

Le futur de l'hydrogène

Production et transport

- 1) L'hydrogène**
- 2) La production de l'hydrogène**
- 3) Le stockage et le transport de l'hydrogène**
- 4) Pallier l'intermittence des énergies renouvelables**
- 5) Sécurité**
- 6) Quelques perspectives d'innovations techniques**

1) L'hydrogène : propriétés

Energie non polluante, pas d'empreinte carbone

Capacités de stockage pour pallier l'**intermittence** des énergies renouvelables.

Energie que l'on peut produire sans empreinte carbone à partir d'électricité et d'eau.

Energie transportable sur des courtes et longues distances.

Nombreuses utilisations : mobilités, chauffage, production d'acier, production d'électricité...

1) L'hydrogène : perspectives de développement

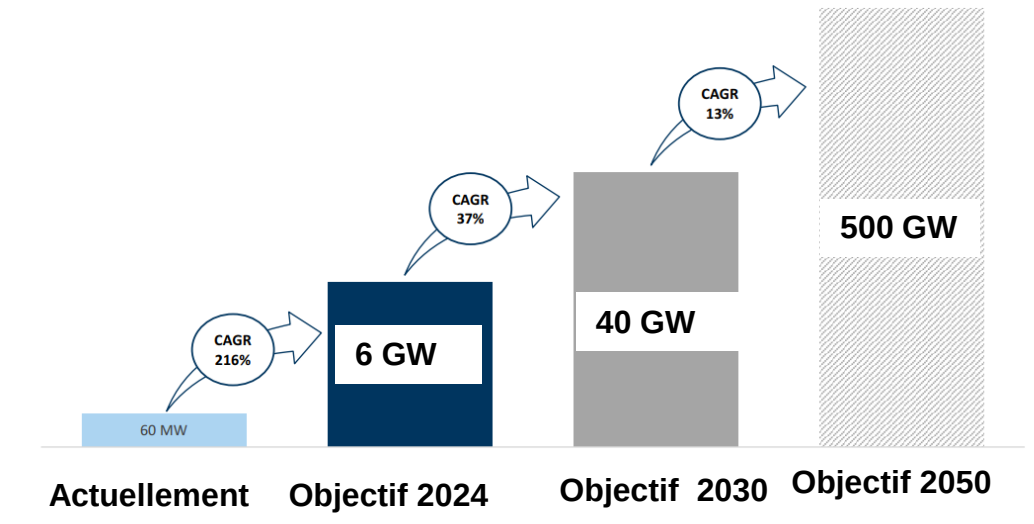
Point de vue de RTE (France)

Aujourd'hui, en France, il n'y a pas de consensus sur le développement à long terme de l'hydrogène :

- Certains prévoient un développement limité.
- D'autres une multiplication par 2 d'ici à 2035, par 5 d'ici à 2050.

La stratégie européenne présentée par Goldman Sachs

Accroissement de la puissance de l'ensemble des électrolyseurs



1) L'hydrogène : caractéristiques

Caractéristiques	Hydrogène	Comparaison
Densité (gazeux)	0,089 kg/m ³	1/10 méthane gazeux
Densité (liquide)	70,79 kg/m ³	1/6 méthane liquide
Point d'ébullition	-252 °C	160 °C : méthane liquide
Densité énergétique massique	120 MJ/kg	3 fois celle des carburants
Densité énergétique volumique (gaz)	0.01 MJ/L	1/3 méthane gazeux
Densité énergétique volumique (liquide)	8,5 MJ/L	8 fois le méthane liquide
Densité énergétique volumique (comprimé à 700 bars)		15% de celle des carburants liquides

Comparé au carburants l'hydrogène liquide est **moins lourd mais plus volumineux**

1) L'hydrogène : ses couleurs

Hydrogène vert : fabriqué avec des produits renouvelables sans empreinte carbone, sans pollution et non nucléaire.

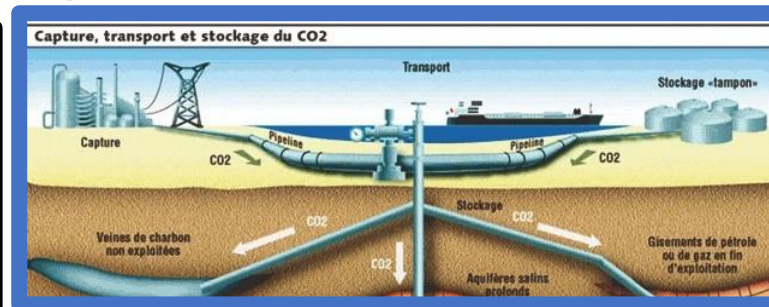
Hydrogène gris/noir : produit à partir de charbon, de lignite.

Hydrogène brun : produit à partir de gaz naturel (CH_4)

Hydrogène bleu : produit à partir d'énergies fossiles mais avec capture du carbone, donc faible empreinte carbone.

Hydrogène jaune : produit à partir d'électricité nucléaire (non carboné, non renouvelable, déchets radioactifs). **Enjeu important de la transition climatique.**

Hydrogène blanc ou naturel : présent dans certaines roches (faibles quantités, non exploité actuellement).

