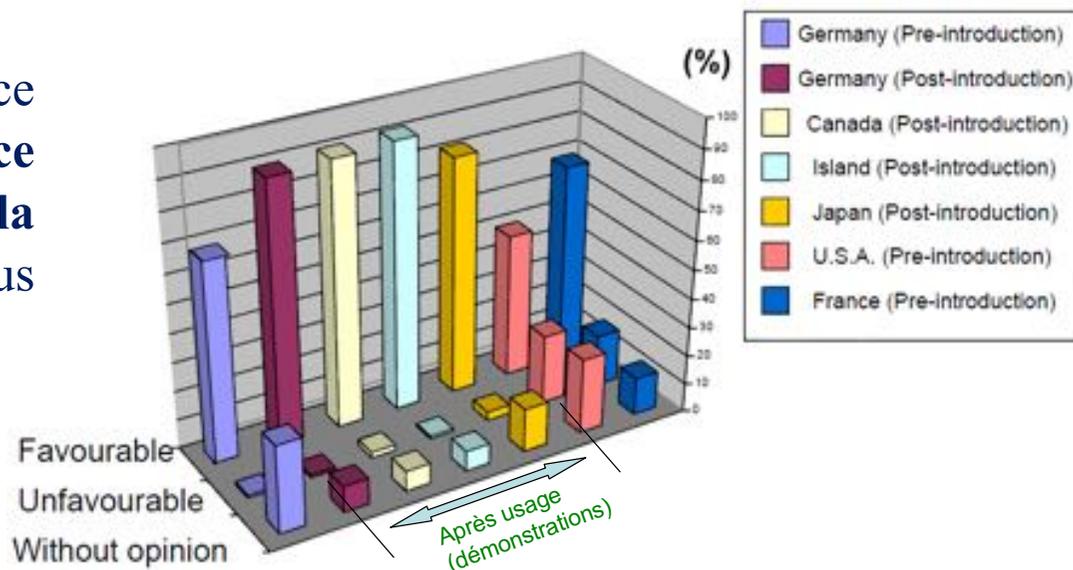


Catégorisation des préoccupations: Sécurité, écologie, économie, indépendance énergétique, utilité



Recueillir le degré d'acceptation, par le grand public, de l'hydrogène

Hydrogène : le retour d'expérience montre que **l'usage a une tendance assez nette à accroître la confiance** – cas des démos autobus en Europe



Elaboration et diffusion
de questionnaires

600 réponses effectives (7000 personnes contactées)

Catégories sociales (revenus, profession, âge, sexe, région, opinions politiques)

Questions ouvertes (interlocuteur non guidé) puis questions plus fermées (interlocuteur guidé)

Résultats de l'enquête

Méconnaissance relative de l'H₂, mais **image plutôt positive**, associée à l'écologie

→ Premier temps : le public est en attente de bénéfices économiques.

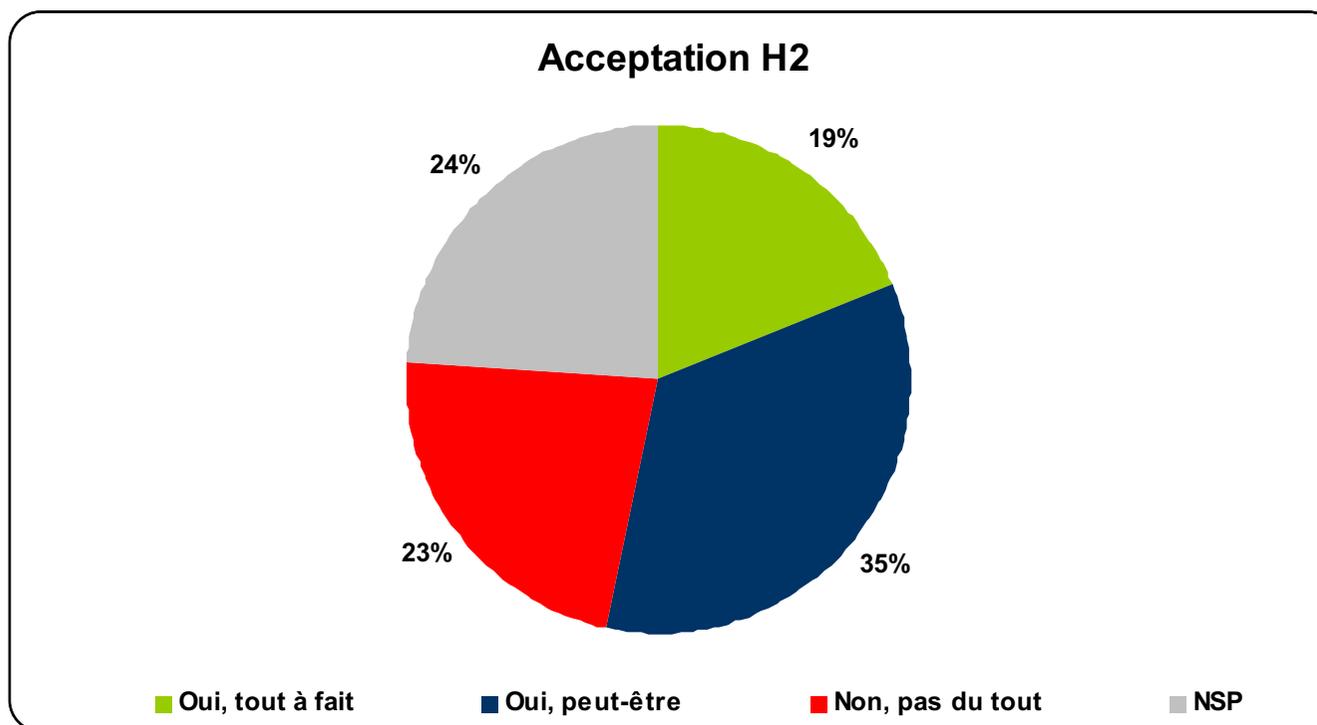
→ Deuxième temps : le public est soucieux des impacts de sa consommation au niveau de son environnement (« Si je réduis ma facture énergétique, alors c'est bon pour l'environnement »).

