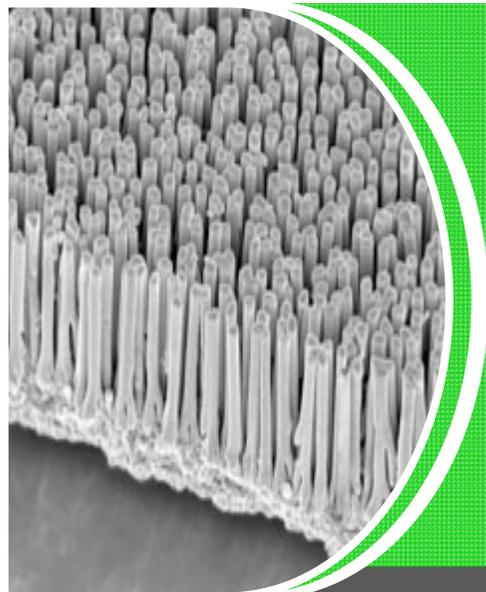




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire **Développement durable**
Environnement, Énergie et Société

Chaire annuelle – Année académique 2010-2011



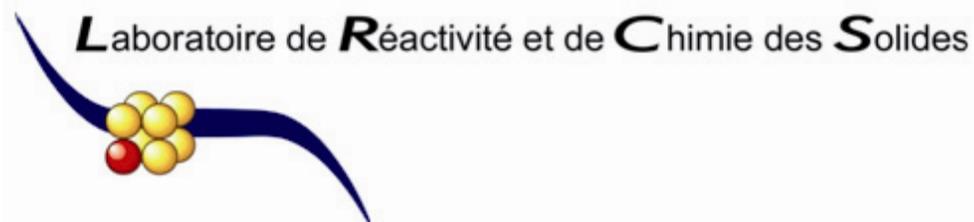
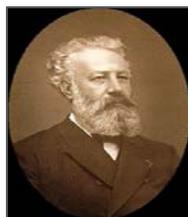
Filière hydrogène: de la production au stockage

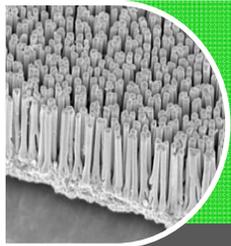
23 Février 2011

Prof. Jean-Marie Tarascon

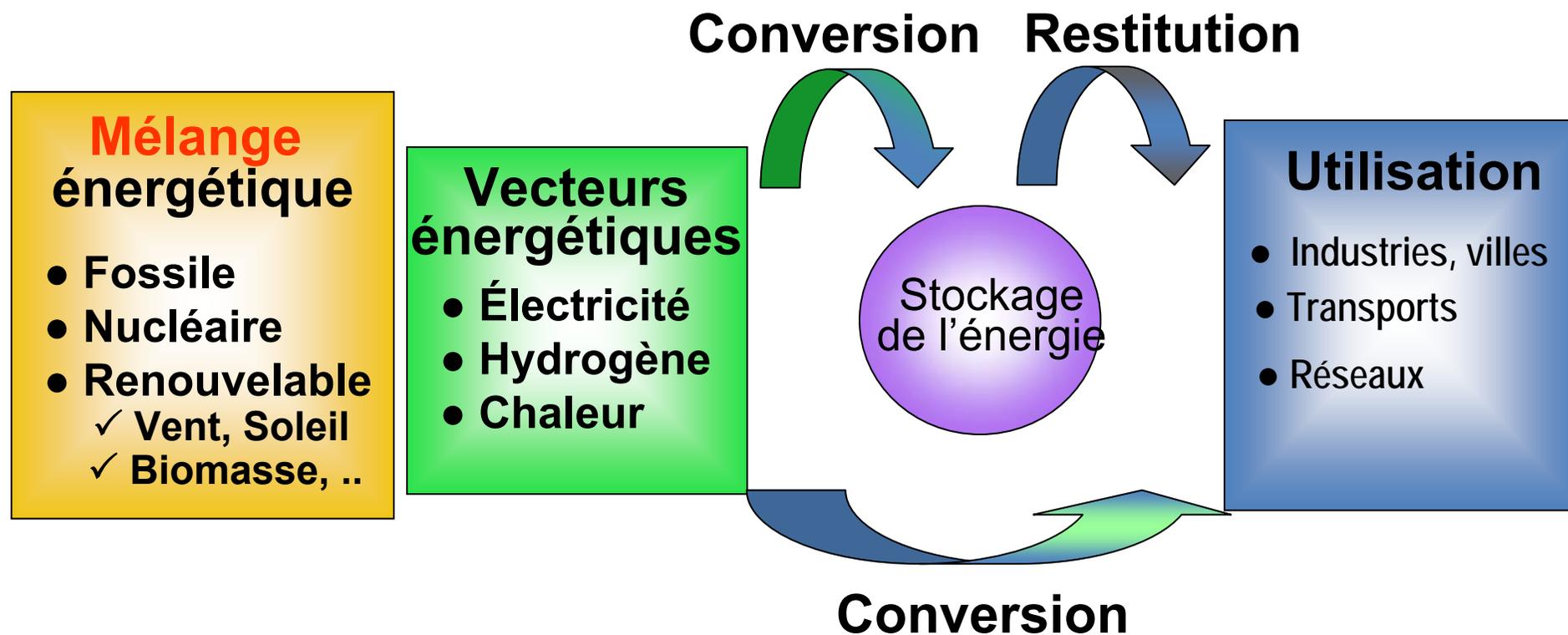


Amiens

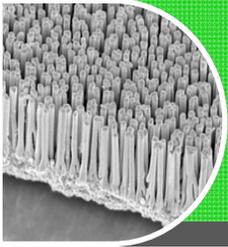




LES VECTEURS ENERGETIQUES



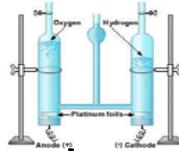
➔ **Qu'en est-il de l'hydrogène?**



Problèmes récurrents pour tous les vecteurs énergétiques



Production



- Génère l'hydrogène dont les gens ont besoin



Distribution



- Distribue l'hydrogène où les gens en ont besoin

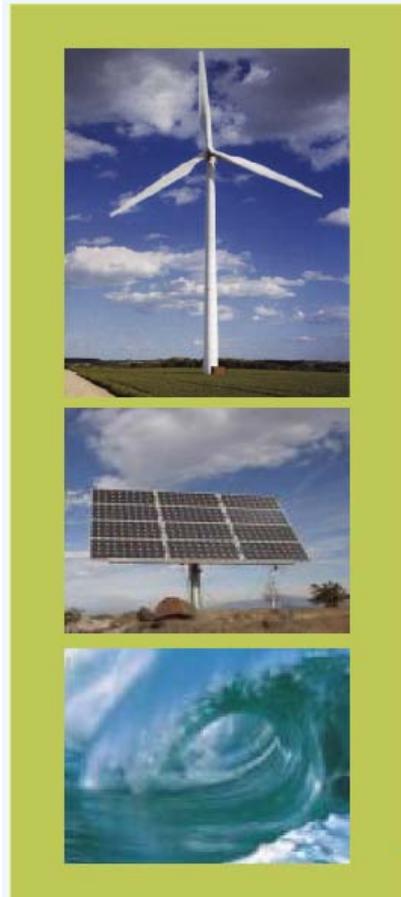
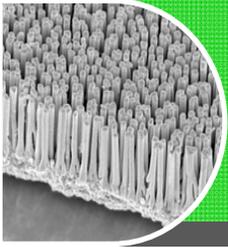


Stockage

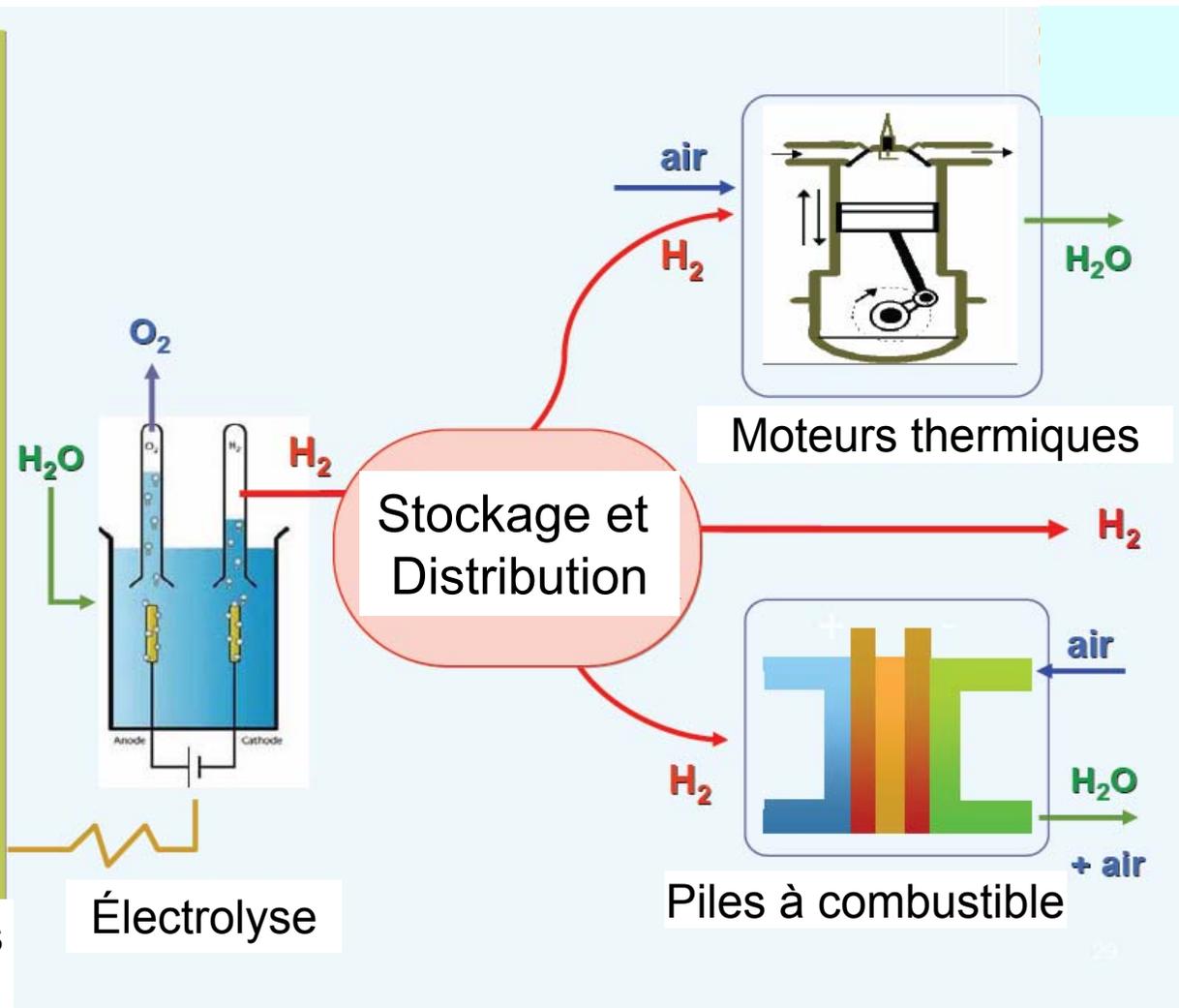


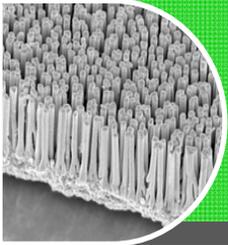
- Fournir l'hydrogène quand il y a demande

L'Hydrogène: un vecteur énergétique propre...

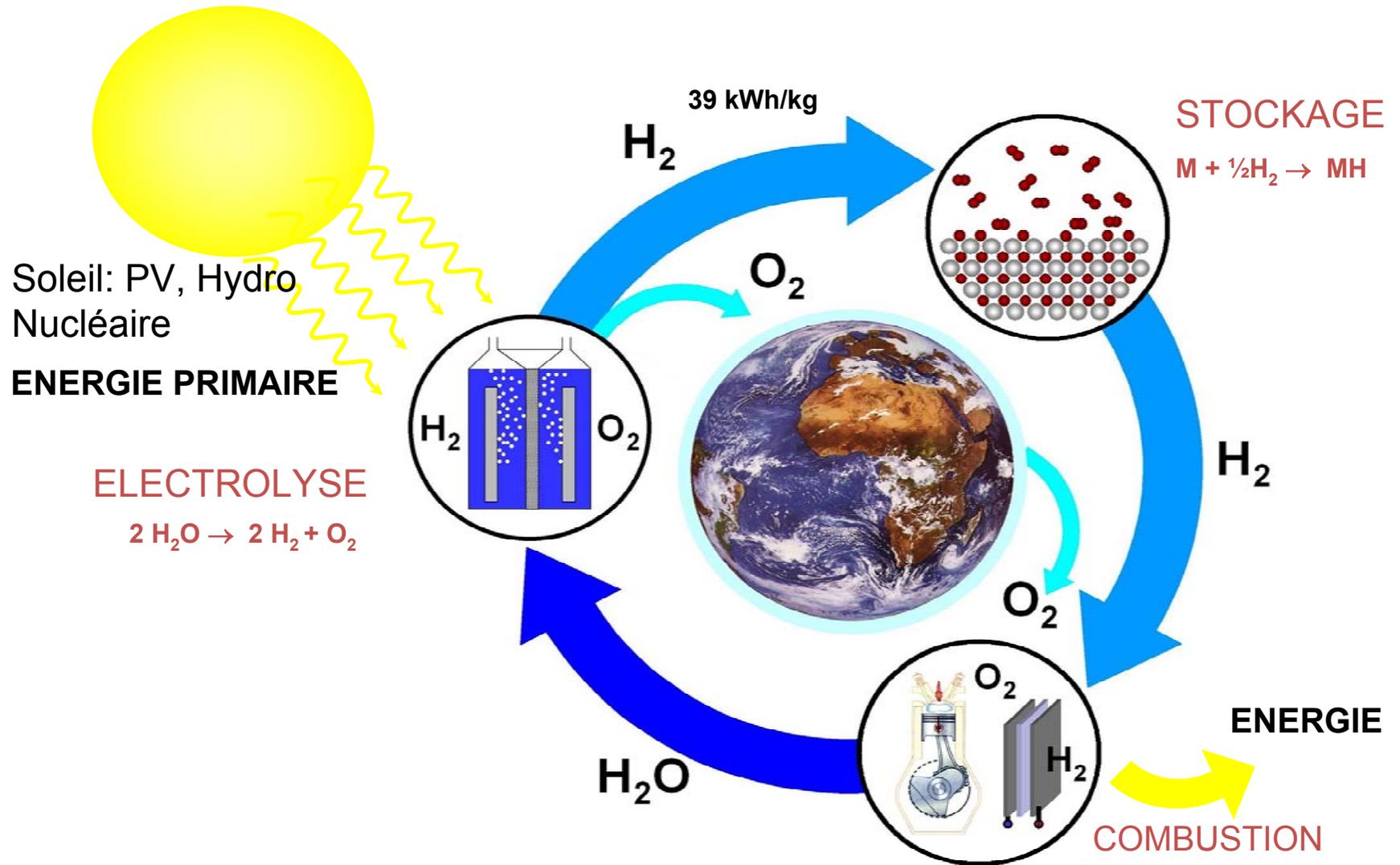


A partir d'énergies renouvelables

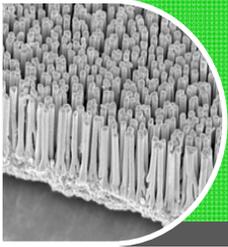




CYCLE DE L'HYDROGÈNE POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE



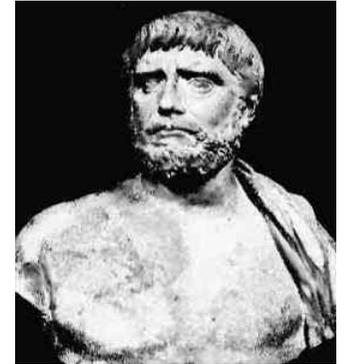
With the courtesy of Andreas Züttel (EMPA-2007)



LES GRANDS VISIONNAIRES

➤ Thales de Miletus 625-547 B.C.

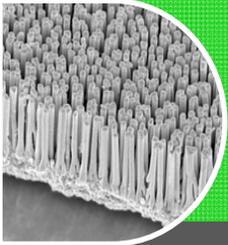
“L'élément primitif de toute chose est l'eau, toute chose provient de l'eau et retourne à l'eau”



➤ Jules Verne “L'île Mystérieuse 1874”

" Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que **l'hydrogène et l'oxygène**, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, **fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable** et d'une intensité que la houille ne saurait avoir ".

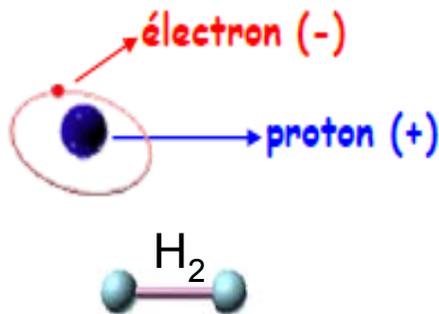
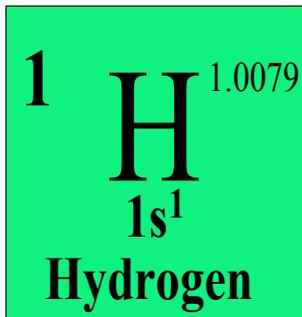




L'hydrogène et quelques propriétés physiques

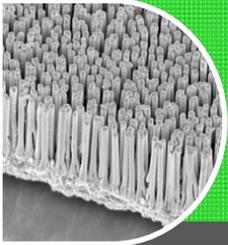
➤ Hydrogène:

- Initialement identifié par **Cavendish** en 1776
- Appelé « hydro-gène » (= formation d'eau) par **Lavoisier** in 1787



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

- L'élément le plus abondant de l'univers et le troisième à la surface de la terre.
- L'hydrogène terrestre est sous forme d'hydrocarbures ou d'eau

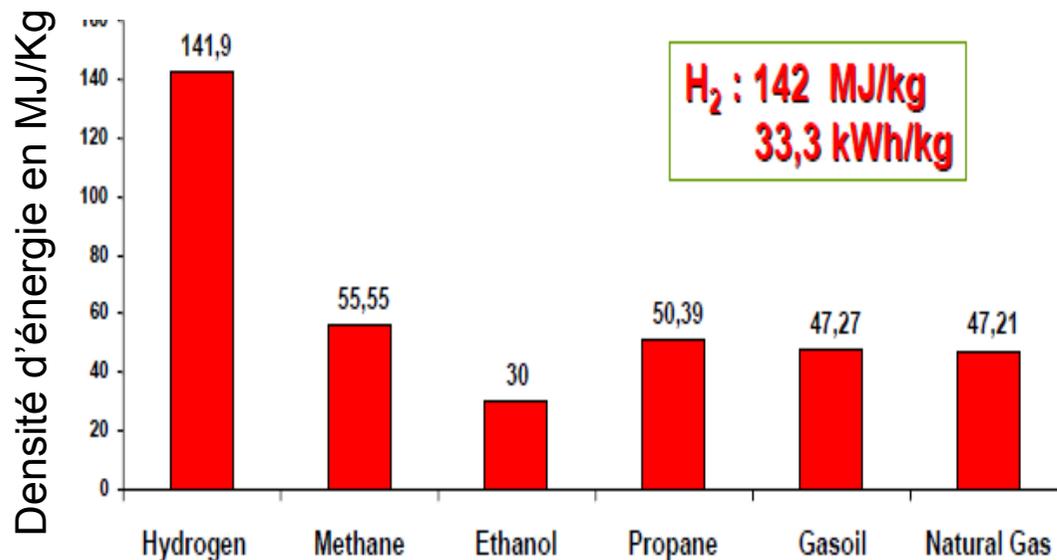


L'hydrogène est un excellent carburant

➤ Chaleur de combustion (HHV)

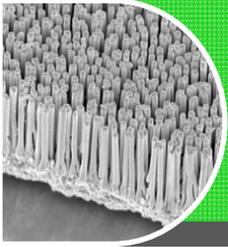


➤ Comparaison avec d'autres carburants



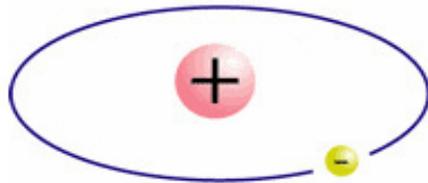
Combustible	Densité d'énergie massique (MJ/kg)	Densité d'énergie volumique (MJ/l)
Hydrogène	142	8 (à 70 MPa)
Gaz naturel	54	10 (à 20MPa)
Essence	42	28

Puissance énergétique très élevée par poids, mais faible par volume.