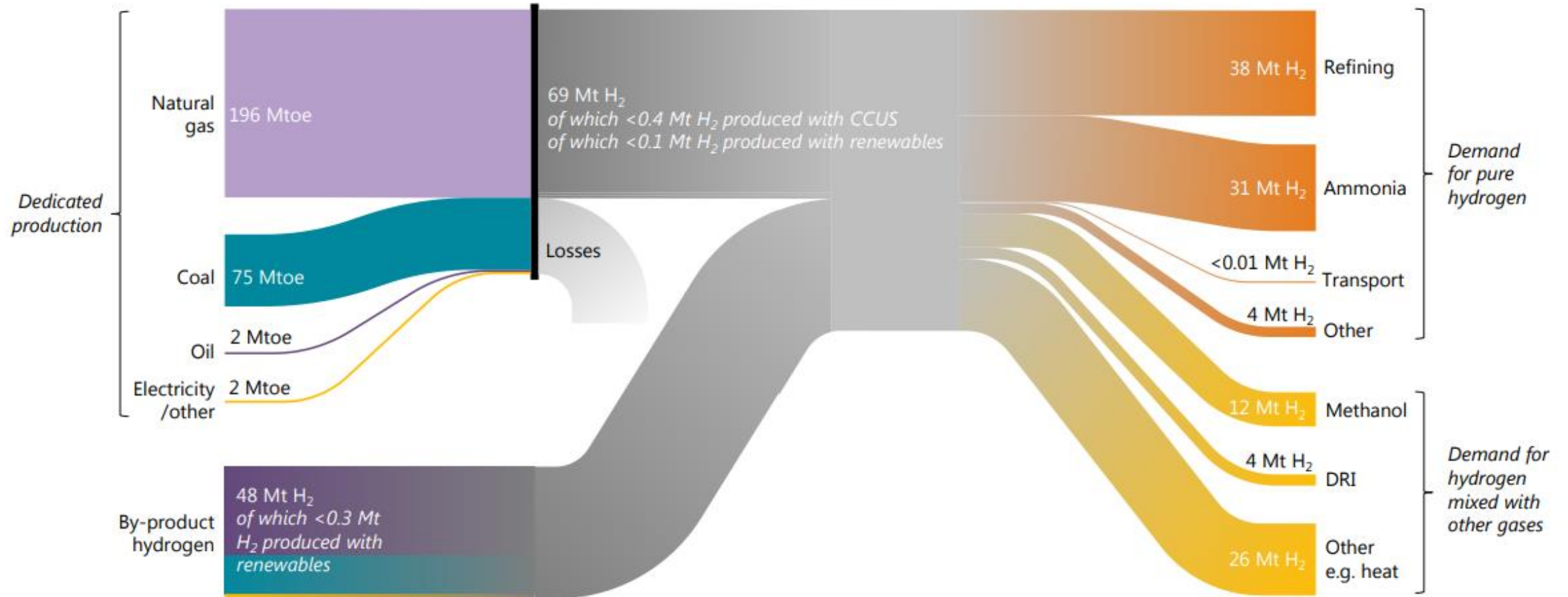


1) Quelques statistiques

Empreinte carbone mondiale anthropologique	37.000 Mt/an
Empreinte carbone anthropologique en France	660 Mt/an
Empreinte carbone mondiale de la production d'hydrogène	800 Mt/an
Production mondiale d'hydrogène pur (ou presque pur)	70 Mt/an
Production française d'hydrogène pur (ou presque pur)	0,9 Mt/an
Consommation mondiale d'énergie primaire en 2017	166.000 twh/an
Production mondiale d'électricité en 2017	25.000 twh/an
Equivalent énergétique de la production d'hydrogène pure en 2018 (1,8 % de la consommation mondiale d'énergie finale)	2.200 twh/an
Energie pour produire 1kg H ₂ gazeux par électrolyse (hypothèse rendement 70%)	50 kWh