Le lobbying sera nécessaire et fondamental : identifier un **porteur de projet crédible** (communauté scientifique, mais pas seulement – pluriel)

<i>Communauté scientifique</i>	21%
<i>Ministère écologie</i>	10%
<i>Médias</i>	6%
<i>Industriels</i>	3%
<i>PR</i>	1%

Résultats de l'enquête

Le public n'est pas réfractaire et inquiet à l'utilisation de l'hydrogène:
potentiel de 77% de personnes intéressées, fort dans des zones
hautement urbaines comme l'IdF



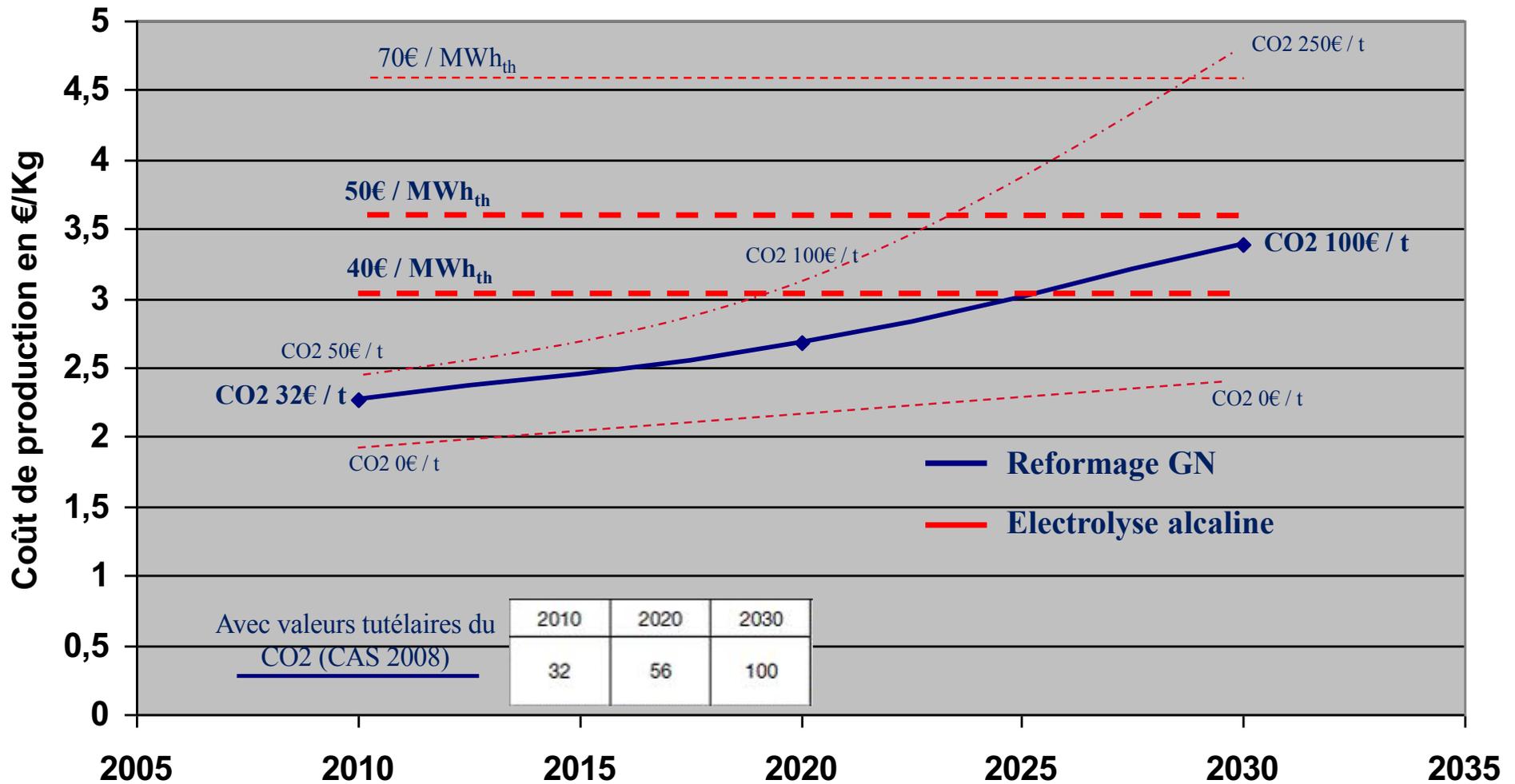
*Analyse multicritères en cours (scénarios / résultats
enquête / classification des scénarios)*

Réserve

Coûts de production de l'hydrogène en fonction des prix du gaz et de l'électricité

Prévisions d'évolution du coût de production d'hydrogène

Suivant projections d'évolutions du prix du gaz (WEO 2008), et de la valeur tutélaire du CO2 (CAS 2008)



Gazéification du charbon

Le charbon est une énergie bon marché même si son prix augmente aussi (~11,5 €/MWh début juillet 2008 vs. 40 pour le gaz naturel)

mais :