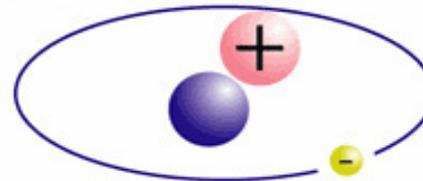
Trois isotopes différents

Protium



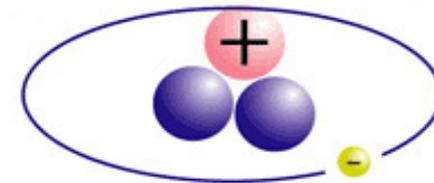
99.98 %

Deuterium



0.02 %

Tritium



Radioactif



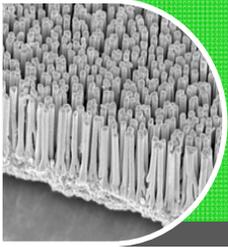
Tritium

- Source de neutrons
Utilisé dans les armes nucléaires
pour augmenter la fission
“Bombes à Hydrogène”

Mauvaise réputation
pour l'hydrogène

Ivy Mike (1952)





Utilisations de l'hydrogène

➤ Différentes utilisations

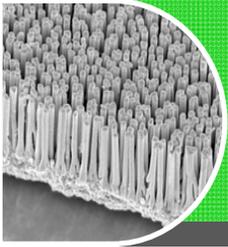
- Synthèse d'ammoniac (...engrais) via la méthode Haber 50 %



- Autres produits chimiques (méthanol, amides, H_2O_2 ...) 12 %
- Pétrochimie (désulfuration,) 37 %
- Combustible pour les applications spatiales (navette américaine, Fusée Ariane...) < 1 %



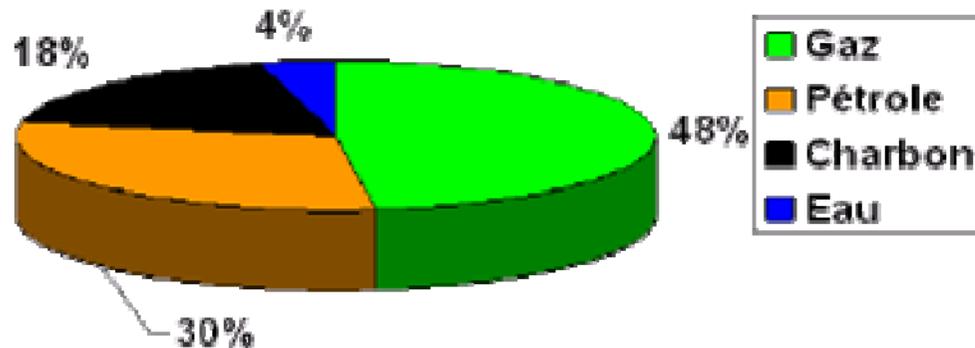
Si les piles à combustibles sont développées pour les voitures
→ La production mondiale de H_2 devra être multipliée **par 30!!!**



Production de H₂: Plusieurs procédés

- Production annuelle en 2010: ✓ 680 milliards de Nm³

➔ H₂ n'existe pas à l'état naturel



Source principale:
gaz naturel
(70-90 % CH₄, 5-15% C₂H₆....)

➔ Différentes sources pour la production de H₂

Sources fossiles

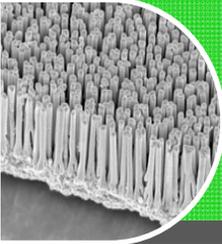
- Procédés de vaporeformage
- Procédés d'oxydation partielle

Biomasse

- Transformation thermochimique

Eau

- Électrolyse
- Photoélectrolyse
- Photosynthèse
- Thermochimie

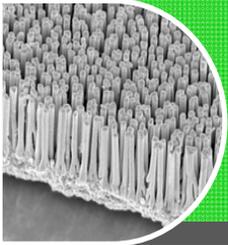


H₂ à partir des sources fossiles (Hydrocarbures)

➤ Le Procédé vaporeformage (reformage à la vapeur d'eau)

Trois étapes successives

- 1) Production d'un mélange CO/H₂ appelé "gaz de synthèse"
- 2) Réaction gaz à l'eau (transformation de CO en H₂)
- 3) Purification de l'hydrogène



Vapo-reformage

1^{ère} étape

➤ 1) Formation du «gaz de synthèse» (CO + H₂)

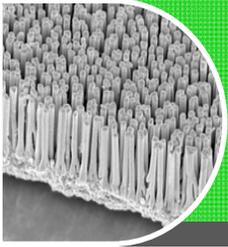


Procédé endothermique: 900°C/25 bars avec un catalyseur (souvent Ni)

Composition du «gaz de synthèse» pour des sources différentes

% vol	méthane	Gaz naturel	LPG	naphta
H ₂ ↘	75.1	73.9	71.9	69.5
CO ↗	12.2	12.6	13.6	14.2
CO ₂ ↗	9.7	10.4	12.7	14.2
CH ₄ ↘	3.1	2.9	2.4	2.1

Poids moléculaire



Vapo-reformage: suite

➤ 2) Réaction du gaz à l'eau (T de 200 à 400°C)



Réaction globale (Bilan)



Rendement 65 à 80%

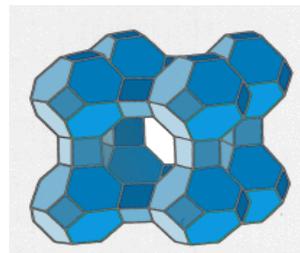
➤ 3) Purification de l'hydrogène (séparation H₂/CO₂)

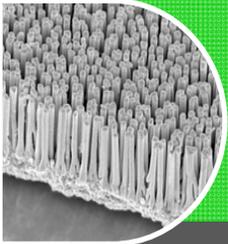
- Décarbonatation en utilisant une solution concentrée de NaOH

→ **95-98 %**

- **Adsorption** sélective de gaz sur des zéolithes à températures près ambiantes

→ **99.999 %**



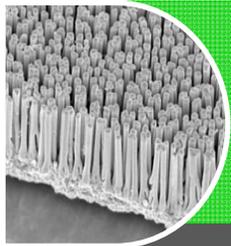


Unité de reformage



Bergen-op-Zoom

- H₂/CO production plant (1999)
- With a Steam Methane Reformer
- Capacity of 32,000 m³/h of H₂ and 8,000 m³/h of CO



Reformage par oxydation partielle: à partir d'hydrocarbures

➤ 1) 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**)

➤ 2) Réaction du gaz avec l'eau



Rendement 50 à 65%

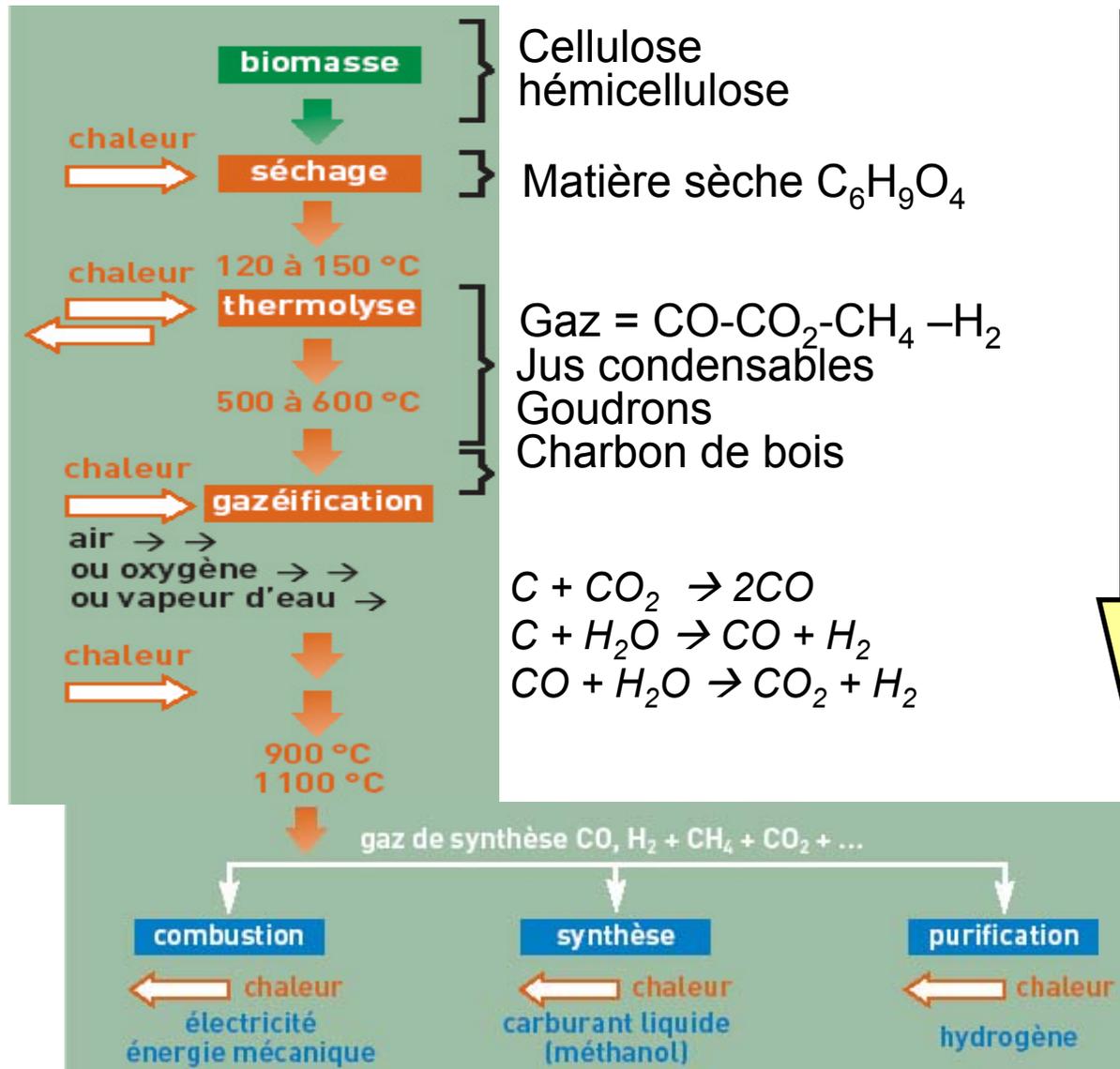
➤ 3) Purification de l'hydrogène

par décarbonatation et adsorption par variations de pressions

Production de CO₂ plus élevée que par vaporeformage

Production de H₂ à partir de sources fossiles: émissions massives de CO₂
Hydrogène: vecteur énergétique propre???

Transformation thermo-chimique de la biomasse pour la production de H₂



Séchage à 120-150°C

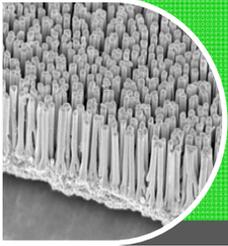


Décomposition thermique à 600°C → formation de charbon de bois

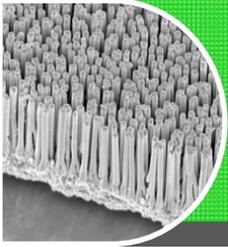
Gazéification à 1000°C par réaction avec la vapeur → Formation de syngaz (CO + H₂)

L'efficacité du procédé complet est encore faible étant donné la difficulté à maîtriser la chaleur

Energie nécessaire pour une mole de H₂ ~ 60kJ



**Production de H₂ à
partir de l'eau:
approche non polluante ...**



Électrolyse de l'eau: Eau + électricité

➤ Première électrolyse de l'eau remonte à 1801 par Nicholson et Carlisle



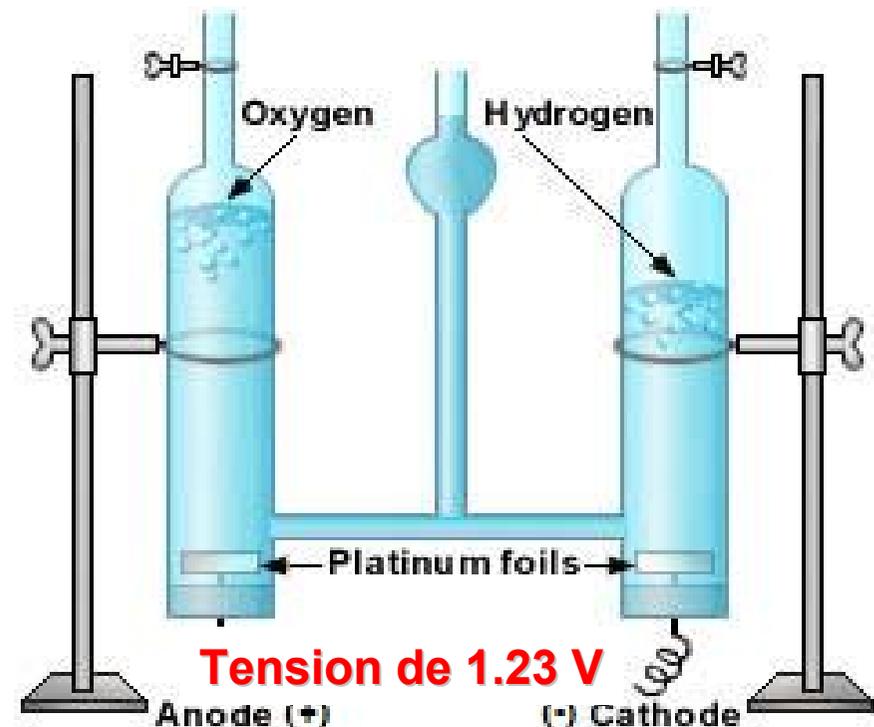
$$\Delta G^0 = -RT \ln K = -nfE^0$$

$$\Delta G^0 = 237 \text{ kJ/mol}$$

$$\Rightarrow E^0 = 1.23 \text{ V at } 298 \text{ K}$$

• Différents électrolytes

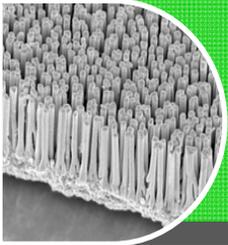
- Solutions Alcalines (KOH)
- Membranes polymères échangeuses de protons (Nafion)



Dans les cellules industrielles :

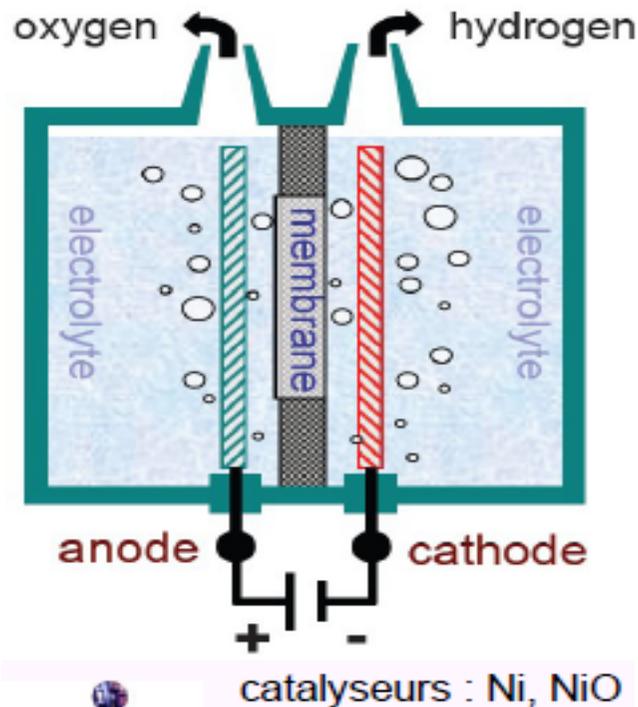
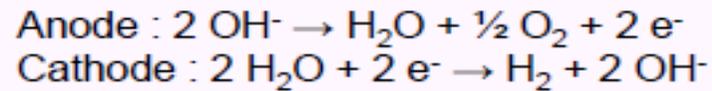
Tension = 2 V (pour compenser les pertes ohmiques aux électrodes)

Température 80°C, Pression 100 bars → efficacité atteignant 70-80 %



Électrolyse de l'eau en milieu alcalin

➤ Réactions

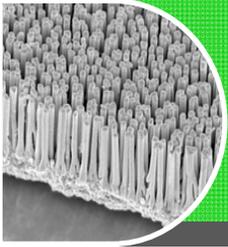


*Électrolyseur alcalin Norsk-Hydro
485 Nm³ H₂ / heure*



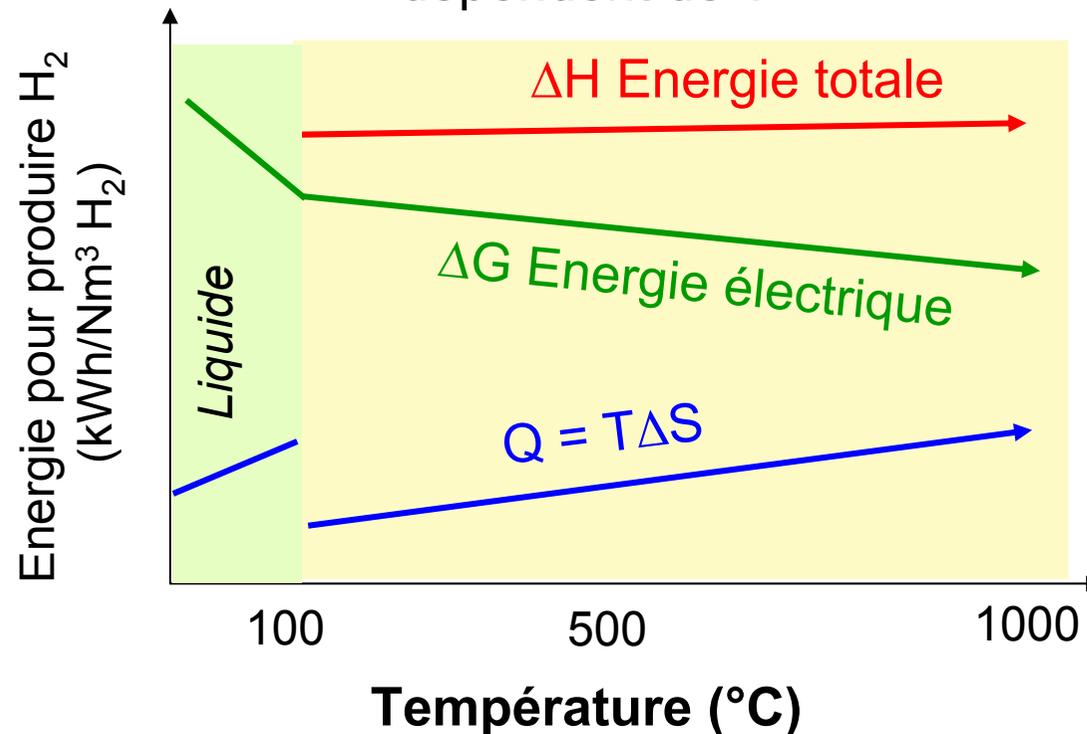
From P.Millet

Rendement de 65 à 70%: (280 KJ/mole de H₂)
intérêt si l'électricité est bon marché...