2) Production de l'hydrogène : chaîne de valeur

Figure 6. Today's hydrogen value chains



2) La production mondiale de l'hydrogène en 2018

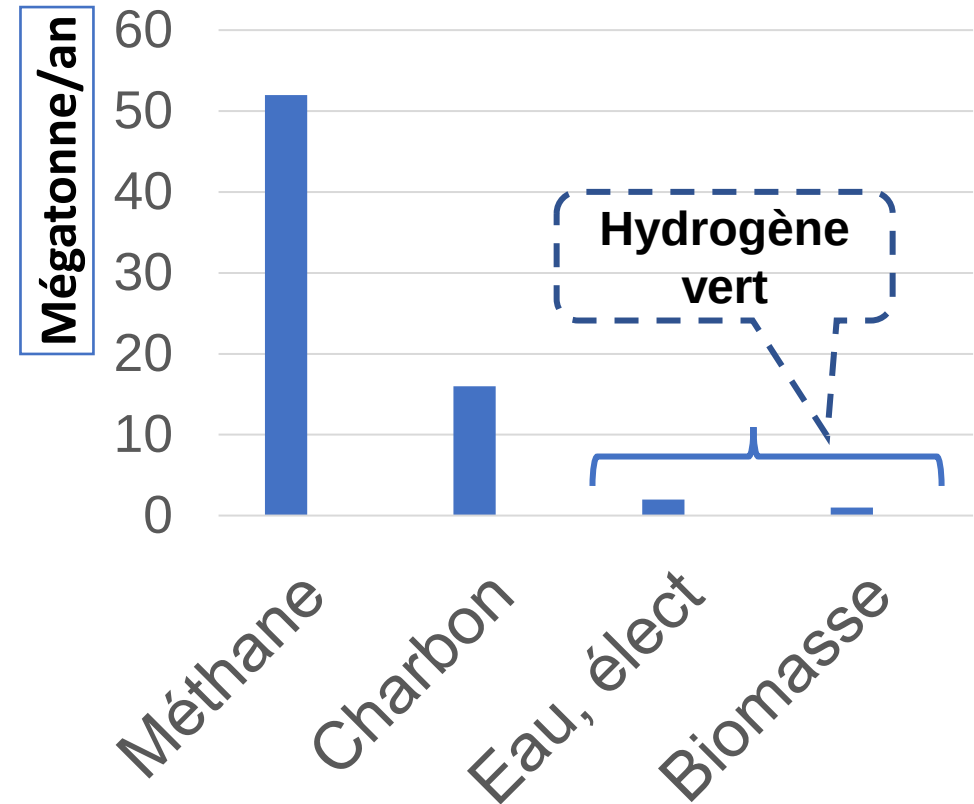
Hydrogène pur : 70 MtH₂/an

Importance de l'empreinte carbone :

- 830 Mt/an de CO₂
- **2,1 %** de l'empreinte carbone mondiale

Faible production d'hydrogène vert

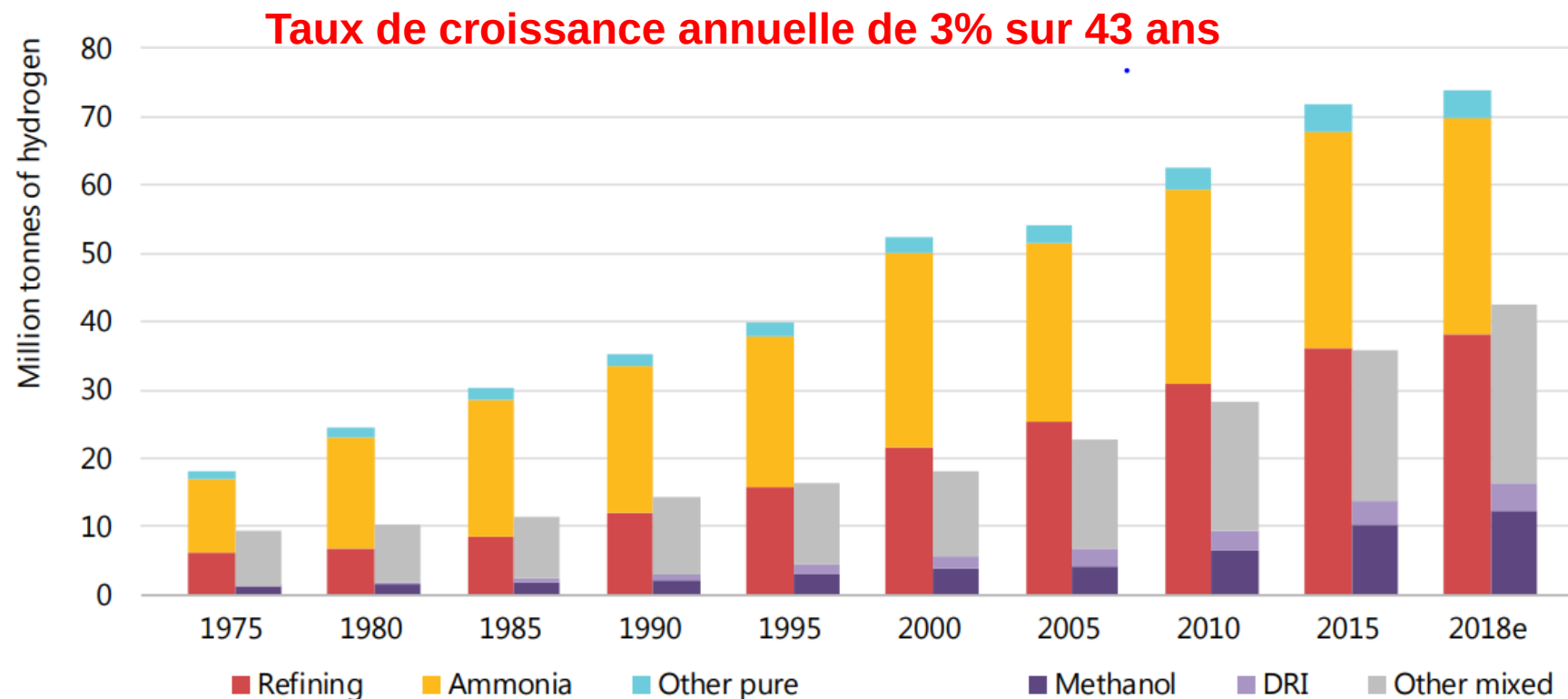
Dans des produits comprenant de l'hydrogène : 50 MTH₂/an (méthanol, méthane, carburant, ammoniac).



Sources de la production de l'hydrogène

2) La production de l'hydrogène de 1975 à 2018 (suite)

Figure 1. Global annual demand for hydrogen since 1975



Notes: DRI = direct reduced iron steel production. Refining, ammonia and "other pure" represent demand for specific applications that require hydrogen with only small levels of additives or contaminants tolerated. Methanol, DRI and "other mixed" represent demand for applications that use hydrogen as part of a mixture of gases, such as synthesis gas, for fuel or feedstock.