à capacité égale de production la gazéification du charbon requiert un investissement de 2 à 3 fois supérieur à celui d'une unité de reformage

le rendement du procédé est plus faible :

48% contre 78,5% pour le reformage du méthane

les émissions de CO₂ plus élevées (facteur 2)

Sans prendre en compte le surcoût CO₂ :

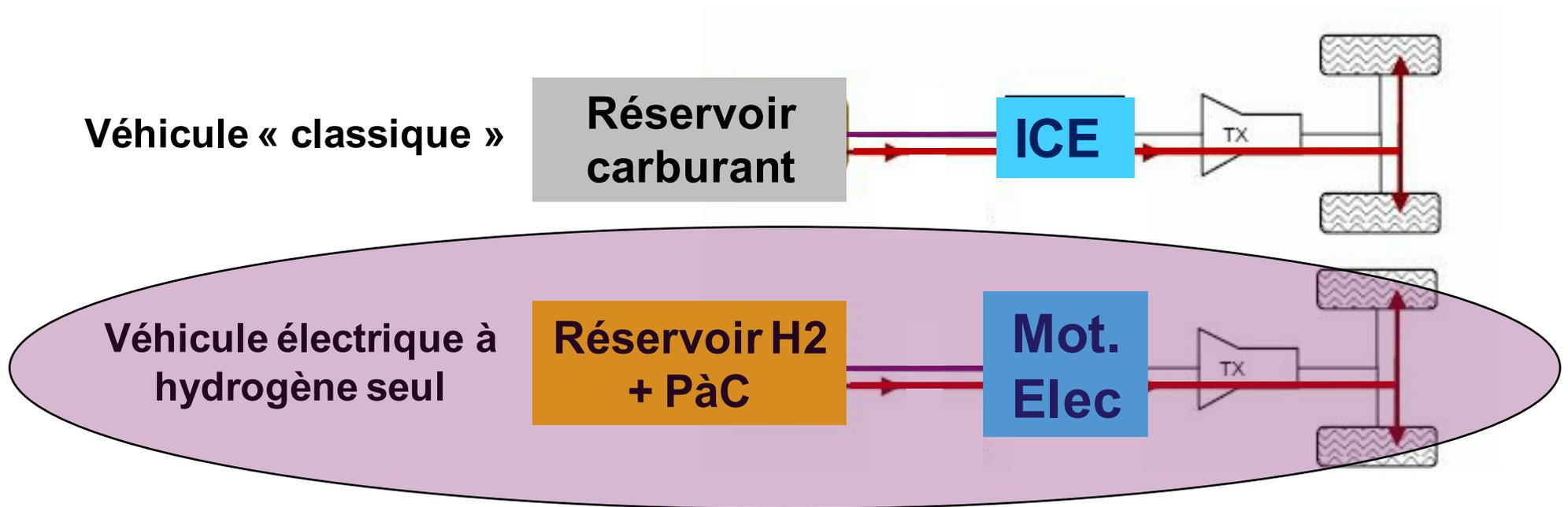
En 2006 : le coût de l'hydrogène produit par gazéification du charbon est près du double de celui de l'hydrogène produit par reformage du gaz naturel (données AFH2)

Actuellement : la gazéification reste plus chère d'un facteur 30% environ

➡ meilleure compétitivité due à la croissance relativement plus forte des prix de gaz naturel

Vision inverse : prix objectif de l'H2 à la pompe, en fonction d'un certain nombre d'hypothèses

**DES objectifs de prix fondés sur l'évaluation comparée des CTP
(Coûts Totaux de Possession)**



CTP : composants ci-dessus + consommations carburants

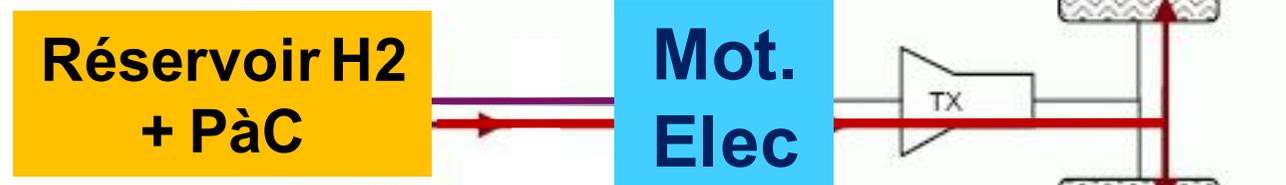
L'usage en véhicules

Véhicule « classique »

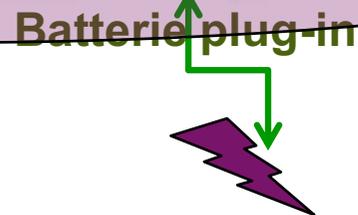
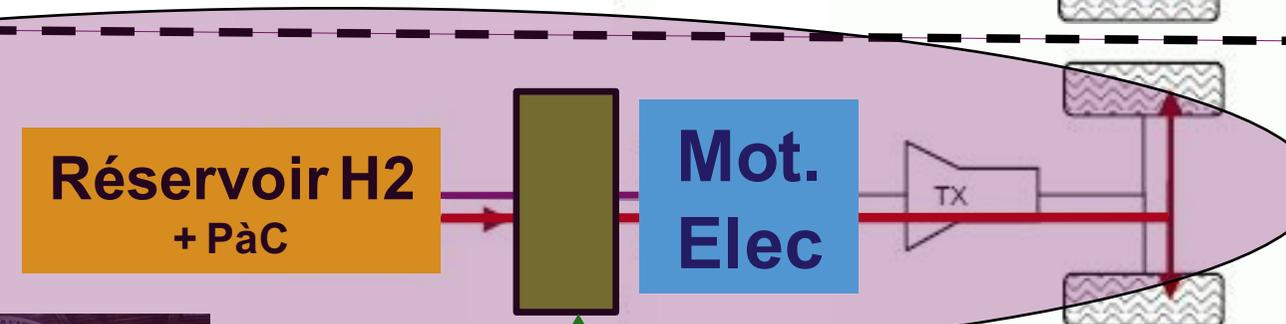
Automobile moyenne française : 70 à 100 kW