Simple concepts of thermodynamics

Grandeurs ΔG , ΔH et ΔS
dépendent de T



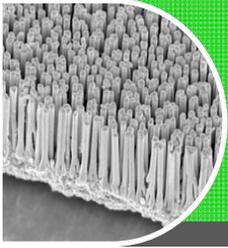
$$\Delta G = \Delta H - T.\Delta S$$

$$E = -\Delta G/nF$$



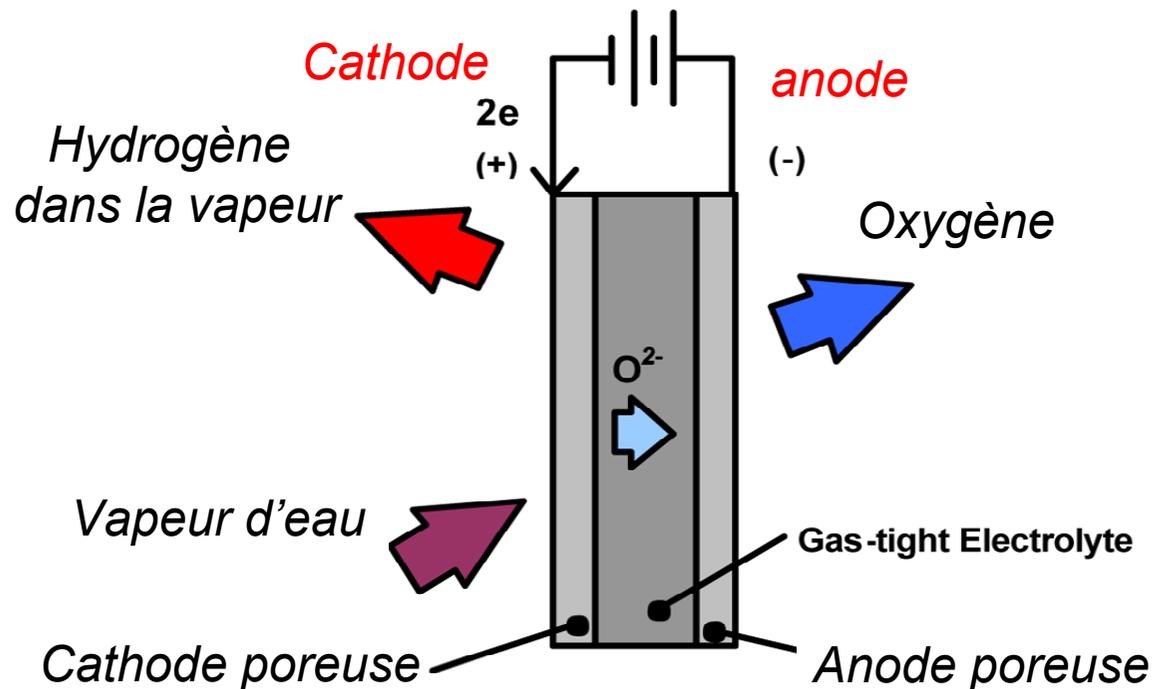
L'augmentation de température permet

- Une diminution de l'enthalpie libre $\Delta G = \Delta H - T.\Delta S$
- Une diminution de la perte ohmique alors que la conductivité augmente



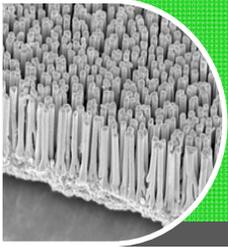
Électrolyse à haute température (HTE)

➤ Électrolyse à 700°C



- Utilisation de la céramique à ions conducteurs O^{2-} comme électrolyte
- Matériaux semblables à SOFC: ZrO_2 dopé ou CeO_2

Compromis électricité – température???

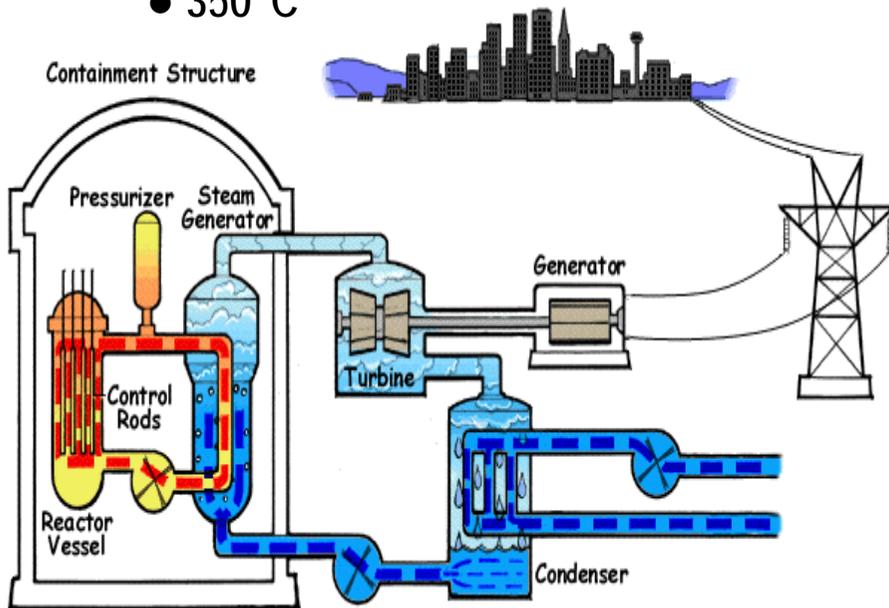


Électrolyse à haute température (HTE)

Souvent associée aux réacteurs nucléaires

➤ Réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP)

- 350°C

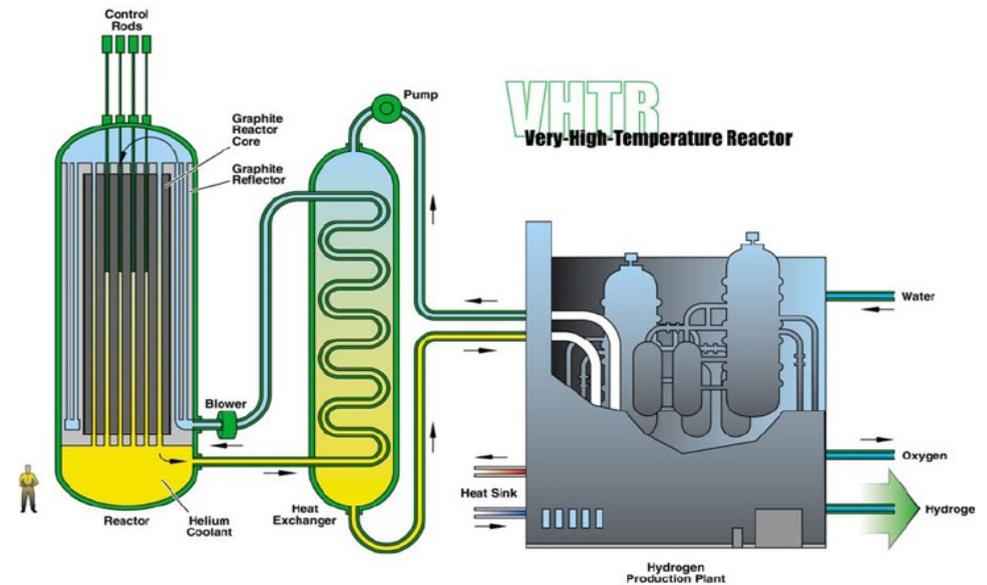


Efficacité globale = 22 %
(réacteur 30 % x électrolyseur 75 %)

Seulement 1 % de la production mondiale de H₂ ; (H₂ pur à 99.999%)

➤ Réacteurs de Génération IV

- Réacteur (VHTR) produira de la chaleur à 1000°C comparé à 350°C pour réacteurs pressurisés



- Efficacité globale = 45 %
(réacteur 50 % x électrolyseur 90%)

Pas avant 2040 ??

Fractionnement thermique de l'eau

➤ Thermolyse de l'eau (2100°C)



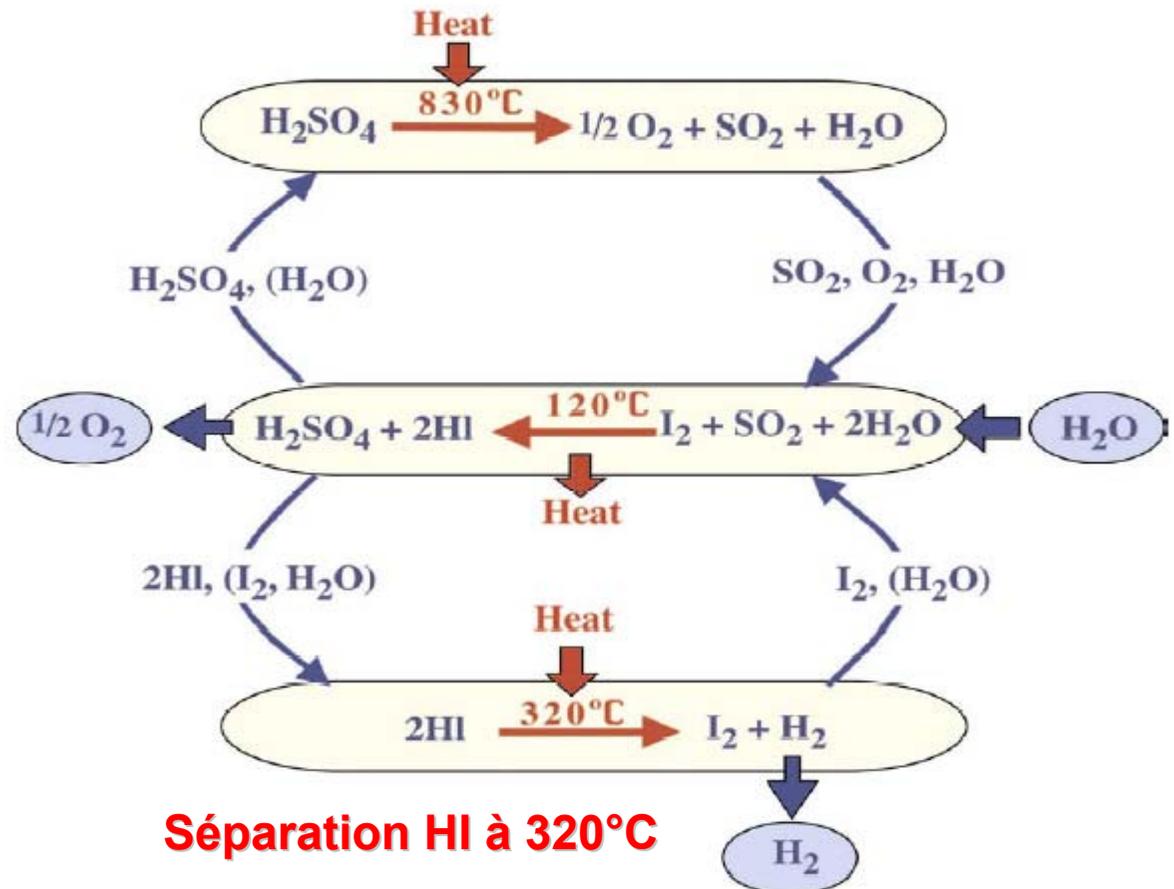
➤ Procédé thermo-chimique se produisant à plus faible T

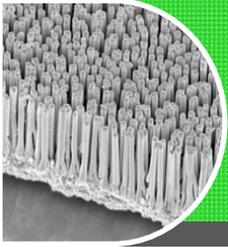
→ cycle Iode-soufre

(Inventé dans les années 1970
Par General Atomics, USA)

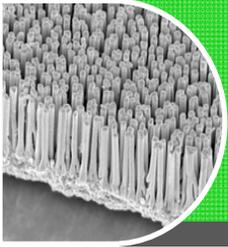
50 % environ d'efficacité

Les premiers réacteurs
industriels
prévus pour 2040 ??

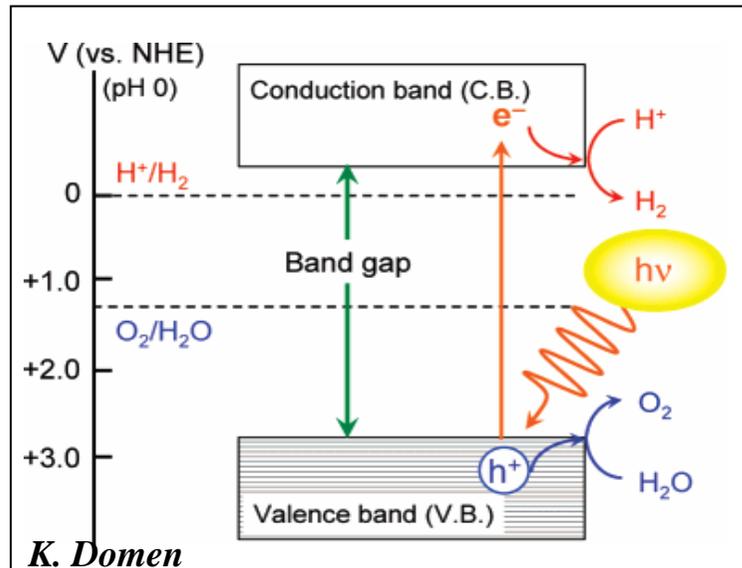
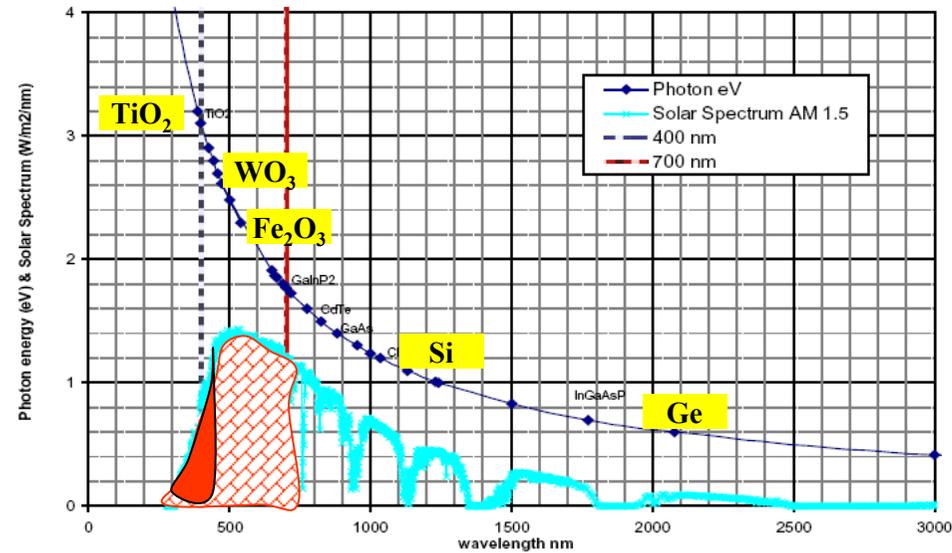
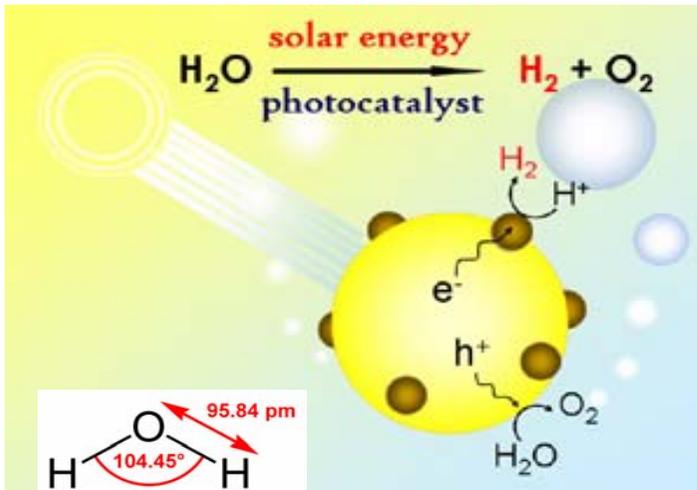