Source: IEA 2019. All rights reserved.

From : The future of hydrogen : report prepared by the IEA for the G20 Japan

2) La production de l'hydrogène avec du gaz naturel (méthane CH₄)

75 % de la production d'hydrogène
(52 MtH₂/an)

Faible coûts de production

Forte empreinte carbone

Possibilité de réduction de
l'empreinte carbone avec des unités
CCSU (Carbon Capture Storage and
Utilisation)

**Unité de production d'hydrogène à
partir du méthane**

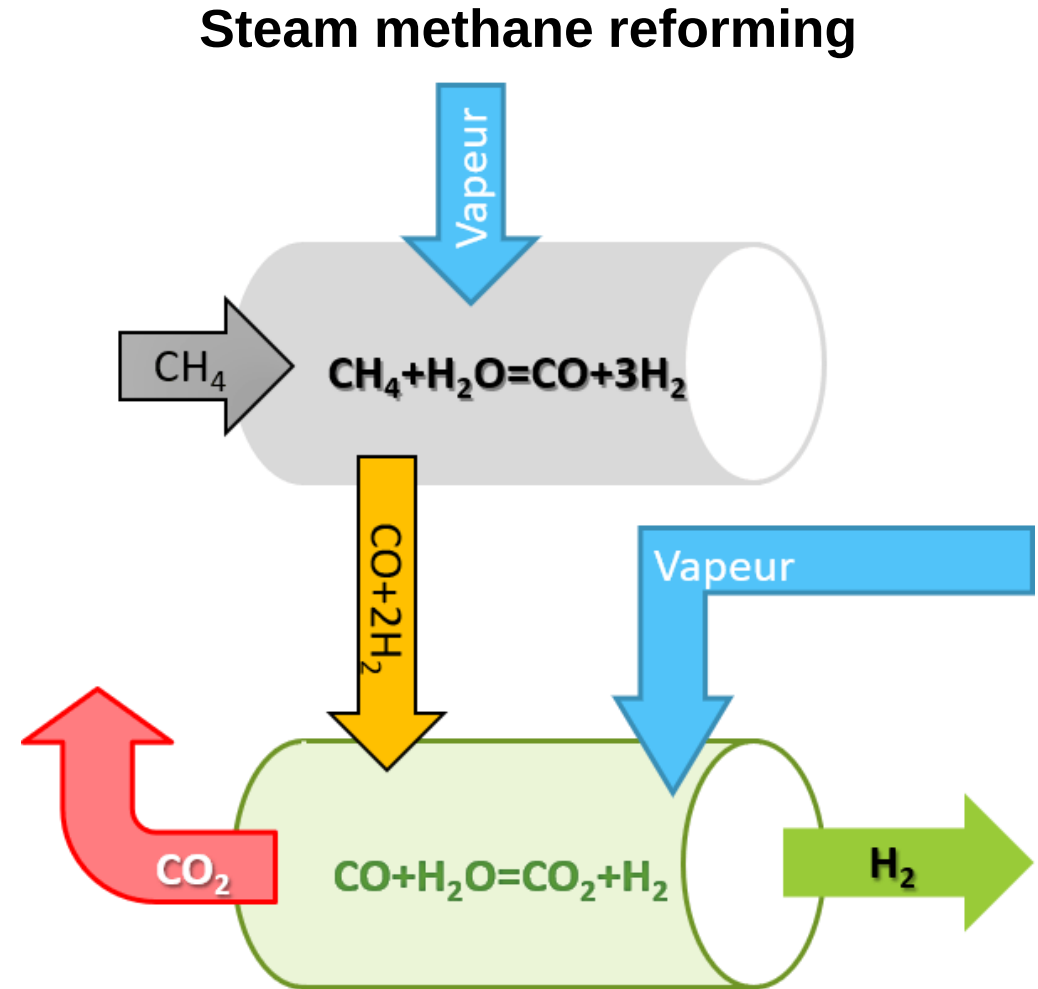


2) La production avec du gaz naturel (méthane CH₄)

Les méthodes de production :

- SMR «Steam Methane Reforming» appelée aussi « reformage à la vapeur ». La plus fréquemment utilisée.
- ATR « Auto Thermal Reforming » appelée aussi « reformage à sec »