Véhicule électrique à hydrogène seul



Véhicule électrique à pile à combustible en RE (Range Extender) de batterie plug-in

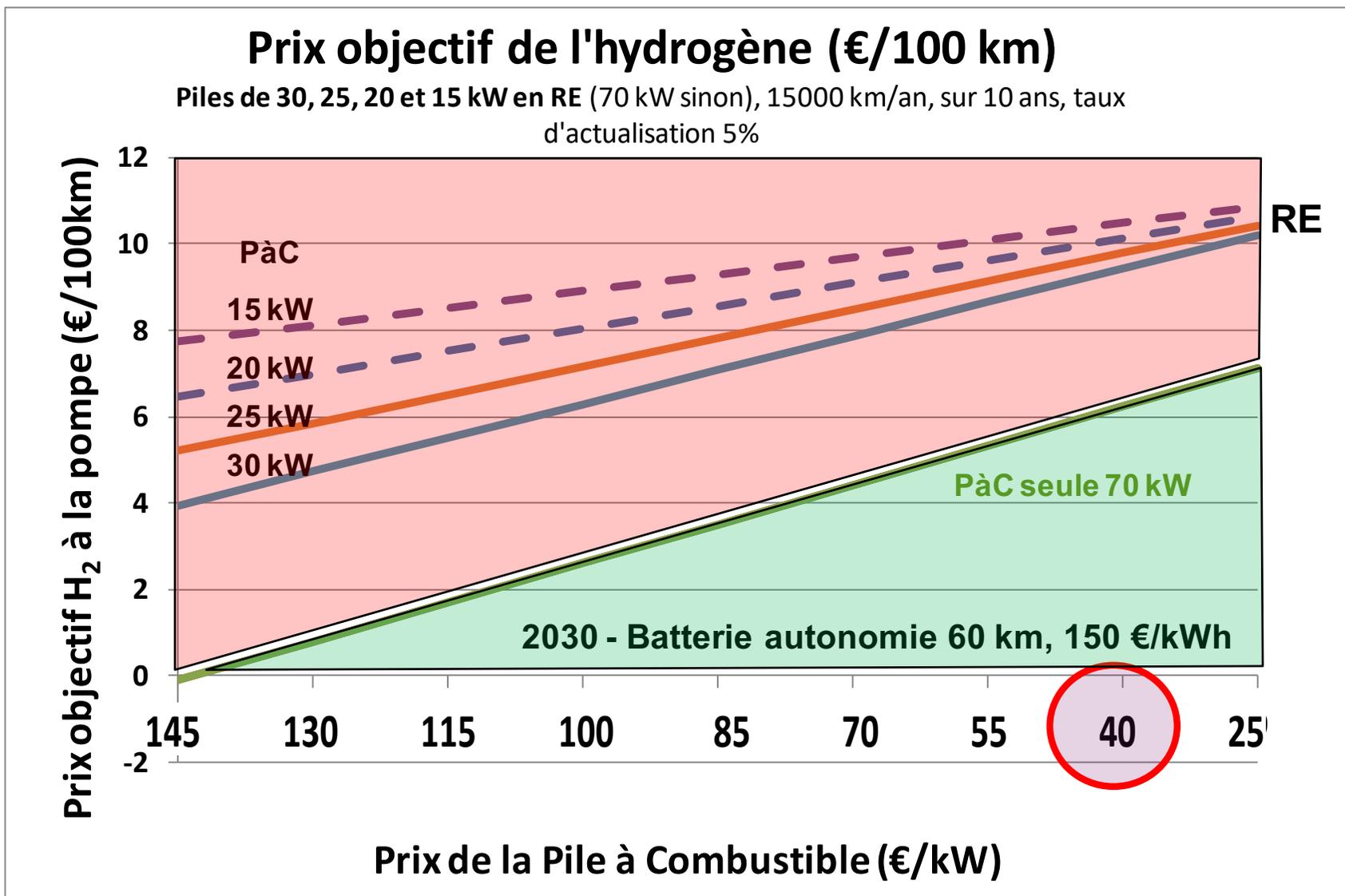


PàC 5 kW



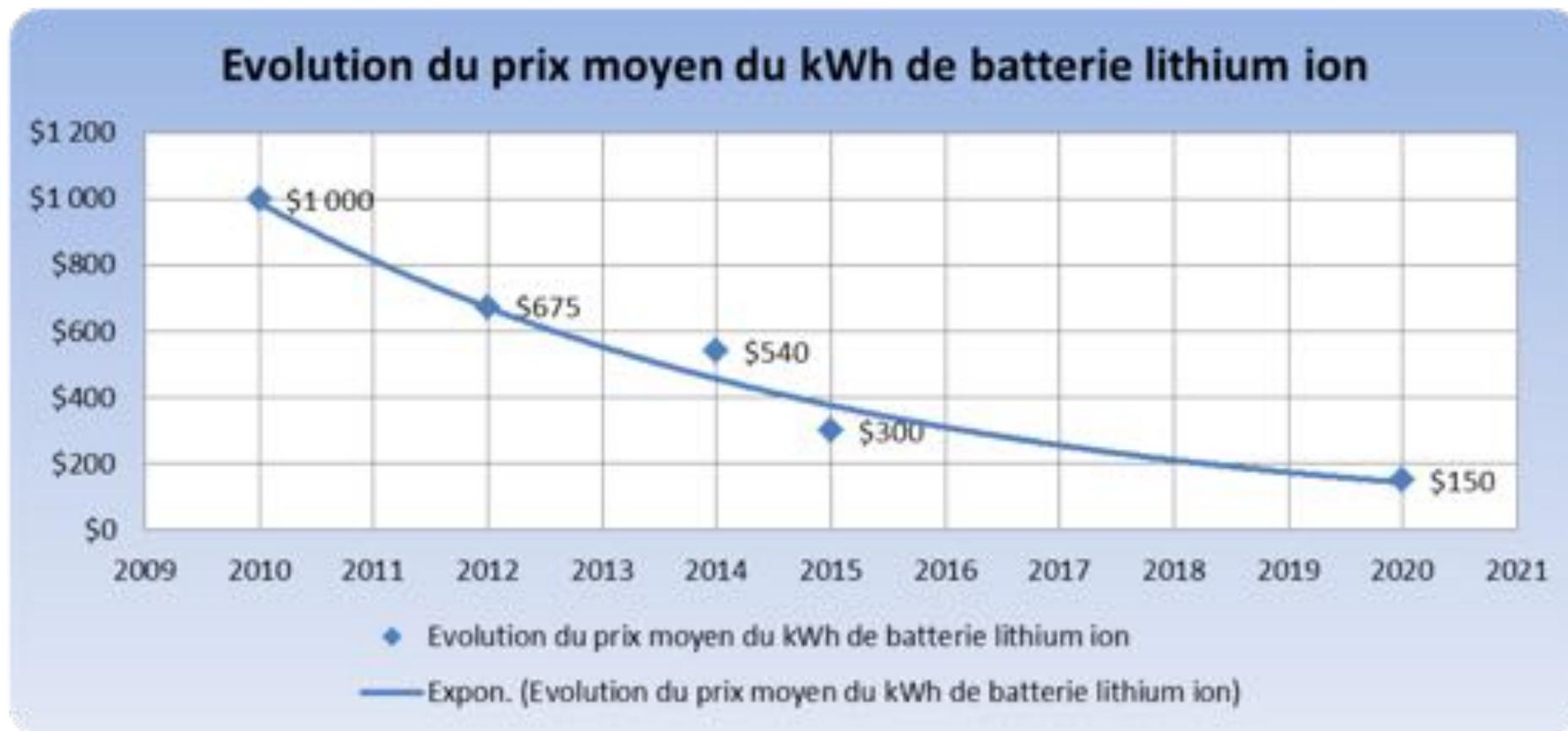
HyKangoo (SymBioFuelCell and Renault)

Des coûts objectifs de l'hydrogène à la pompe bien plus élevés, donc un marché plus facilement atteignable



Vs. ICE identique, carburant 1,75€/l, 5,6l/100 km

http://www.themavision.fr/jcms/rw_438628/la-baisse-rapide-du-prix-des-batteries-lithium-ion-et-la-structuration-de-la-filiere

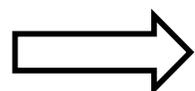


*Source : Les Echos - chiffres 2015
et 2020, estimation des fabricants*

Electrolyse PEM

Au départ conçue pour des applications spatiales et militaires, efficaces mais chères, les récents progrès conduisent à des coûts similaires à l'électrolyse alcaline, pour de nombreuses raisons:

- *Capacité à surmonter les problèmes de charge partielle, de courant faible, et de travail à forte pression qui handicapent les électrolyseurs alcalins.*
- *Capacité à fonctionner à des densités de courant élevées, d'où réduction des coûts d'investissements.*
- *Temps de réponse dynamique rapides (de l'ordre de la seconde), donc utilisation d'énergies intermittentes tout à fait possible, larges plages opérationnelles et niveau de pureté de gaz très élevé (99,999%).*
- *Simplicité des équipements auxiliaires, exclusivement eau et électricité.*
- *Efficacité et durée de vie des stacks garanties pour plus de 60 000 heures.*
- *Niveau de maintenance inférieur à celui des électrolyseurs alcalins traditionnels.*
- *Dimensions encore modestes (max env. 200 Nm³/h), mais AREVA H2Gen a dévoilé un concept d'usine de production d'hydrogène de grande capacité de 60 MW lors de la Foire d'Hanovre.*