Production de H₂ dans le cas du développement durable

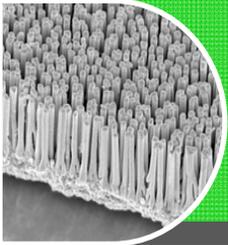


Production de H₂ par photo-électrolyse de l'eau

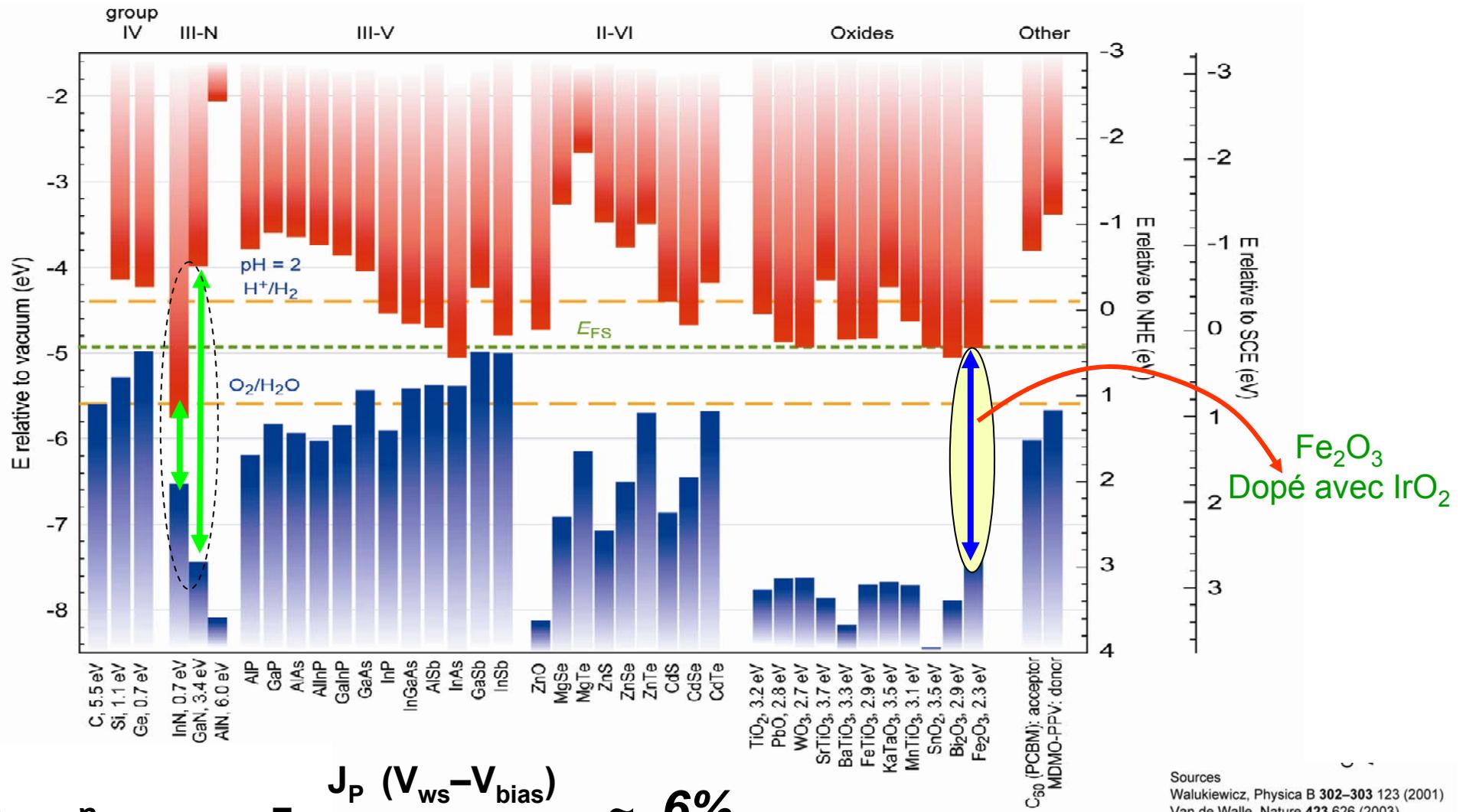


Paramètres nécessaires:

- Largeur de bande dans le visible
- CBM et VBM corrects
- Transfert de charge rapide à travers l'interface
- Résistance à la photo corrosion
- Prix faible, éléments abondants



Challenges dans le choix des semiconducteurs

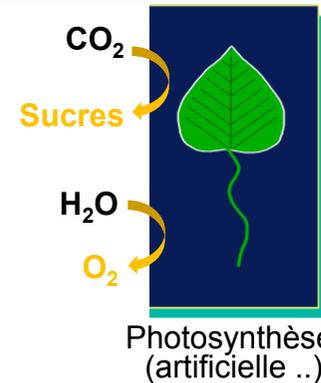


$$\eta = \eta_{\text{photo}} \eta_{\text{electrolyse}} = \frac{J_P (V_{\text{ws}} - V_{\text{bias}})}{P_{\text{in}}} \sim 6\%$$

Sources
 Walukiewicz, Physica B **302-303** 123 (2001)
 Van de Walle, Nature **423** 626 (2003)
 Bak, Int. J. Hydrogen Energy **27**, 991 (2002)

Production biologique d'hydrogène

➤ Photosynthèse



Fin des années 90: M. Siebert: Si certaines algues vertes sont privées de soufre, au lieu de produire O₂ comme dans la photosynthèse normale, elles vont produire du H₂.

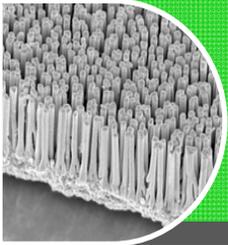
Production de H₂ : Augmentée par un facteur de 100000



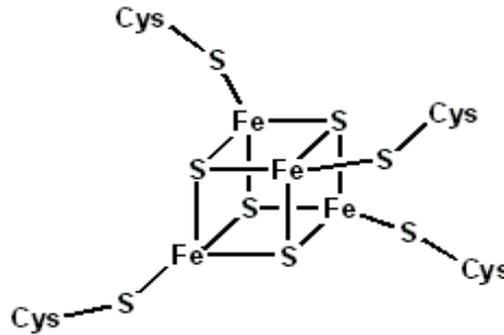
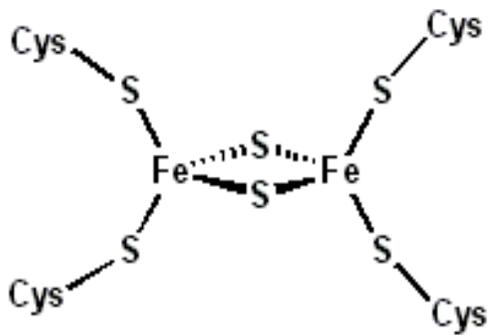
Chlamydomonas (algues vertes)

Formation d'hydrogène due aux enzymes appelée hydrogénase, qui peuvent agir comme donneurs d'électrons physiologiques (D)



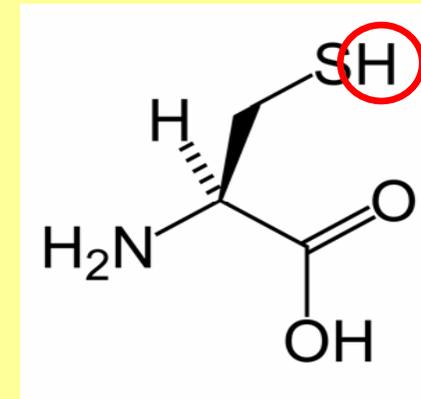


Exemple d'enzymes d'hydrogénase: les ferrédoxines



Formes oxydées

avec Cys = cystéine
 $\text{HSCH}_2(\text{NH}_2)\text{CHCOOH}$

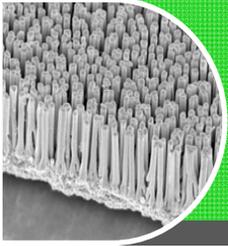


**Protons
mobiles**

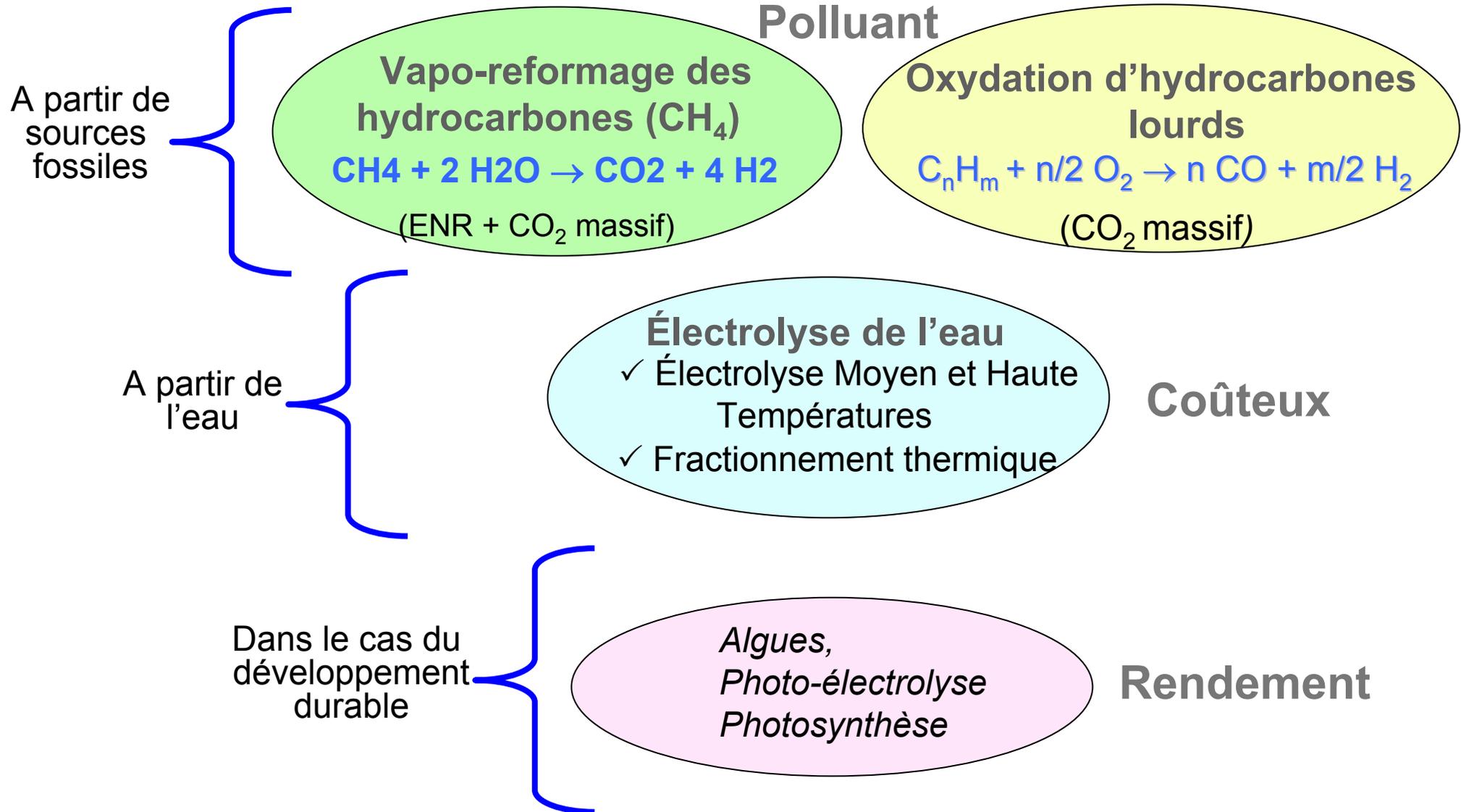
Procédé redox

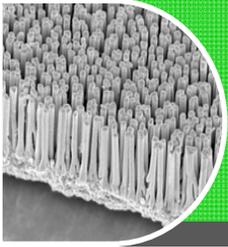


Faisabilité économique : l'efficacité énergétique atteint un maigre 0.1 %.
Des essais sont en cours pour résoudre ce problème grâce à des approches
bio-inspirées voire biomimétiques



En bref la production d'hydrogène





La filière Hydrogène: Plan de l'exposé



Pr

Oxygen Hydrogen

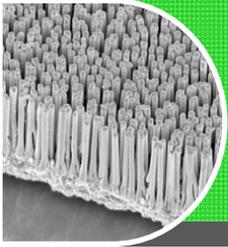


Distribution



- Distribue l'hydrogène où les gens en ont besoin





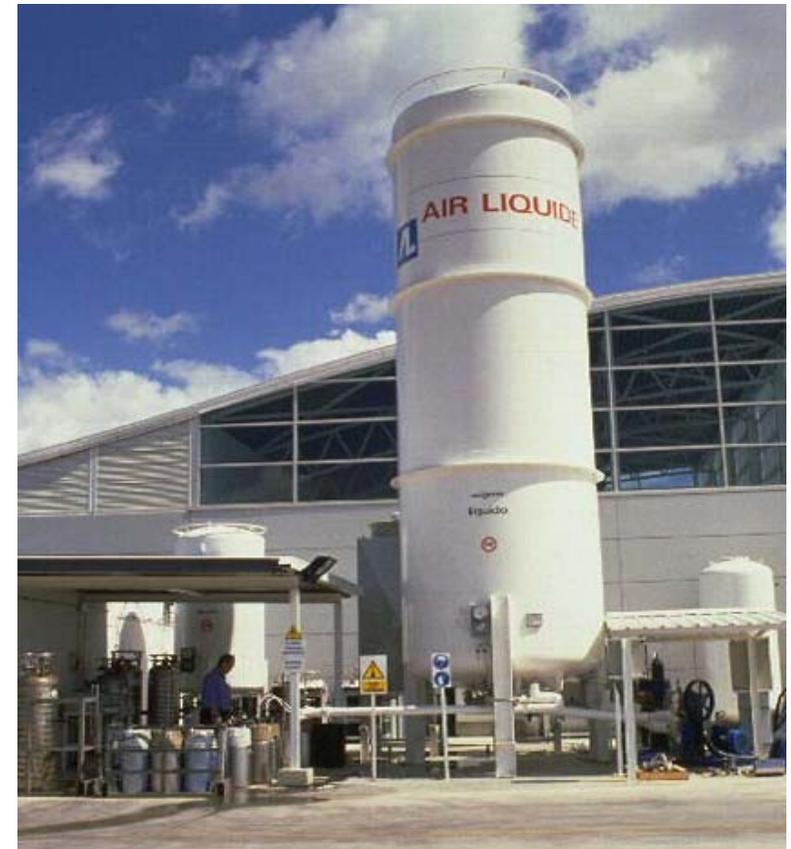
Différentes unités de production de H₂

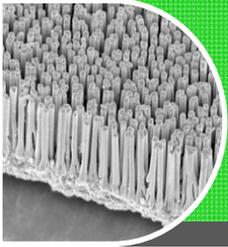
➤ Production centralisée
Unité de vapo-reformage
Jusqu'à 1000 kg H₂ /h



Comment distribuer cet H₂ ?

➤ Production sur site
Électrolyse basse température
Jusqu'à 100 Nm³/h (= 9 kg H₂)





Distribution de l'hydrogène

Par la route

- Hydrogène compressée à 200 bars
- Cylindres, bouteilles

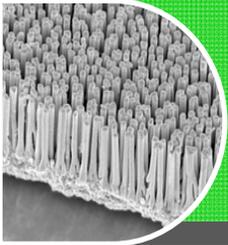


Air Liquide B50
10 Nm³ (= 0.9 kg H₂)

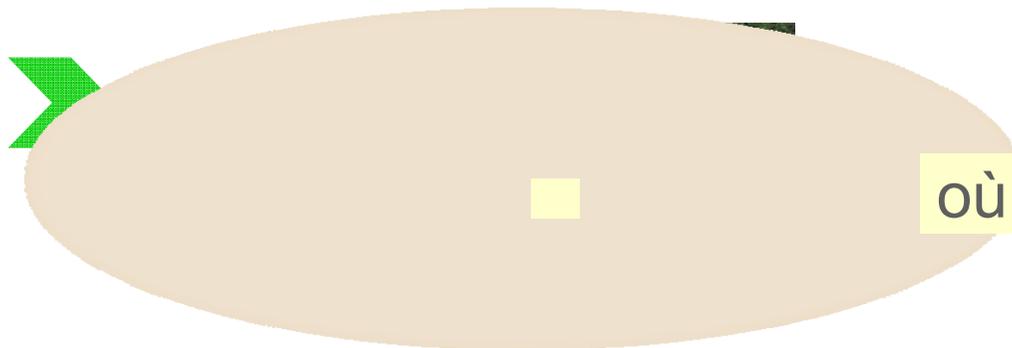
- Hydrogène liquéfié à 20 K
- Containers de camion (50 m³)



3500 kg H₂



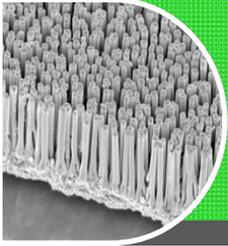
La filière Hydrogène: Plan de l'exposé



Stockage



- Fournir l'hydrogène quand il y a demande



Stockage de l'Hydrogène: garder à l'esprit

➤ Point central: Applications mobiles

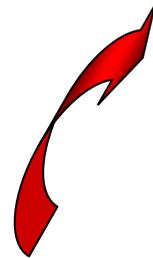
- Voitures alimentées par des piles à combustible PEM

Autonomie:

1 kg H₂ pour 100 km
5 kg H₂ pour 500 km

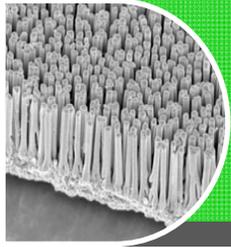
➤ 5 kg de H₂ à pression et température ambiante

- 56000 litres
- Sphère de diamètre 5.50 m



Nécessité d'augmenter la capacité
massique et volumique de l'hydrogène

DOE (2005): 5.5% en poids; 40 g/l



Stockage de l'hydrogène: Les différents types de stockage



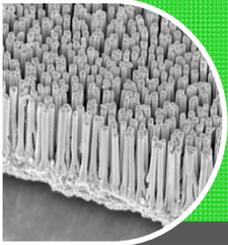
Stockages conventionnels

- **Gaz comprimé**
- **Liquide cryogénique**



Stockages à l'état solide

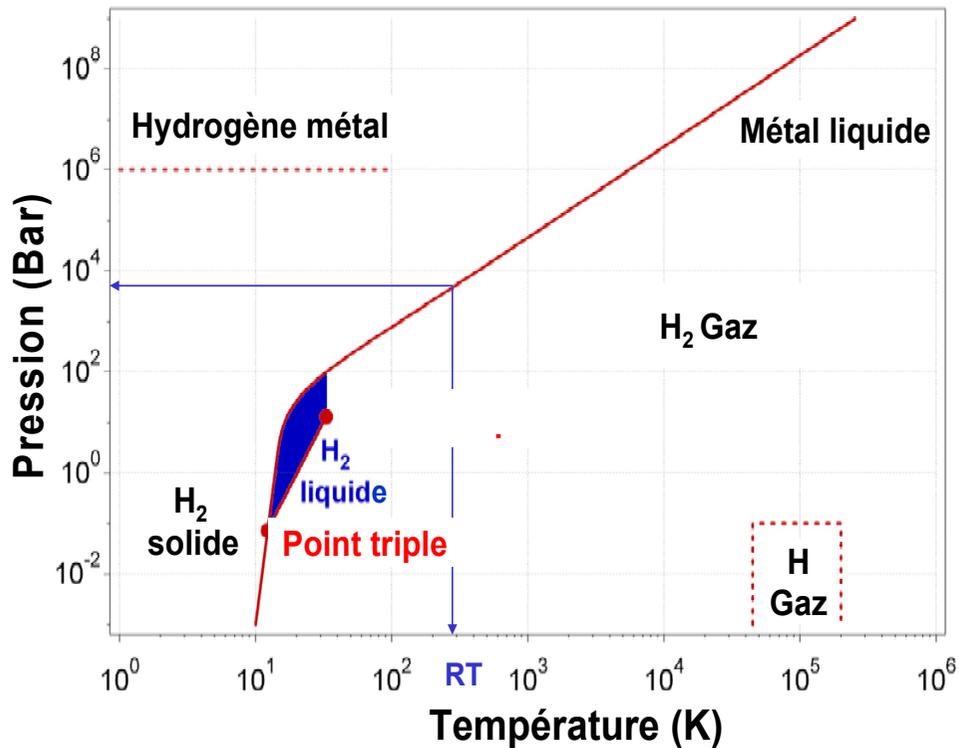
- Par **ad**-sorption
 - ✓ Procédé physique
(interactions H₂-surface)
- Par **ab**-sorption
 - ✓ Procédé chimique
(diffusion des atomes
dans le matériau)