Nombreuses installations

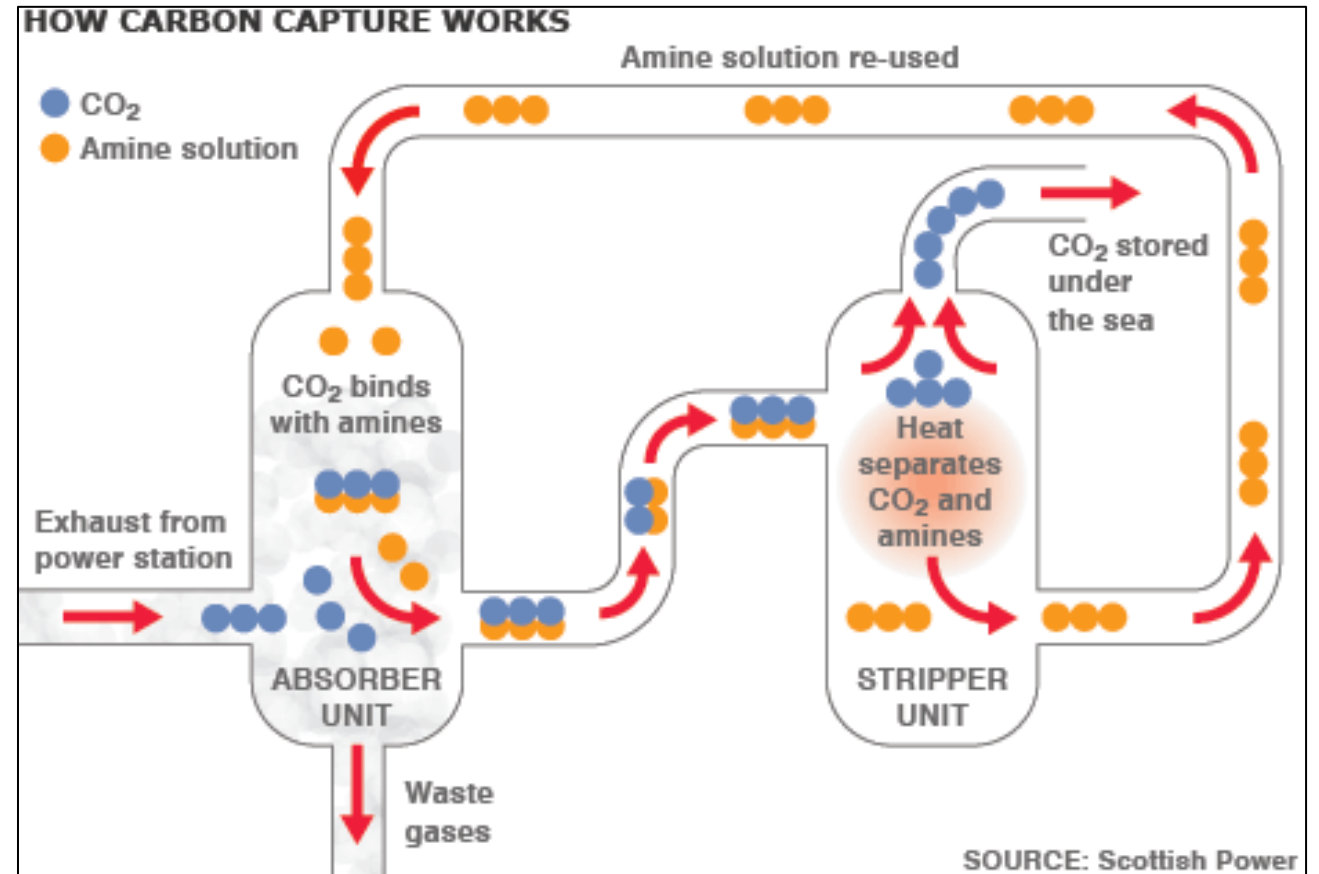


2) Réduction de l'empreinte carbone au moyen de CCSU (Carbon Capture Storage and Utilisation)

Réduction jusqu'à 90% de l'empreinte carbone de la production d'hydrogène à partir du méthane ou du charbon

Peu d'installations à cause des coûts d'investissement et d'exploitation.

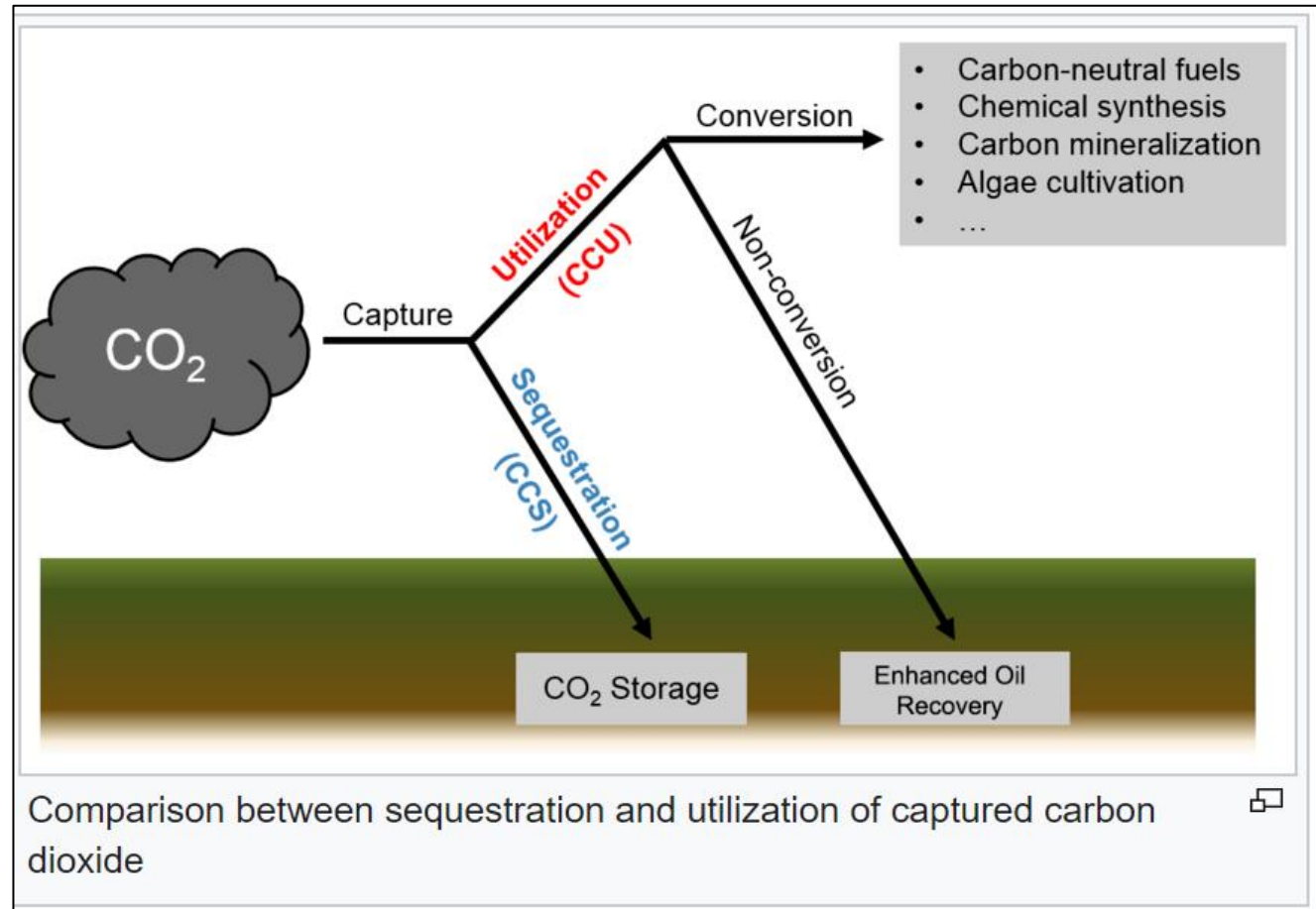
Investissements très importants.