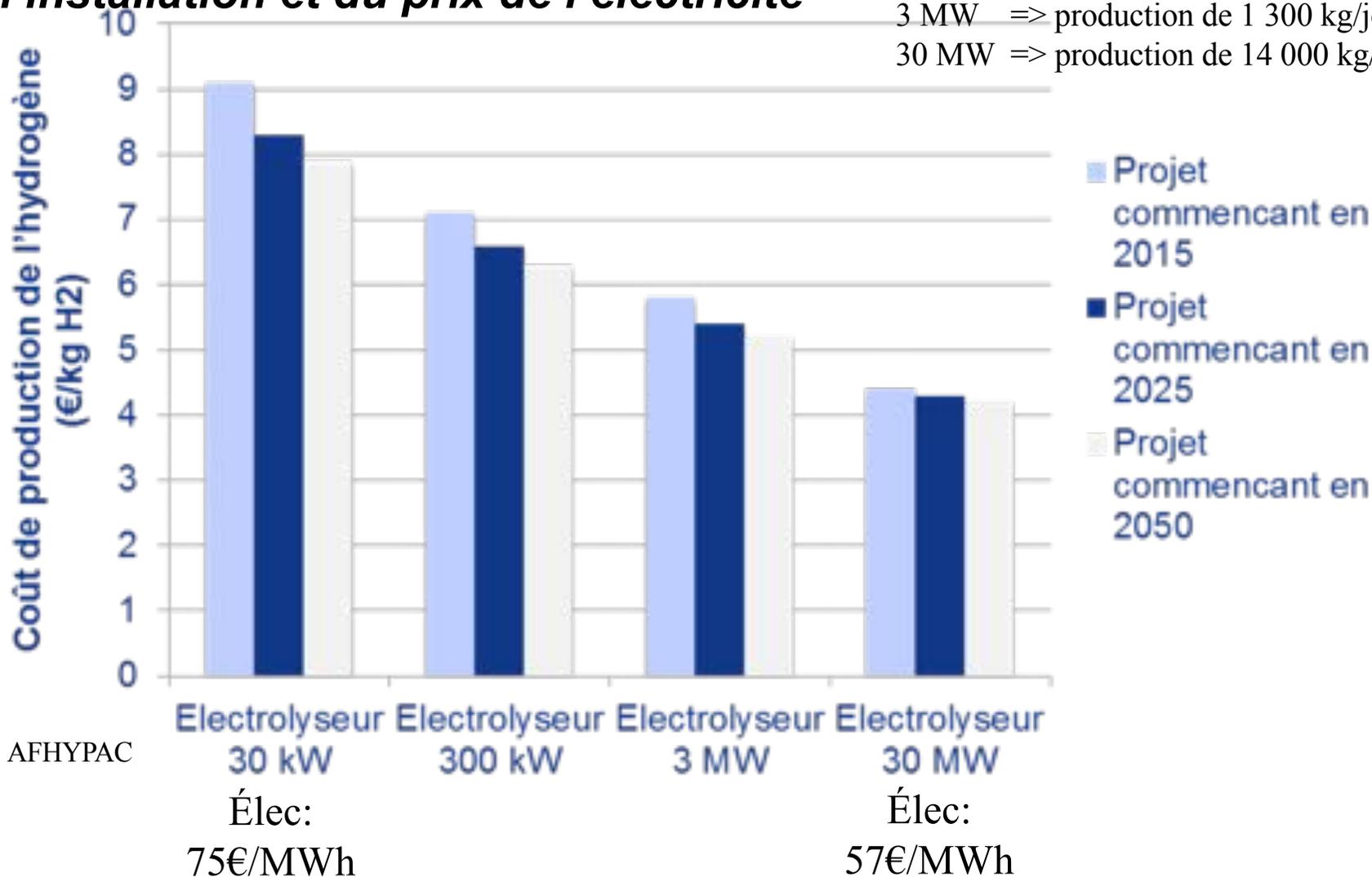


L'investissement est aujourd'hui très proche de celui de l'électrolyse alcaline (c.a. 1000€/kW)

des coûts fortement dépendants de la taille de l'installation et du prix de l'électricité

Plusieurs tailles d'électrolyseurs sont définies :

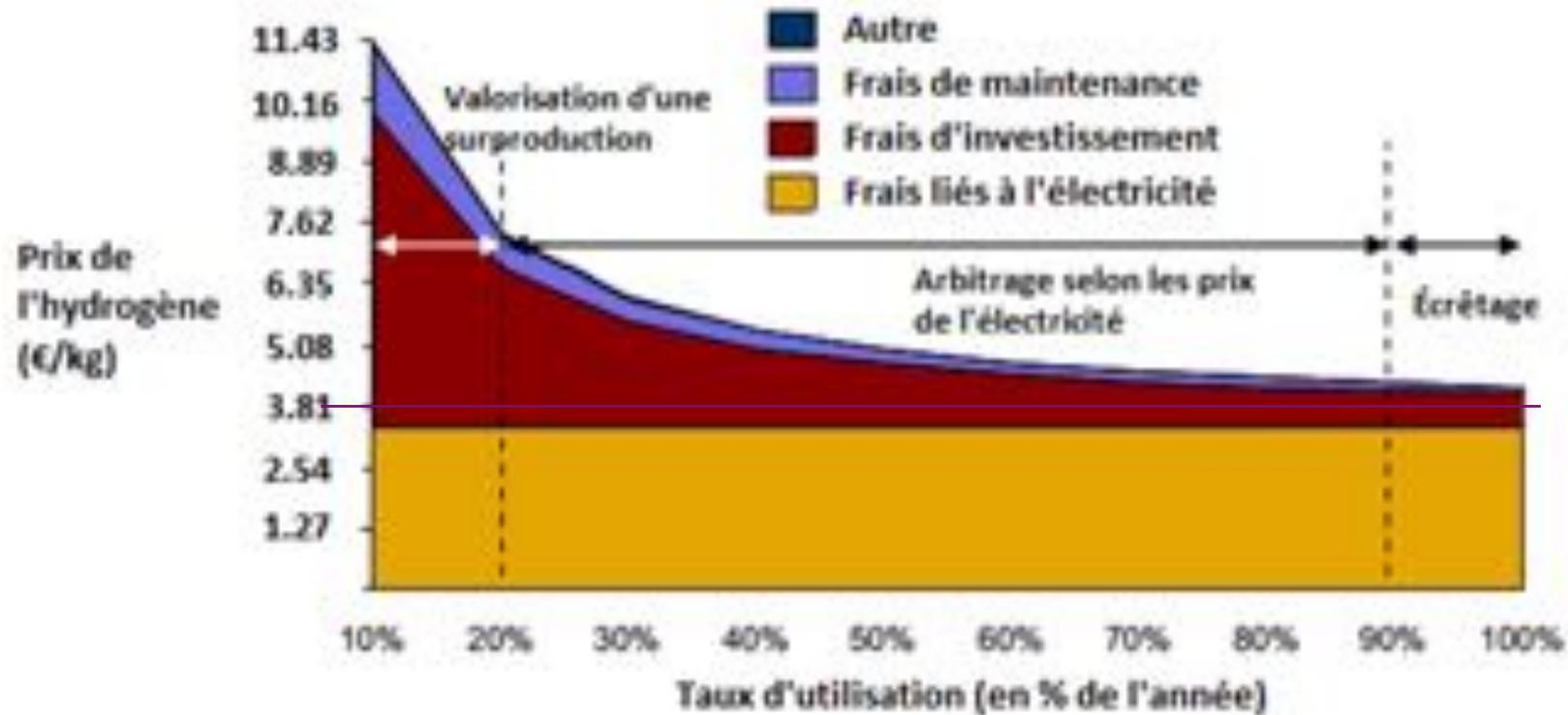
- 30 kW => production de 11 kg/jour environ
- 300 kW => production de 120 kg/jour environ
- 3 MW => production de 1 300 kg/jour
- 30 MW => production de 14 000 kg/jour