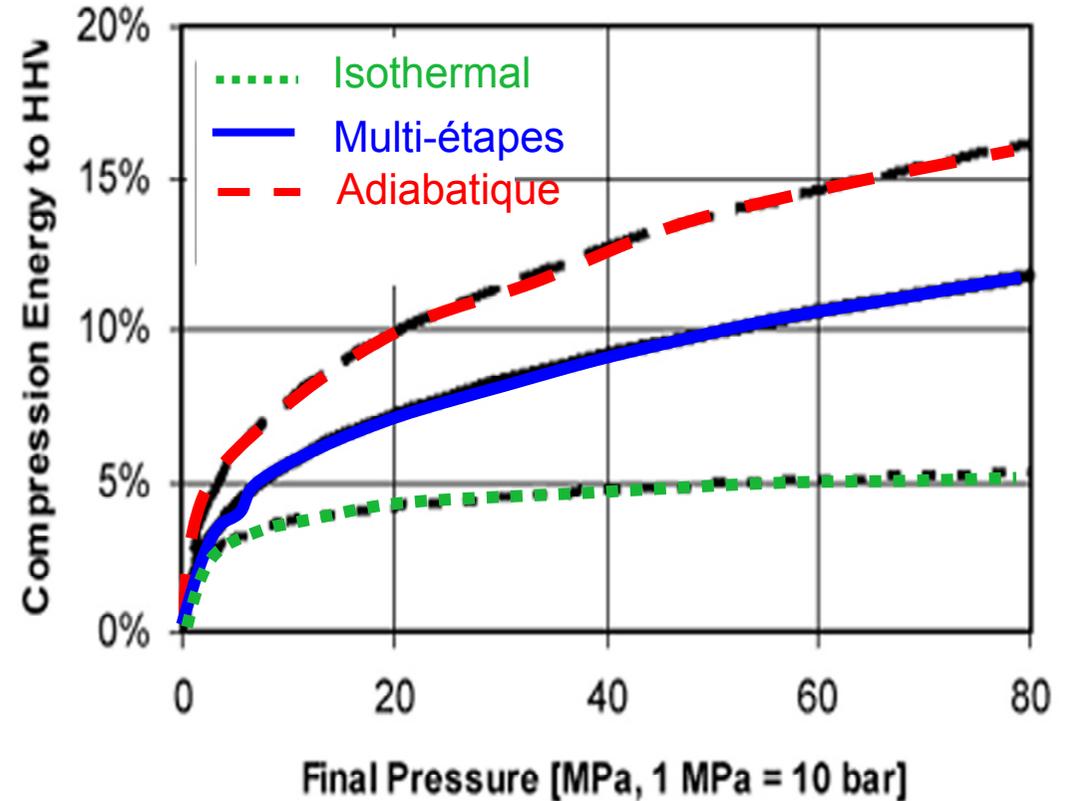
Considérations fondamentales pour le stockage de l'Hydrogène

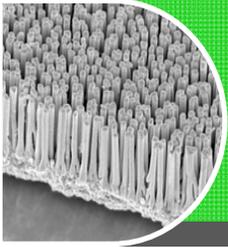


Diagramme de phase pour l'hydrogène



Coût énergétique de l'étape de la compression





Stockage sous pression:

Gaz comprimé

➤ Pression modérée

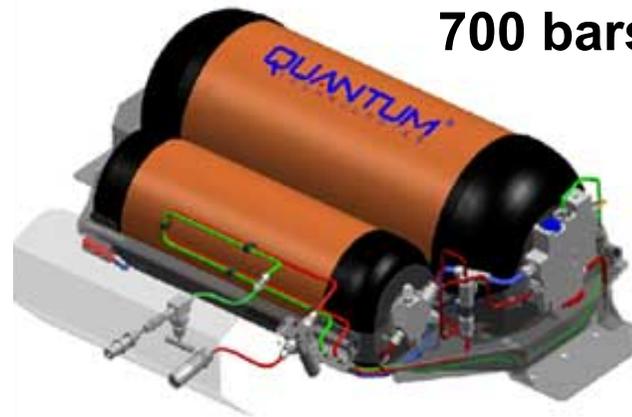
200 Bars à 21°C



(0.9kg de H₂ → 50 litres)

➤ Haute pression

700 bars



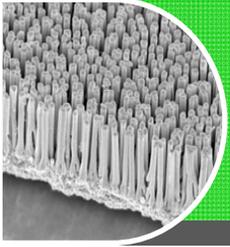
5 kg H₂ → 130 litres
(35 kg)

Capacité
gravimétrique
de stockage
(jusqu'à 14%)

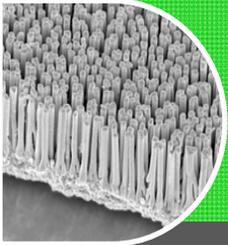
Gestion des hautes pressions

Énergie nécessaire à la compression
≈ 1/6 énergie fournie par H₂ (700 bars)

Risque de fissure du réservoir

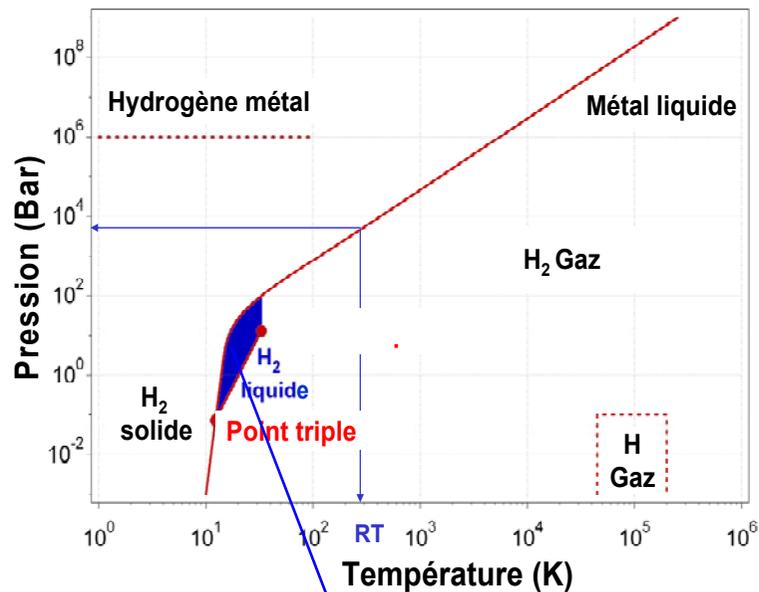


**Du stockage gaz
comprimé
au stockage liquide**



Hydrogène liquéfié

➤ Fortement utilisé pour les applications spatiales

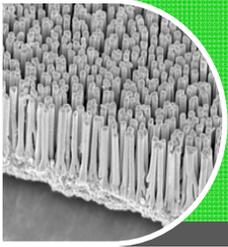


Hydrogène Liquide en dessous de 20 K (at 1 bar)
Densité = 70 kg / m^3



➤ Procédés de liquéfaction

- Cycle de Claude
- Cycle de Brayton



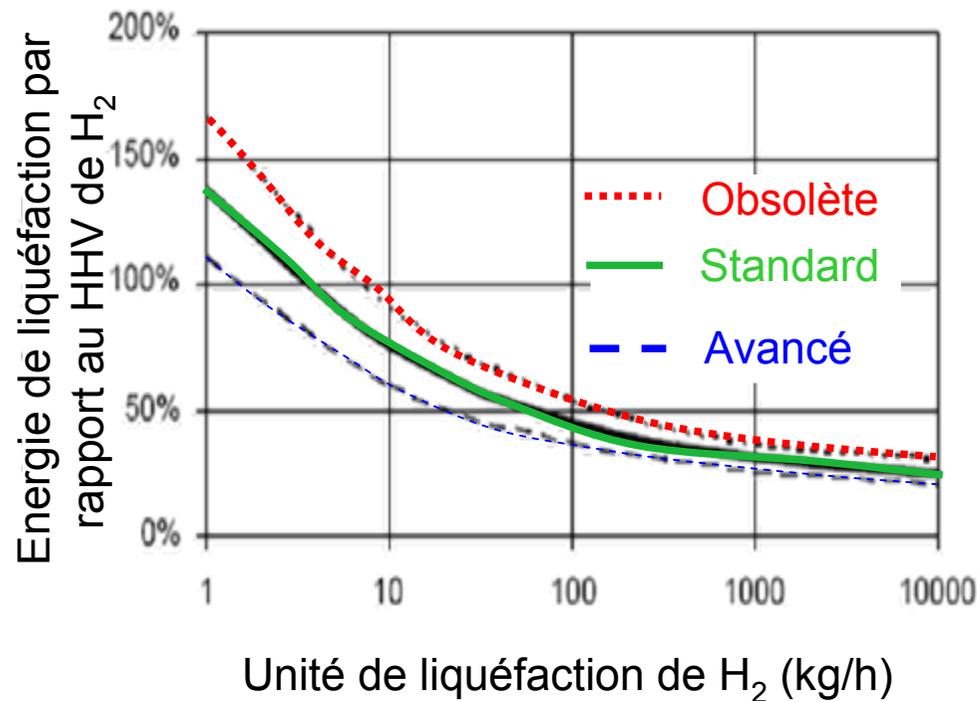
Hydrogène liquéfié

➤ Le Cycle de Claude (Créateur d'Air liquide)

- De 300K jusqu'à 230K par un groupe frigorifique mécanique
- De 230K à 80K par un cycle calorifique à N₂ liquide
- De 80K à 20K par un cycle calorifique à H₂



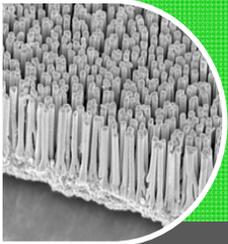
6 kg H₂ → 84 litres



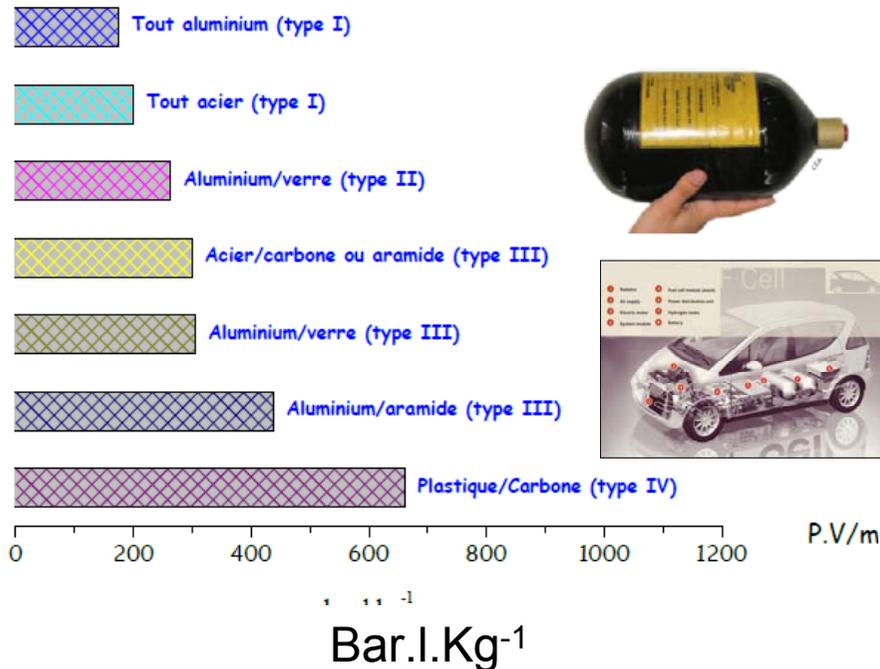
**Energie nécessaire à la liquéfaction
≈ 1/3 énergie fournie par H₂**

**Perte d'hydrogène par évaporation
(≈ 1%/jour)**

Hydrogène compressé vs. liquéfié: Comparaison



➤ H₂ compressé



- Faible densité volumétrique
- Développement de réservoirs résistants
- Peu attractif pour applications automobiles

Coût énergétique jusqu'à 20% du PCI de l'hydrogène

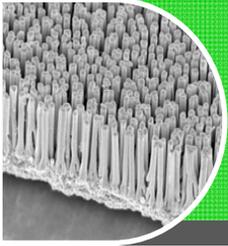
➤ H₂ Liquéfié



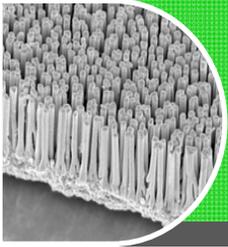
Station d'H₂ liquide: remplissage d'une BMW 745i

- ✓ Bonne capacité massique: (réservoir de 150 litres et 145kg pour 9.5 kg de H₂)
- ✓ Remplissage maîtrisée
 - Issues d'isolation thermique
 - Pertes importantes par évaporation

Coût énergétique jusqu'à 40% du PCI de l'hydrogène



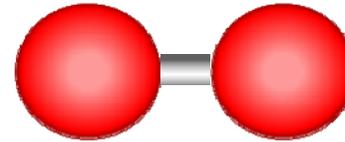
**Du stockage liquide
au stockage solide par
physisorption
ou chemisorption**



Stockage sous forme solide

➤ Adsorption = physisorption

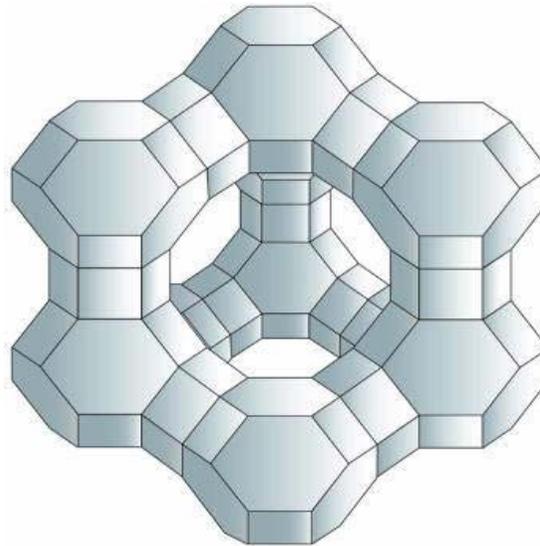
Interactions entre H_2 et des matériaux à haute surface spécifique



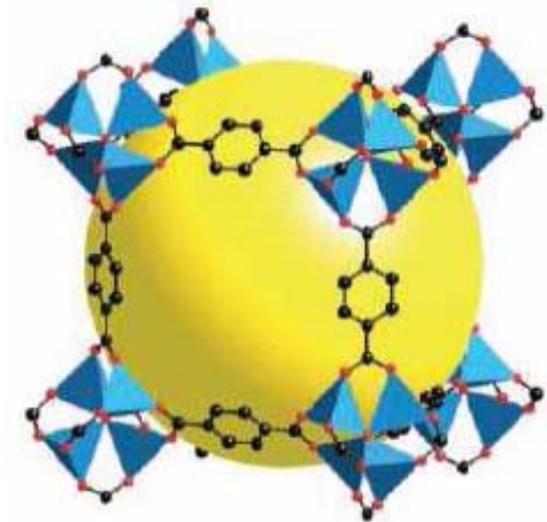
H_2 reste moléculaire



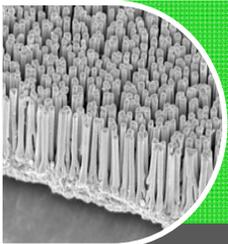
Carbone & nanotubes



Zéolites

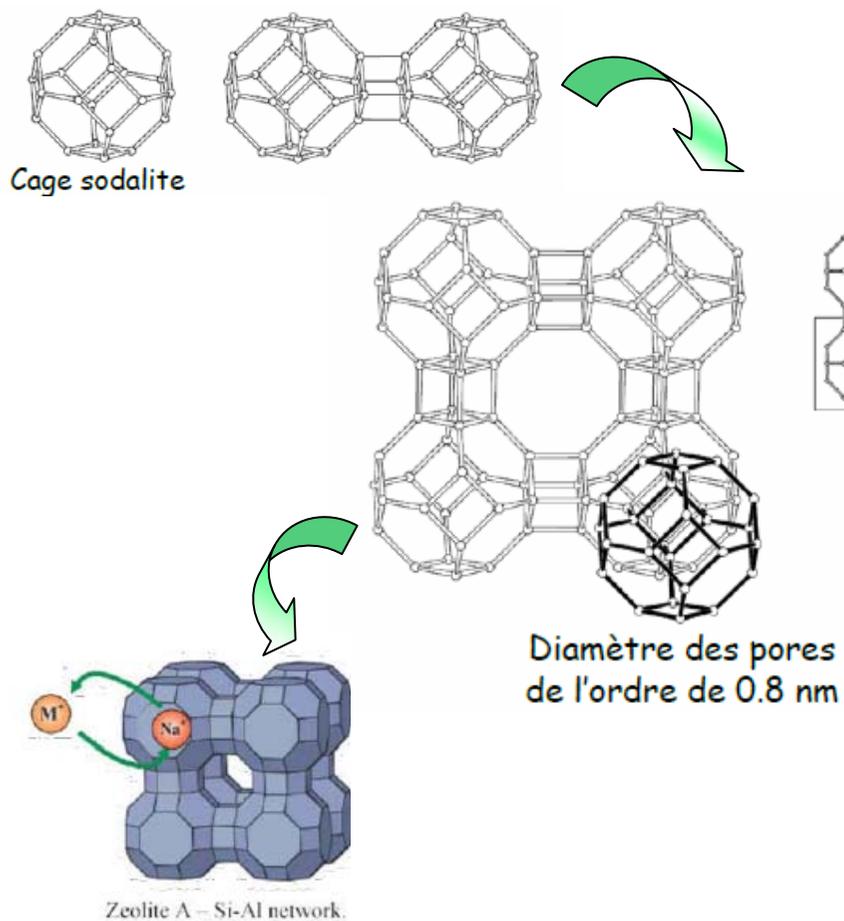


Charpente organométallique



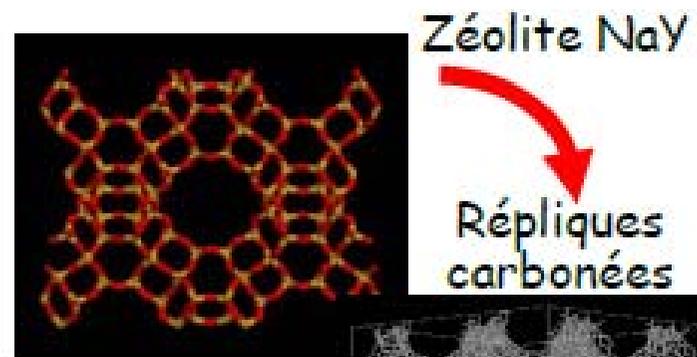
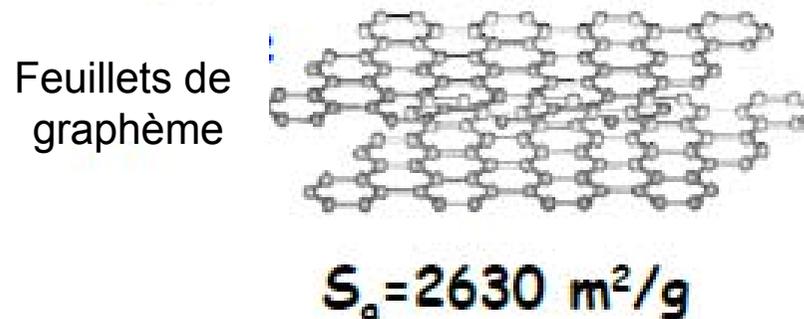
Matériaux nano/mésoporeux