2) Réduction de l'empreinte carbone au moyen de CCSU (Carbon Capture Storage and Utilisation) suite

Les utilisations du CO₂ capté par CCSU :

- Séquestration dans des réservoirs souterrains salins.
- Exploitation par injection des puits de pétrole
- Carburants de synthèse.
- Synthèse de produits chimiques.
- Culture d'algues
- Encres



2) La production de l'hydrogène avec du charbon

Aujourd'hui **23%** de la production mondiale de H_2 à partir du charbon, dont **80%** en Chine.

L'empreinte carbone est élevée : $19tCO_2/tH_2$ (deux fois plus que la production de H_2 à partir du gaz naturel).

Prévision d'arrêt mondial de la production d'hydrogène à partir du charbon

L'empreinte carbone peut être fortement réduite au moyen d'installations **CCUS** (Capture Carbon Utilisation and Storage)

2) Production d'hydrogène à partir du charbon

La centrale électrique Boundary Dam au Canada

Alimentée en charbon

Equipée d'un CCUS : capture de $1\text{MtCO}_2/\text{AN}$

Le CO_2 capturé est utilisé pour extraire du pétrole par injection.

Investissement : 1,4 milliard de \$



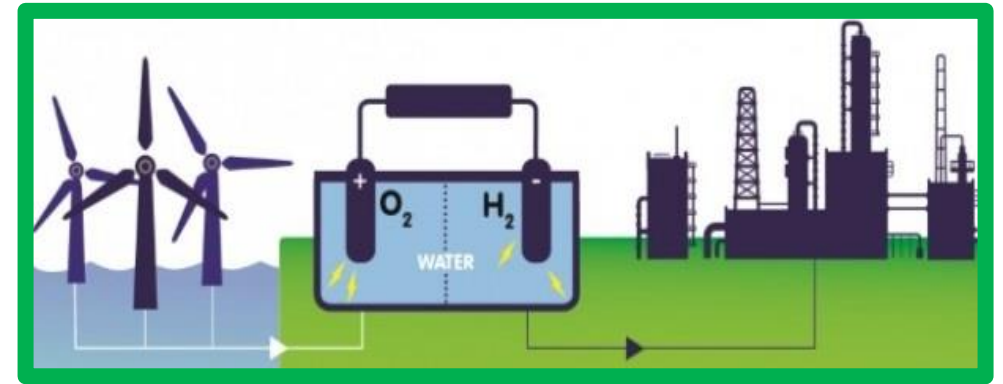
2) La production d'hydrogène avec l'électricité et l'eau

L'électrolyse est la **seule méthode** de production d'hydrogène à partir d'électricité et d'eau.

Rendement énergétique 60 à 90%.

Actuellement peu de production d'hydrogène par électrolyse mais fort engouement à cause de :

- Baisse de coûts de production
- Fortes incitations à produire de l'hydrogène vert