Source: AFHYPC

Structure d'un coût de production d'hydrogène

Coût de l'hydrogène en fonction de l'utilisation. Source : SBC Energy Institute.

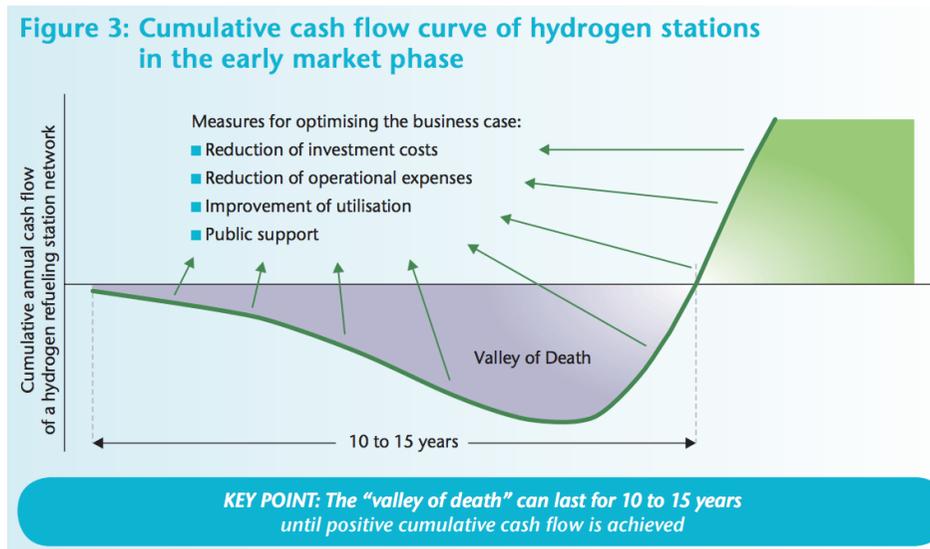


Plus le taux d'utilisation baisse, moins on produit, donc plus le coût par kg est élevé (pour un même investissement)

La distribution en stations service

- Coût moyen d'une station-service traditionnelle (essence/gas-oil) : 120 - 150 000 € en 2010
- Très peu d'éléments aujourd'hui concernant le coût d'une station hydrogène.
- 2013, Air Liquide: " Air Liquide travaille sur la réduction du coût de ces stations à hydrogène, qui est passé de plusieurs millions il y a 5 ans à peu près 1 million aujourd'hui »
/ Toyota: stations « compactes » à environ 1,5 M€
- Septembre 2014, Linde: compétences pour construire des stations pour environ 1M€.
- En France, dans le cadre du développement des flottes de véhicules à prolongateur d'autonomie, stations « simplifiées » McPhy à 350 bar : 250 à 300 000 €