➤ Zéolithes

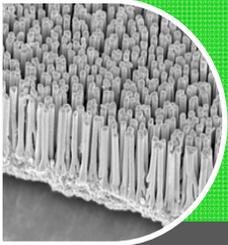


~ 2 w% à -200°C

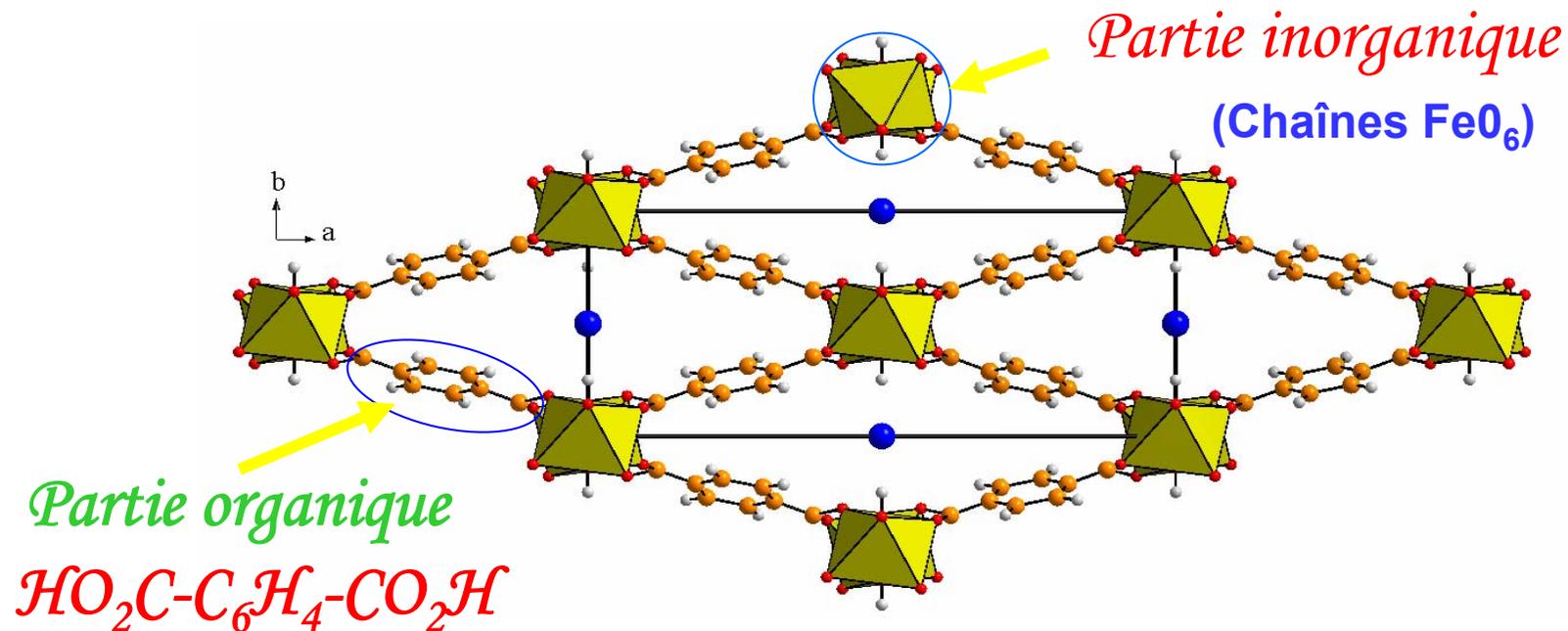
➤ Matériaux carbonés

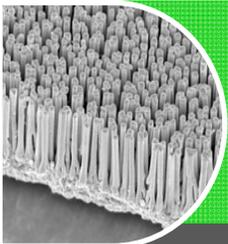


~ 6 w% à -200°C



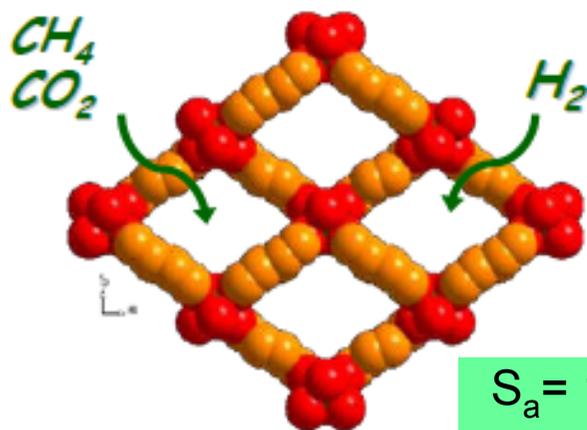
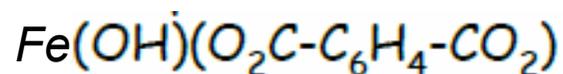
Matériaux mésoporeux à charpentes organométalliques





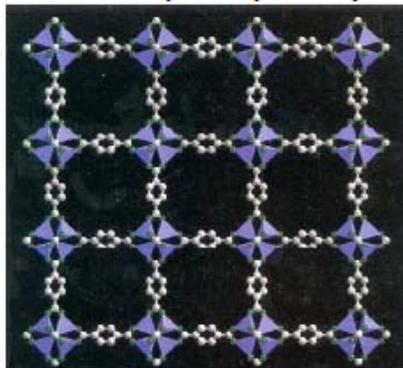
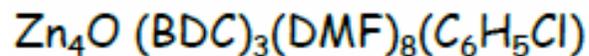
Matériaux mésoporeux sur la base de différents liants organiques

➤ MIL-53



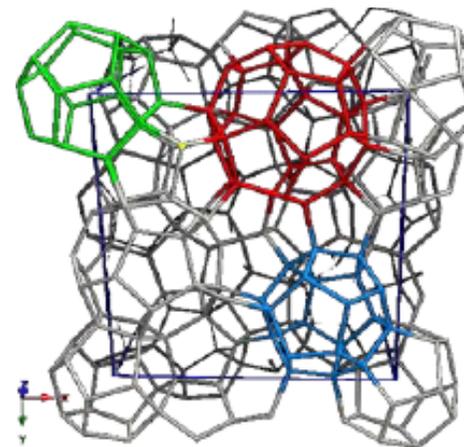
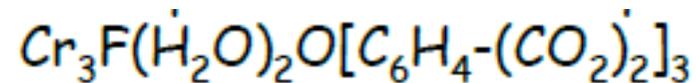
$S_a = 1500\text{m}^2/\text{g}$

➤ MOF-5



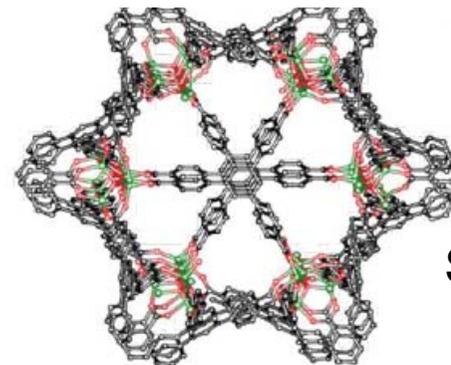
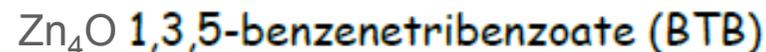
$S_a = 4170\text{m}^2/\text{g}$

➤ MIL-101

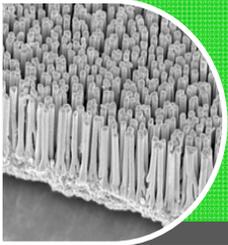


$S_a = 5500\text{m}^2/\text{g}$

➤ MOF-177



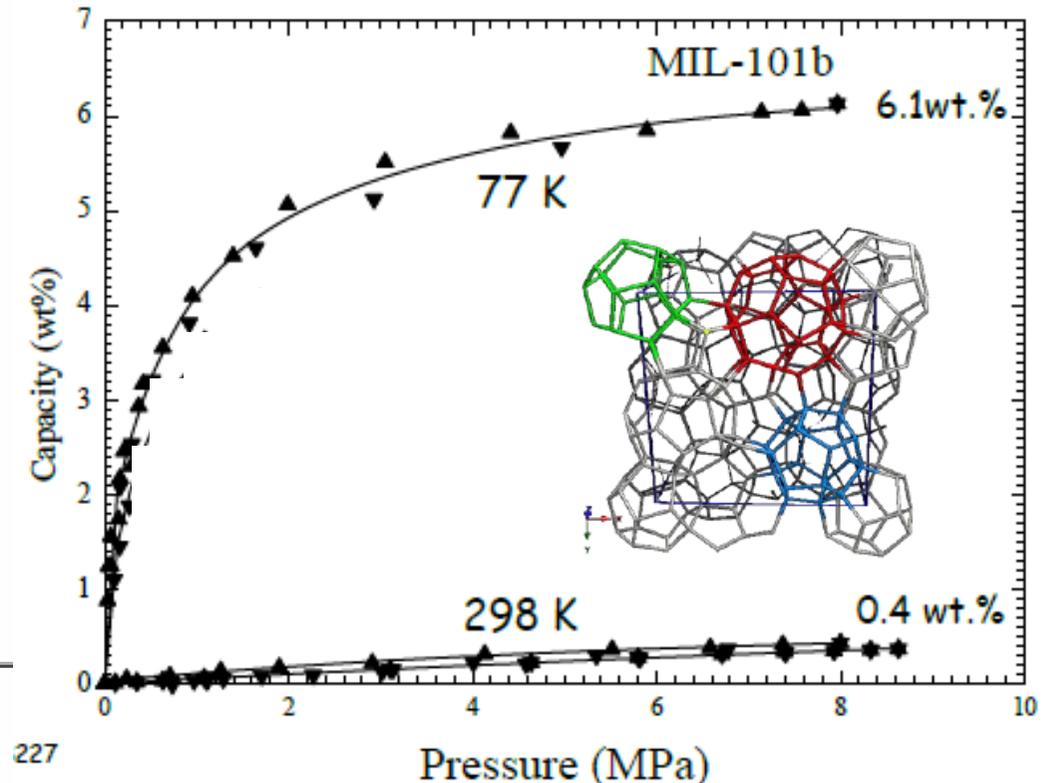
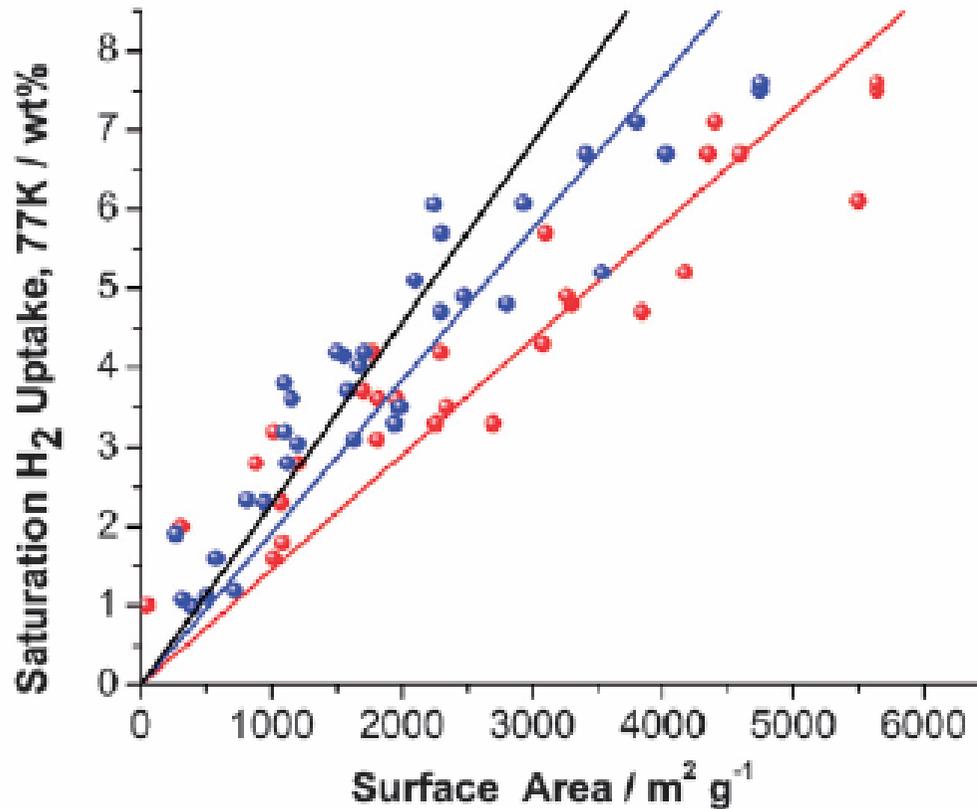
$S_a = 5640\text{m}^2/\text{g}$



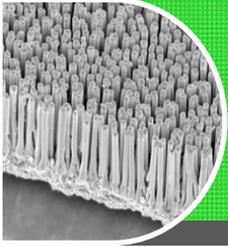
Propriétés d'adsorption des matériaux nanoporeux à charpentes organométalliques

➤ Surface vs. Adsorption de H₂

➤ Adsorption de H₂

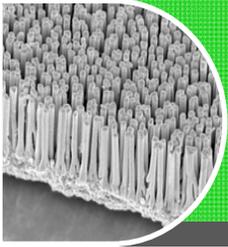


Problèmes de la physisorption: { Faible densité volumétrique
Basse température de fonctionnement



**Du stockage solide
par physisorption
ou stockage liquide
par chemisorption**

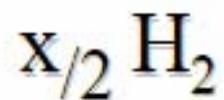
Chemisorption dans les solides: Le système métal-hydrogène



+



+



ΔQ



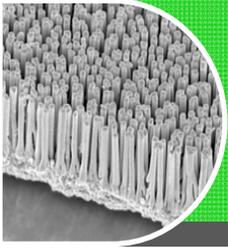
P_{H_2}

Hydrures
métalliques



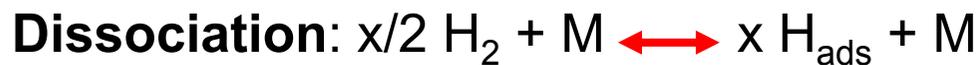
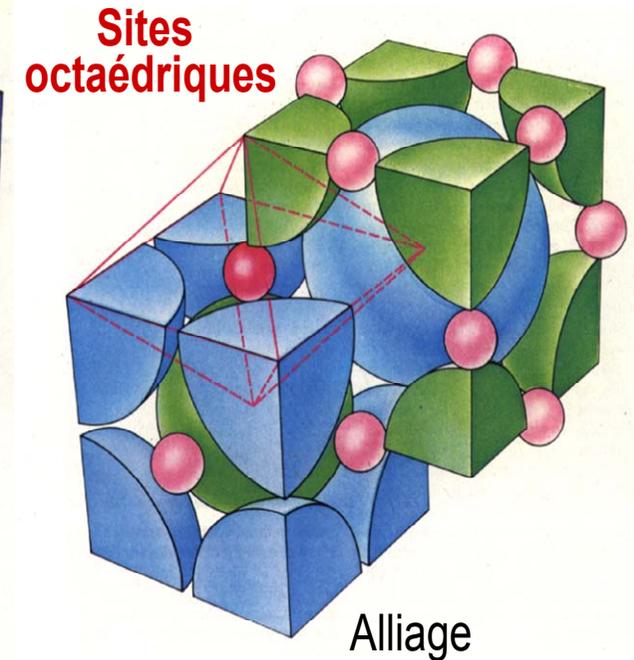
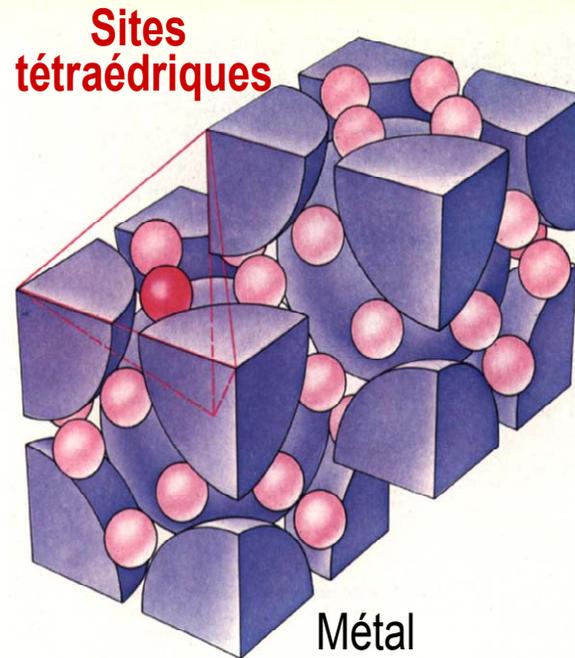
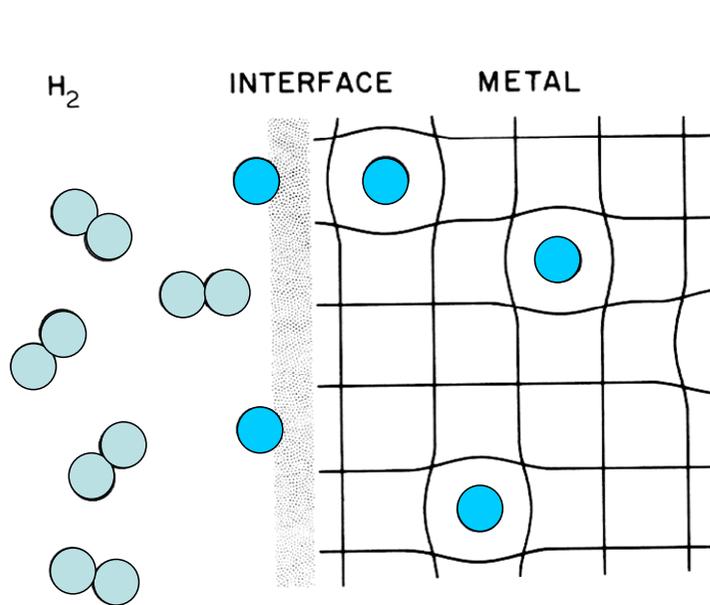
Hydrures
complexes