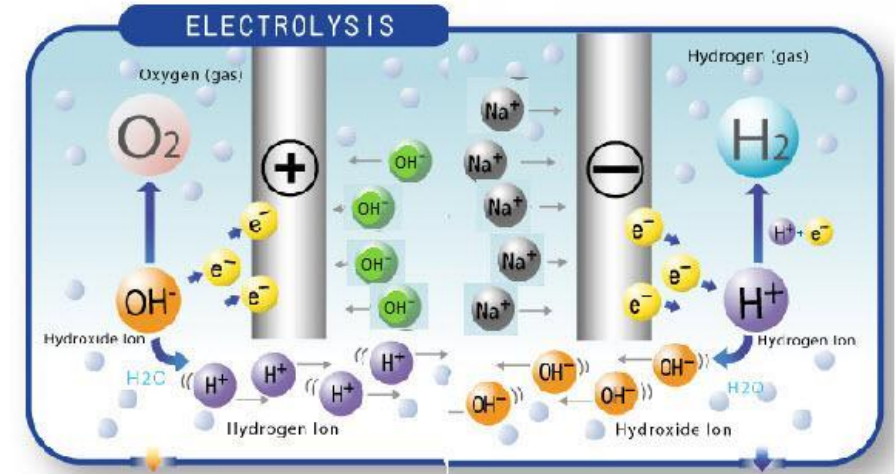


L'hydrogène vert produit par électrolyse pour décarboner les industries

2-5) Production de l'hydrogène avec électricité et eau (suite)

Les technologies de production d'hydrogène par électrolyse :

- Electrolyse **alcaline** (bain d'hydroxyde de potassium). Très utilisée au 20ème siècle.
- Electrolyse **PEM** (Proton Exchange Membrane) (bain d'eau pure). Actuellement très utilisé.
- Electrolyse **SOEC** (**Solid Oxyde Electrolyzer Cell**). Considéré comme la méthode du futur.



2) L'hydrogène à partir d'électricité et d'eau (suite)

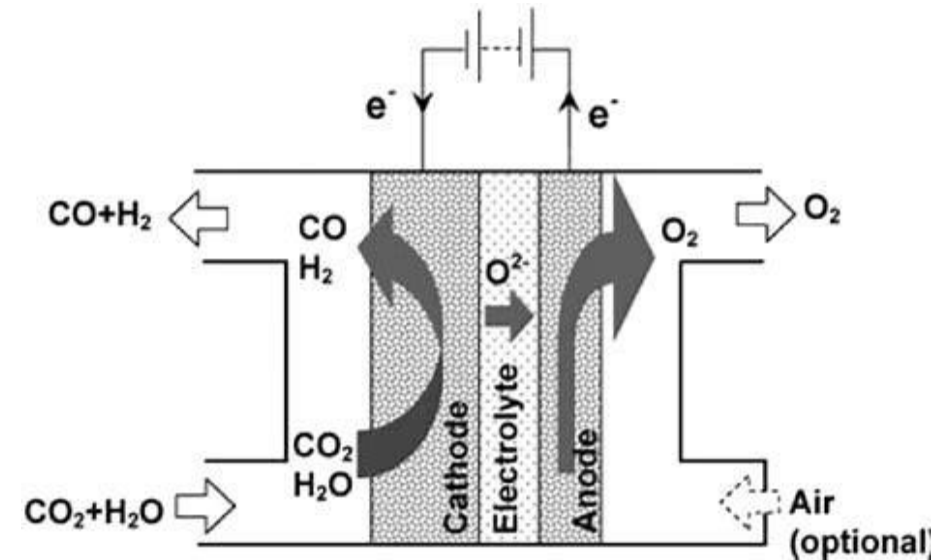
Les technologies SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell)

En cours d'industrialisation dans plusieurs compagnies.

Prévisions de fort développement

Fonctionnement à haute température avec un **bon rendement : jusqu'à 85%**.

La source d'énergie de haute température peut être solaire avec concentration focale ou nucléaire.



Une réponse à l'intermittence des énergies vertes : fonctionnement en mode réversible contrairement aux électrolyseurs alcalin et PEM (tantôt production d'hydrogène, tantôt production d'électricité).

2) L'hydrogène à partir d'électricité et d'eau (suite)

Projet Multiplhy pour décarboner une bioraffinerie à Rotterdam

Premier projet d'électrolyse à haute température (technologie **SOEC Solid Oxide Electrolyser Cell**).

Rendement de 85% (gain de 20% due à température élevée).

Production de 1500 kH₂/jour.

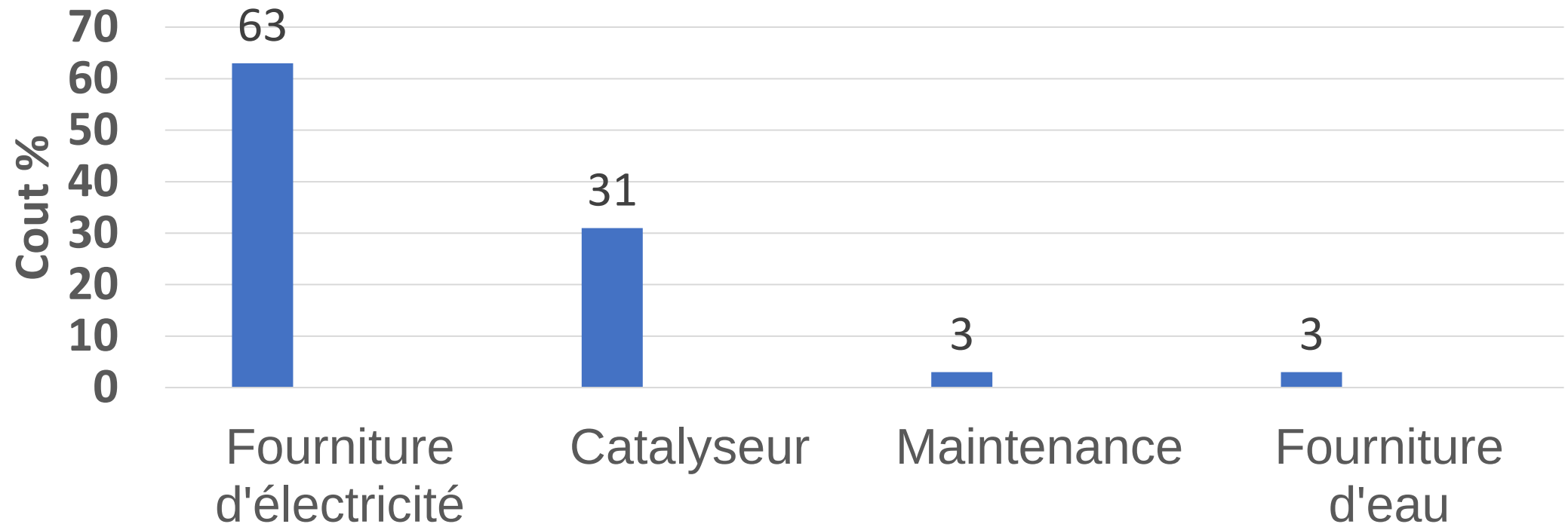
Hydrogène vert (électricité d'origine éolienne et photovoltaïque).