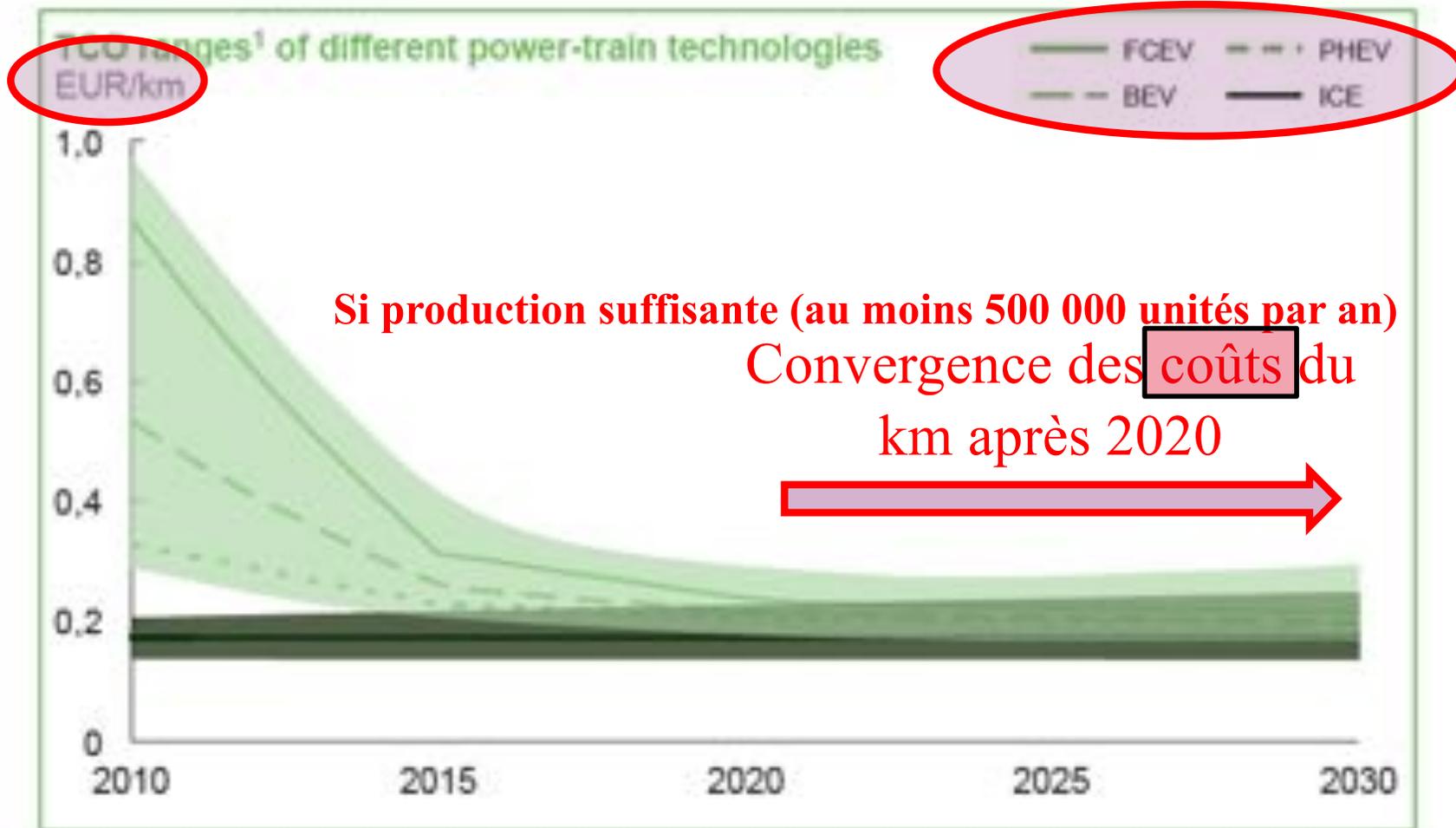
Mais attention à la
« vallée de la mort » en
termes d'investissements
c.a. 2€/kg pour la
distribution / recompression
à 700 bar



<https://ammoniaindustry.com/iea-calls-for-renewable-hydrogen-and-carbon-free-ammonia/>

(CTP : Coûts Totaux de Possession)

CD SEGMENT



¹ Ranges based on data variance and sensitivities (fossil fuel prices varied by +/- 50%; learning rates varied by +/- 50%)

Calculer le TCO d'un véhicule / exemple

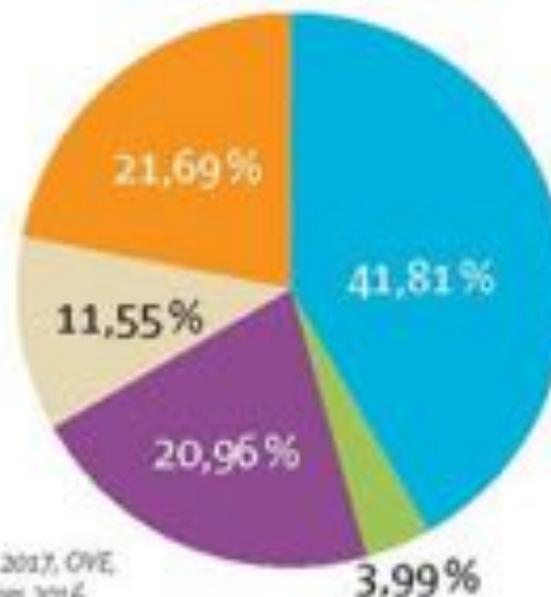
<https://www.flotauto.com/calculer-tco-methode-a-adapter-20170622.html>

LE TCO DES VÉHICULES PARTICULIERS

Moyenne pondérée des segments VP en euros



Moyenne pondérée des segments VP en %



Source: TCO Scope 2017, OVE, sur la base de chiffres 2016.

■ Dépréciation ■ Frais financiers ■ Entretien/pneus/assurance ■ Énergie
■ Charges fiscales et sociales

« Le TCO est un pur calcul comptable et de gestion, rappelle Robert Maubé, spécialiste de la gestion des flottes d'entreprise et consultant pour Flottes Automobiles. Le TCO est égal à tout ce que je ne dépenserais pas si je ne possédais pas ce véhicule. »

Un intérêt certain à associer pile à combustible et batterie rechargeable !

Les livraisons sont confiées expérimentalement avec La Poste aux prolongateurs d'autonomie de Syntec FC&B sur deux véhicules électriques Renault Kangoo Z.E.



Dans le cadre d'une validation de performances en conditions réelles, des véhicules électriques Renault Kangoo Z.E., utilisés par La Poste vont être équipés du kit prolongateur d'autonomie pile à hydrogène de Syntec FC&B. Elles seront déployées au premier semestre 2014 sur deux plateformes de distribution de courrier : à Lormet-les-Bains (Haute-Saône) et à Dole (Jura).