Réaction réversible à température et pression ambiantes

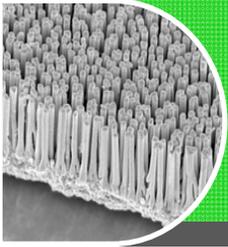


Stockage sous forme solide: absorption

➤ Absorption = chimisorption

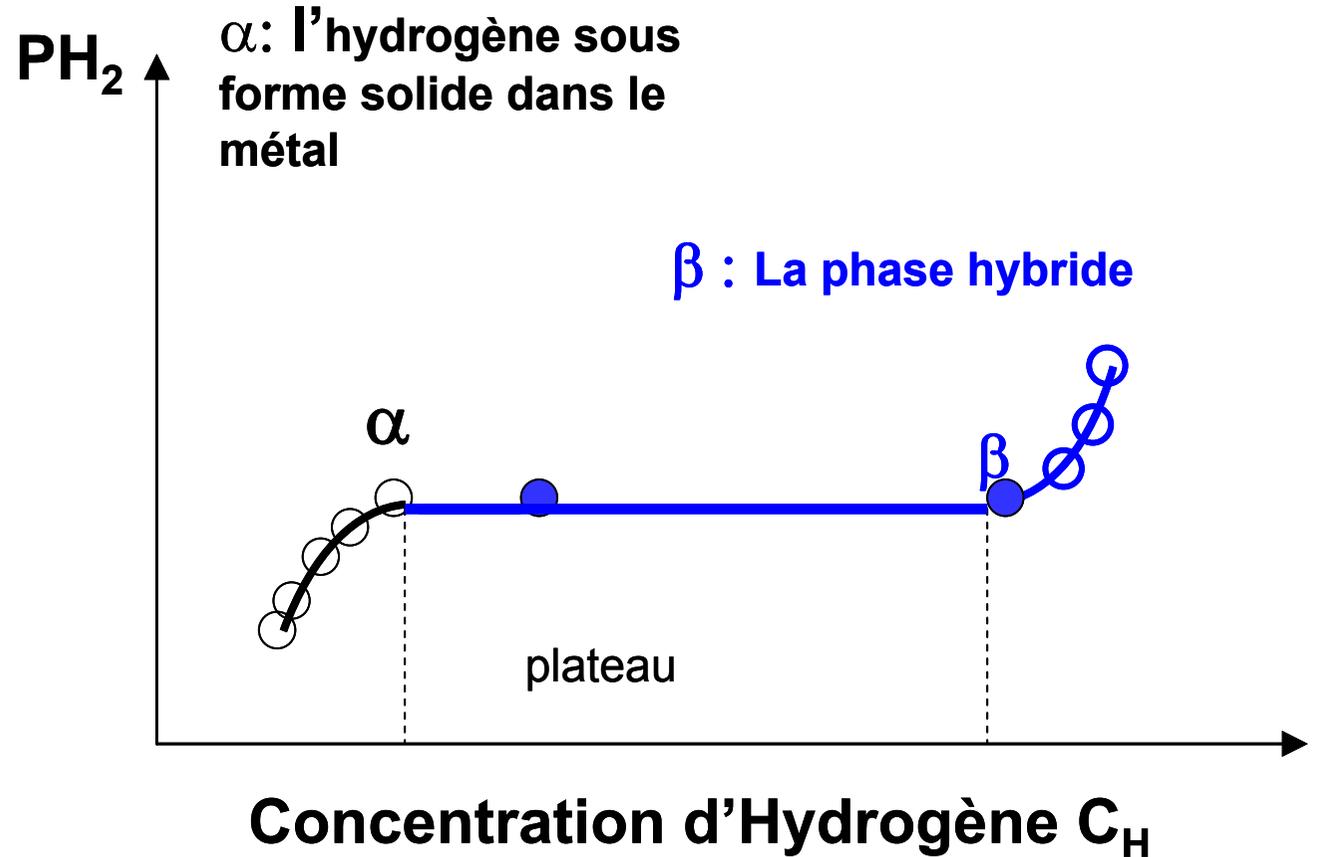
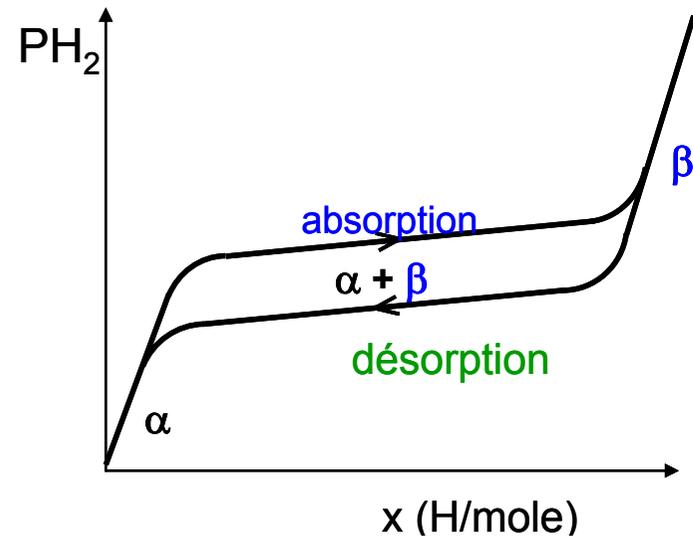
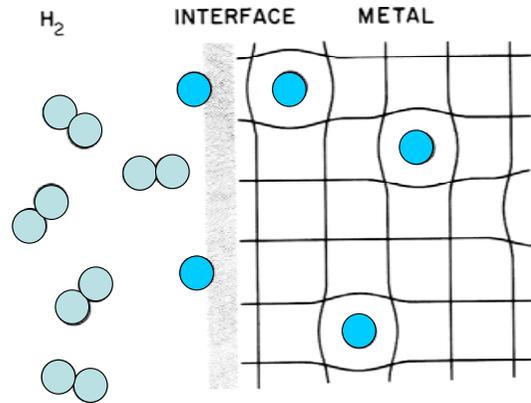


La densité des sites interstitiels changent et par conséquent la capacité de stockage de H_2 selon les métaux ou alliages

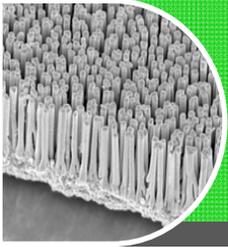


Systeme hydrogene metallique

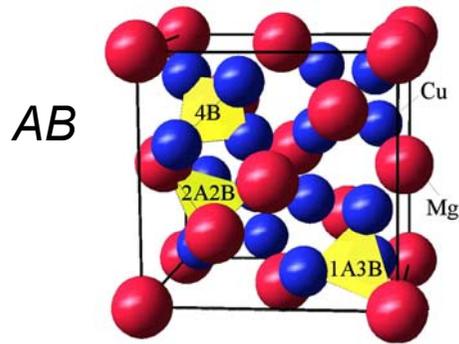
Pression – composition – courbes isothermiques (PCI)



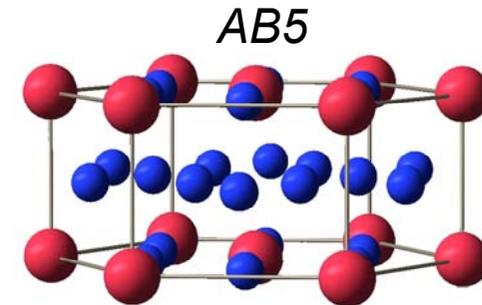
L'équilibre entre α and β correspond à un plateau où la concentration d'hydrogene augmente tandis que la pression est constante



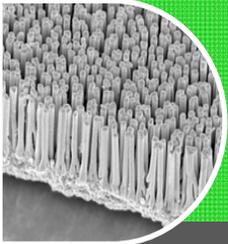
Les hydrures métalliques: Leur classification en grandes familles de type A_nB_m



- Hydrures de type AB₅, AB :**
- 1 atome H/atome métallique ou plus
 - cyclage réversible 10 000 times et plus
 - Opération à température ambiante sûre
 - Dense, mais très lourds et chers

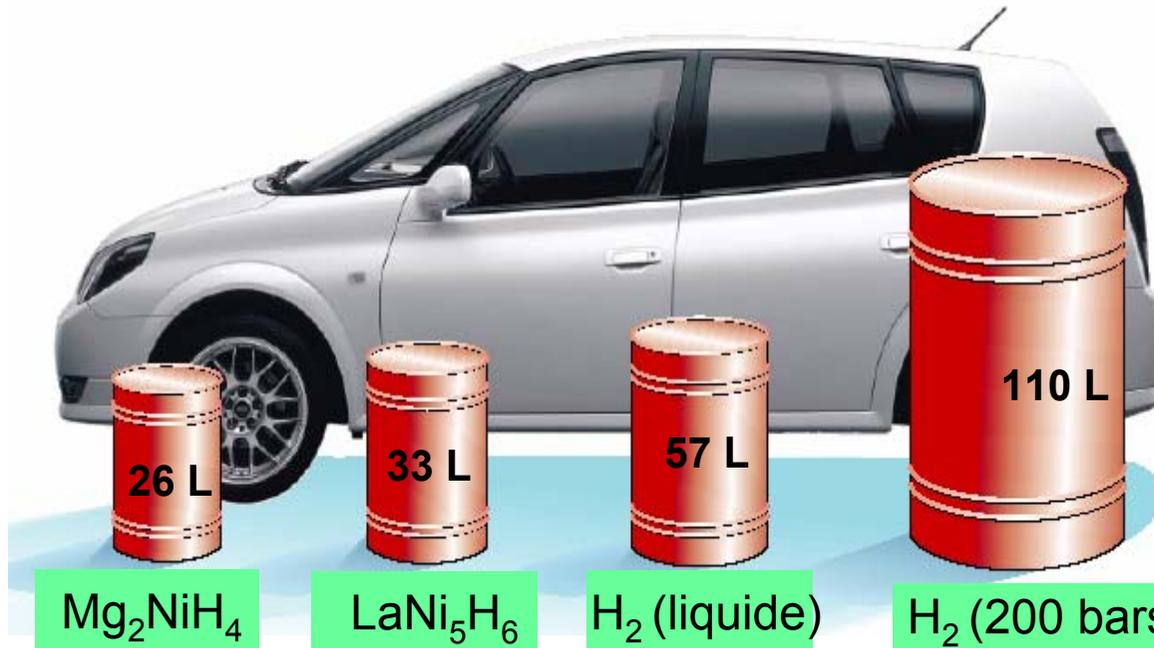


Composé intermétallique	Prototype	Structure
AB ₅	LaNi ₅	Haucke phases, hexagonal
AB ₂	ZrV ₂ , ZrMn ₂ , TiMn ₂	Laves phase, hexagonal or cubic
AB ₃	CeNi ₃ , YFe ₃	hexagonal, PuNi ₃ -typ
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₇ , Th ₂ Fe ₇	hexagonal, Ce ₂ Ni ₇ -typ
A ₆ B ₂₃	Y ₆ Fe ₂₃	cubic, Th ₆ Mn ₂₃ -typ
AB	TiFe, ZrNi	cubic, CsCl- or CrB-typ
A ₂ B	Mg ₂ Ni, Ti ₂ Ni	cubic, MoSi ₂ - or Ti ₂ Ni-typ



Hydrures métalliques pour le stockage de H₂ option pratique

➔ Stockage de H₂ dans un matériau solide



Mg₂NiH₄

LaNi₅H₆

H₂ (liquide)

H₂ (200 bars)

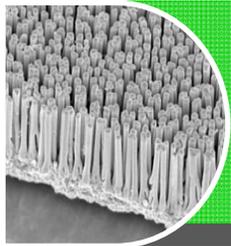
Bonnes capacités
volumétriques +
Sécurité

Difficulté de
refroidir à 20K

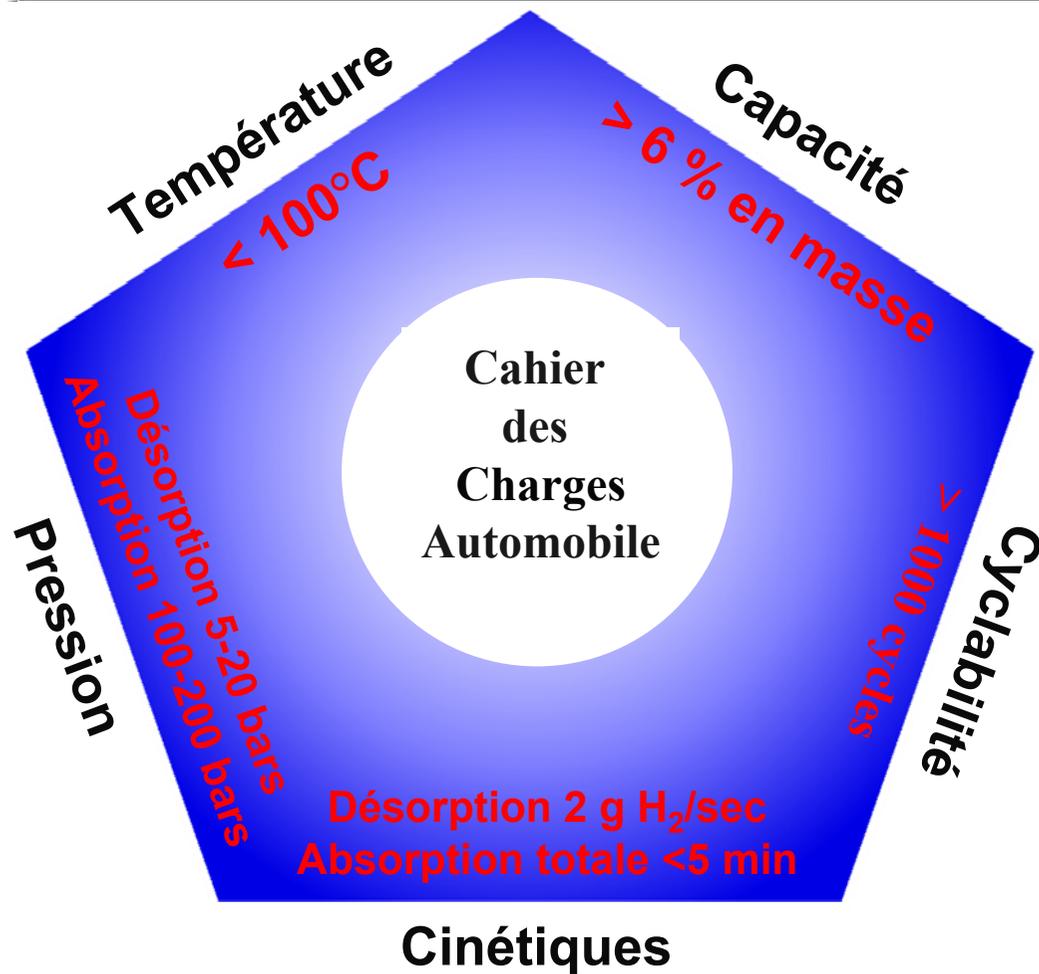
Dangereux

	kg H ₂ / m ³
H ₂ gas 700 b	42
H ₂ liquid	70
LaNi ₅ H ₆	123
Ti-V-Cr	205

Volume occupé par 4Kg de H₂ selon différents moyens de
stockage avec pour comparaison la taille d'une voiture

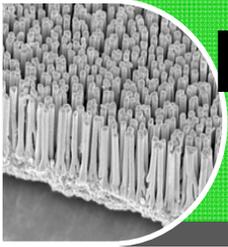


Problématique du stockage/transport: Cahier des charges pour le véhicule électrique

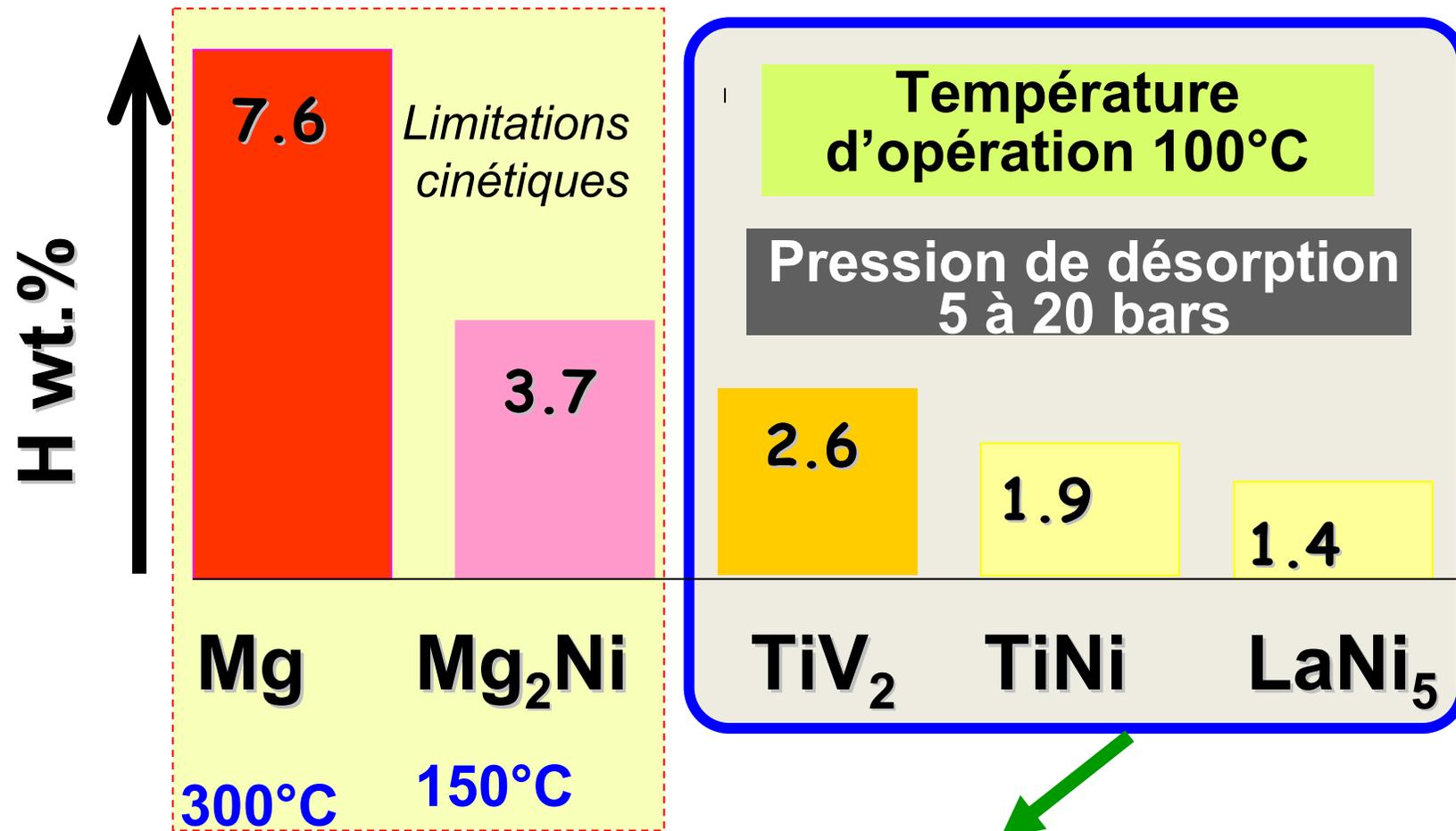


- **Autonomie visée 600 km
soit 6kg de H₂**
- **Faible coût énergétique**
- **Plein en station < 5 min**

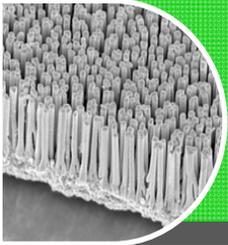
**Actuellement
aucune solution satisfaisante**



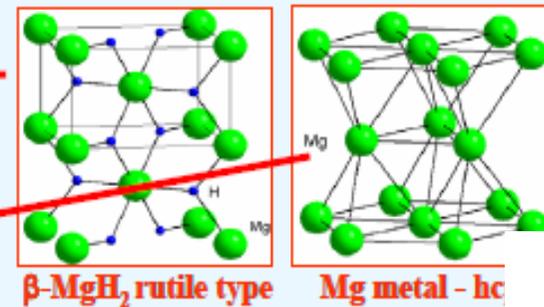
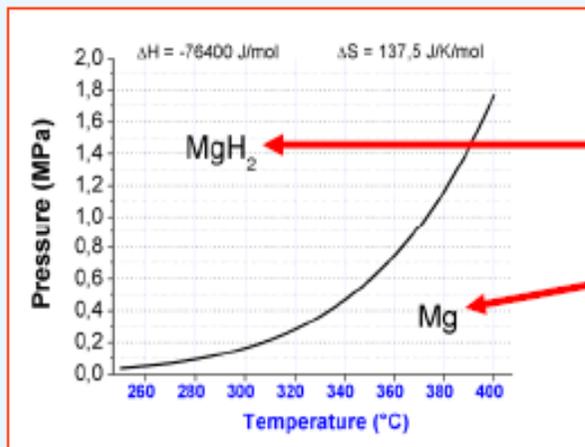
Performances comparées de divers hydrures vis-à-vis du stockage de H₂



- Faible densité massique
 - Cinétique lente à basse température
 - Coût élevé de certains métaux (V, Zr, ...)



Le magnésium: ses avantages et inconvénients vis-à-vis du stockage de H₂



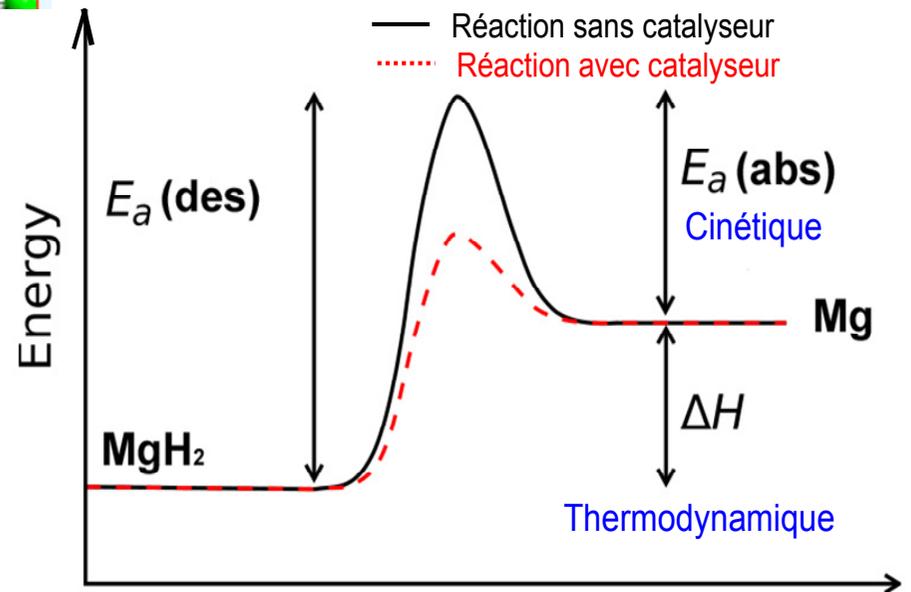
+

- Mg absorbe **7.6** % de H₂
- Mg est le 7^{ème} élément le + abondant sur terre
- Mg est recyclable
- Métallurgie de Mg est facile
- MgH₂ est un monométal hydrure
- MgH₂ même coût que Al

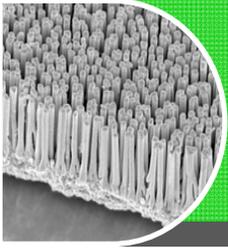
-

Température de réaction et pression trop élevées

Cinétique de réaction faible



Choix de catalyseur



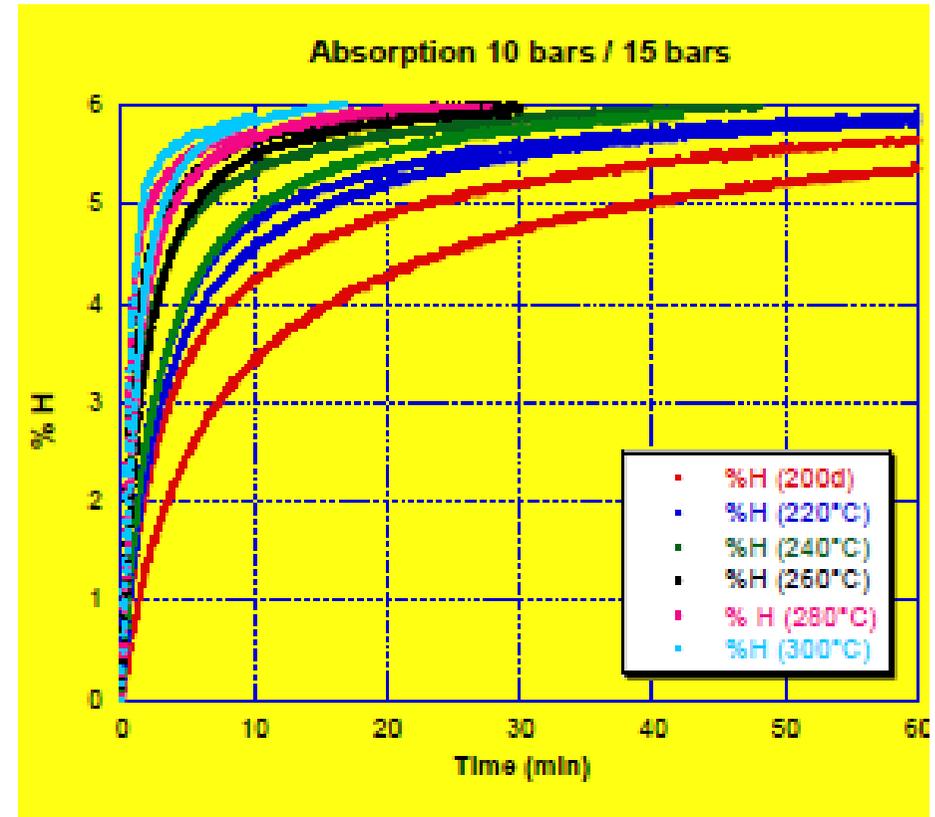
Amélioration des cinétiques d'absorption et de désorption de MgH_2

➤ Formation de nanocomposites MgH_2 -catalyseur

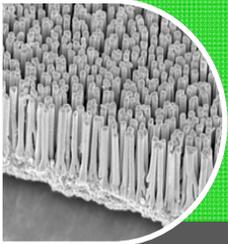
- Formation d'un composite $Ti-V-Cr + Zr_7Ni_{10}$, actif vis-à-vis de H_2 à base pression
- Broyage mécanique de MgH_2 avec l'alliage pour donner un composite (95% MgH_2 , 5% Alliage) présentant une cinétique de réaction rapide



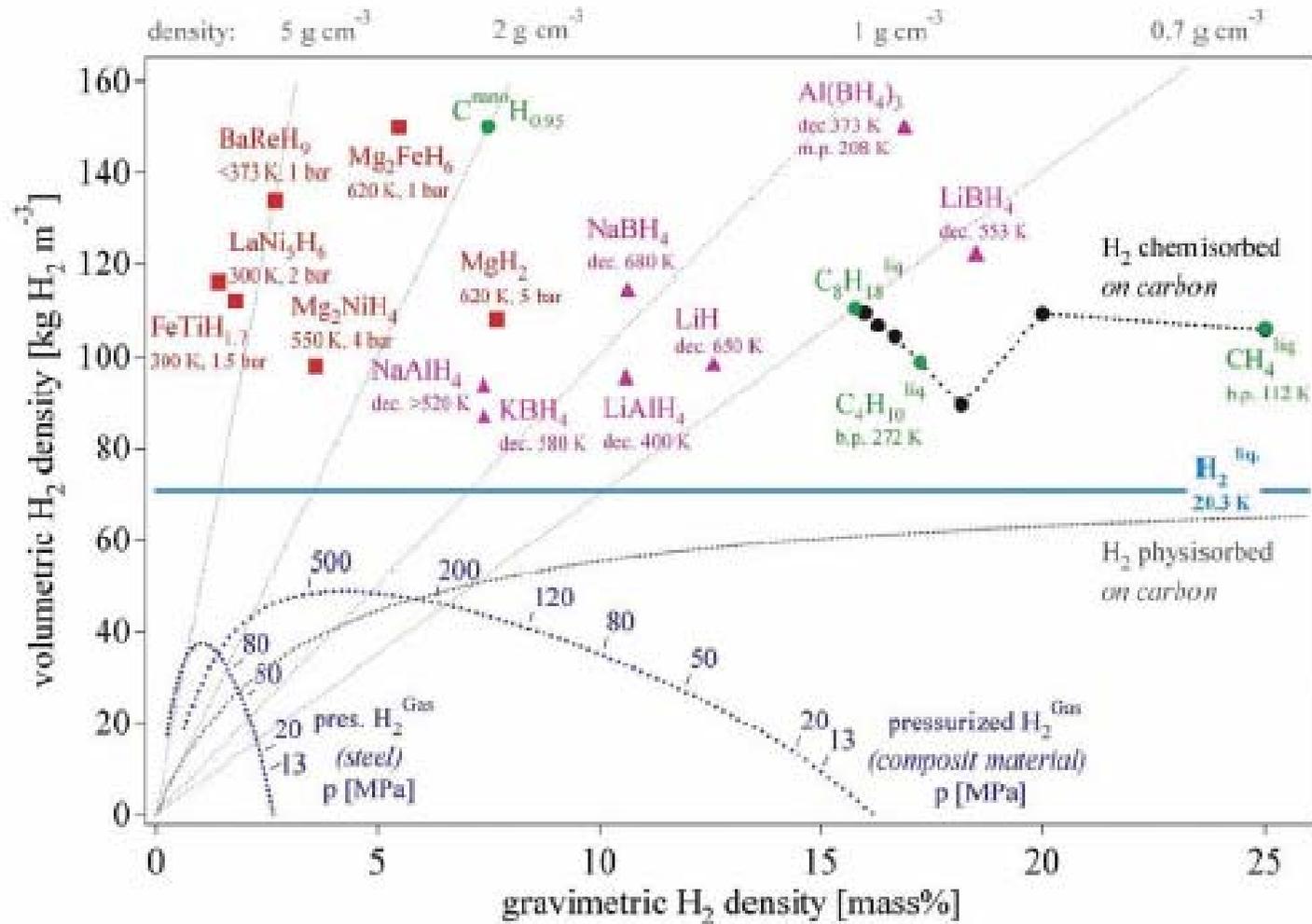
Réservoir stockage stationnaire
700 kg H_2 - 23 MWh



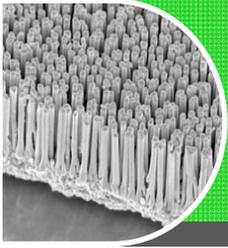
- Charge à la pression d'un électrolyseur (10 bars)
- Décharge à la pression requise par la pile à combustible (2 bars)



Étude comparative des différents moyens de stockage de H₂

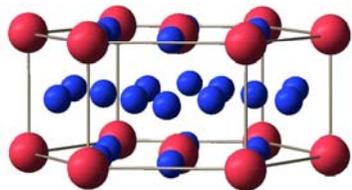


A Züttel, *Materials Today*, (2003) 24-33.

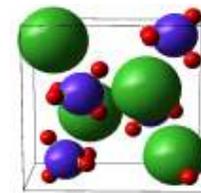


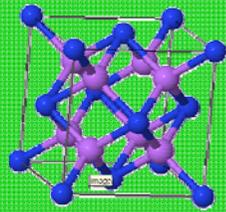
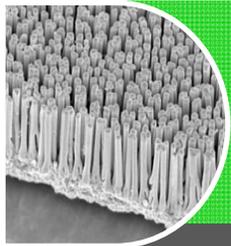
Des hydrures métalliques aux hydrures complexes

AB₅



Polyanions (MH₄)⁻





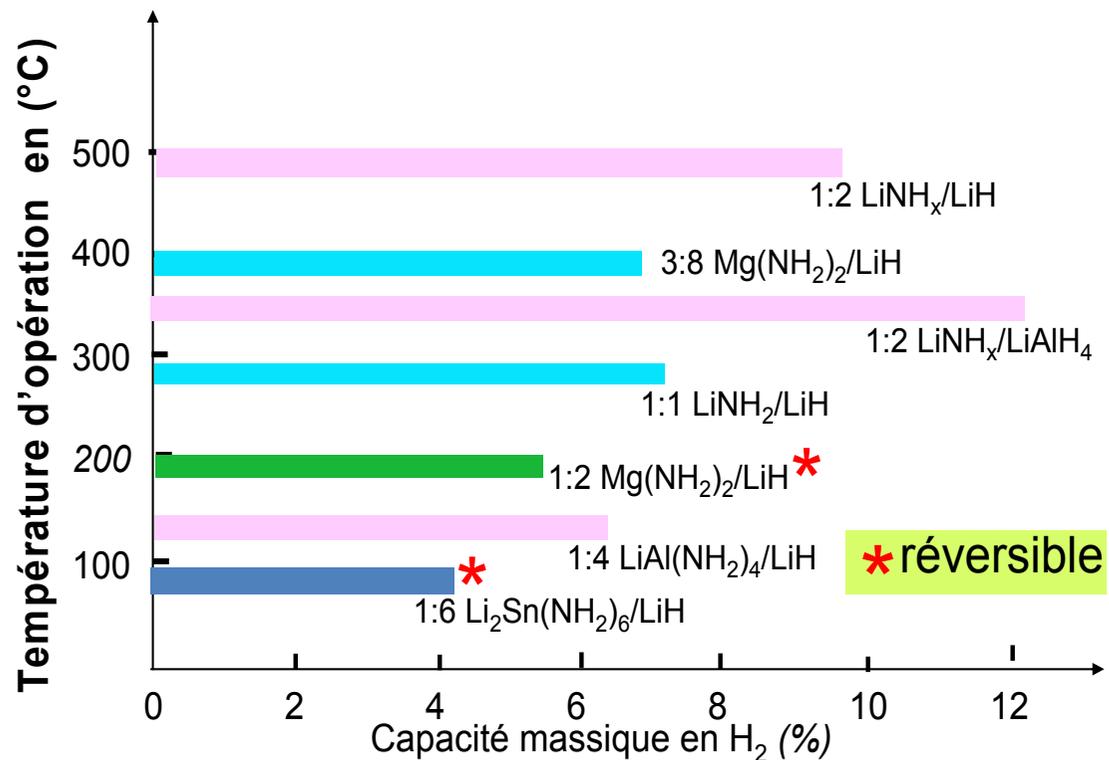
F (m-3m)

Les Amidures/Imidures vis-à-vis du stockage de H₂



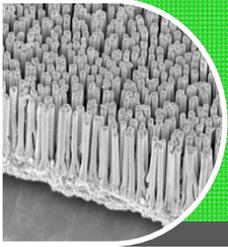
11% en masse, mais faiblement réversible

➤ Nombreux amidures étudiés.

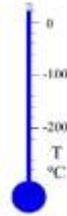
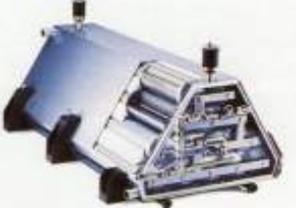
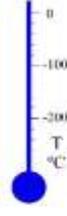
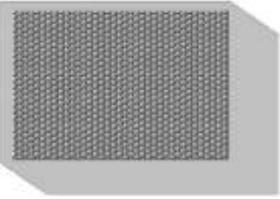


4.5 à 6% de H₂ massique réversible

- Chimie complexe, matériaux très réactifs à l'humidité
- Coût d'élaboration élevés

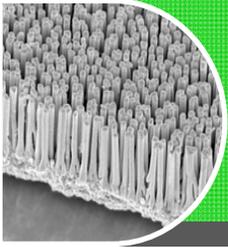


Conclusions spécifiques au stockage de H₂: Garder à l'esprit

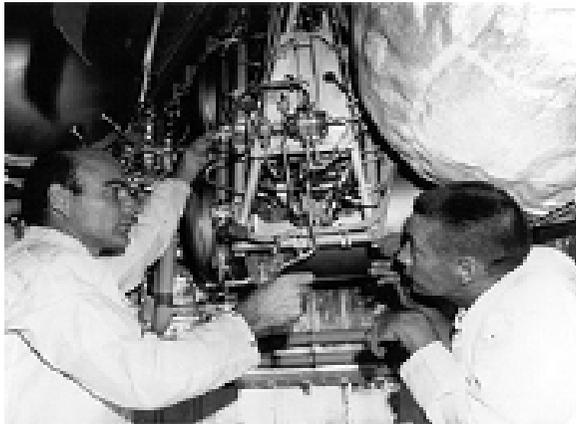
Moyen de stockage	Volume	Masse	Pression	Temp.
				 Hydrogène gazeux (298 K, 25°C)
				 Hydrogène liquide (21 K, -252°C)
				 Hydrogène adsorbé dans les solides (298K, 25°C) e.g. LaNi₅H₆
				 Hydrogène adsorbé @ Solide (65K, -208C) e.g.; MOF

With the courtesy of Louis Schlapbach, Andreas Züttel (EMPA)

L'hydrogène comme carburant: applications spatiales



➤ 1965



Photos de la NASA montrant une PEMFC de la fusée Gemini 7 en 1965

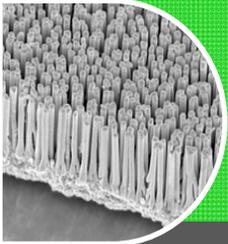
➤ 2010



Navette spatiale

500 000 litres d'oxygène liquide
1.5 millions de litres d'H₂ liquide

L'hydrogène comme carburant: applications transport



➤ 1960



➤ 2010



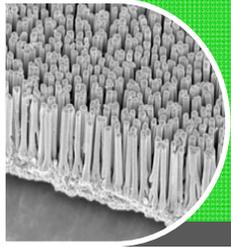
Hydrogen fuelled buses (300 bars) + AFC

➤ 2010



PAC 73 kW + batterie Li-ion 65kW
3 containers de 8kg H₂ sous 300 bars





Les grands visionnaires: auraient-ils raison ?

Iceland - the first hydrogen society!

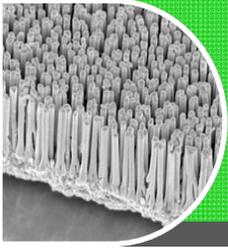
NYORKA
COLLABORATING NEW ENERGY

Owners:
VistOrka
DaimlerChrysler AG
Norsk Hydro ASA
Shell Hydrogen

Replacing fossil fuels with hydrogen

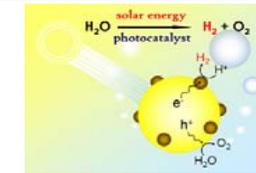
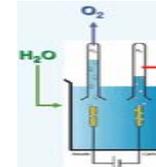


**136 ans après la parution du livre de Jules Verne
“L’île mystérieuse”, L’Islande est peut-être en train
de réaliser le rêve de ce grand visionnaire**



Conclusions générales: La filière hydrogène

➤ Différents modes de production

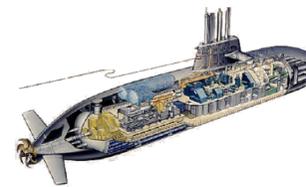


➤ Différents modes de stockage



Production et stockage demeurent encore les principaux verrous

➤ Marchés de Niche



➤ Pour transport électrique ??..



- (développement d'une infrastructure spéciale)
- Facteur économique: trop coûteux.