Consortium : Engie, CEA, Sunfire (fabricant allemand d'électrolyseurs).



2) L'hydrogène à partir d'électricité et d'eau (suite)

Un exemple de la composition du coût de production de l'hydrogène à partir de l'eau et l'électricité

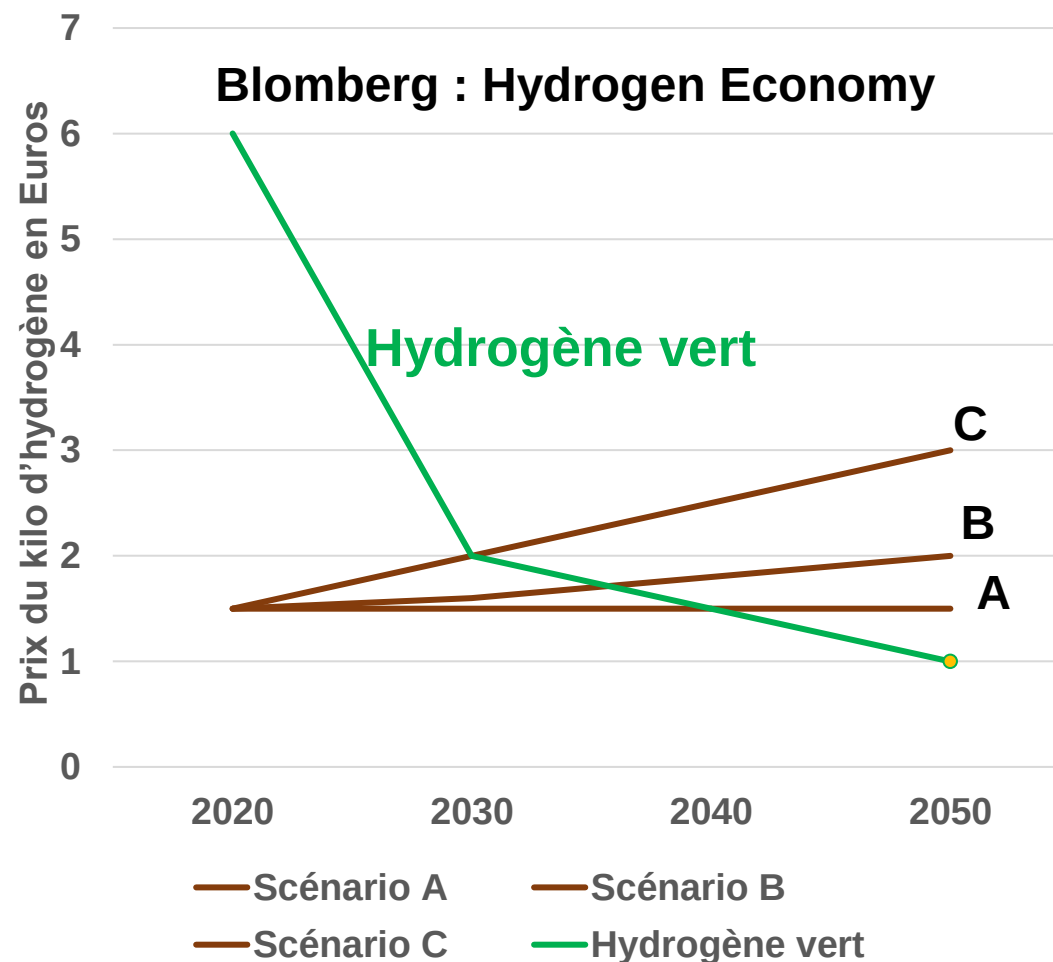


2) L'hydrogène vert compétitif à partir de 2030

Les traits verts représentent l'évolution du prix du kilo d'hydrogène vert de 2020 à 2050.

Les traits bruns représentent l'évolution du prix du kilo d'hydrogène brun de 2020 à 2050 en fonction des scénarios d'évolution du prix des quota de carbone.

L'hydrogène vert devient compétitif en 2030 avec le scénario C, en 2040 avec le scénario A.



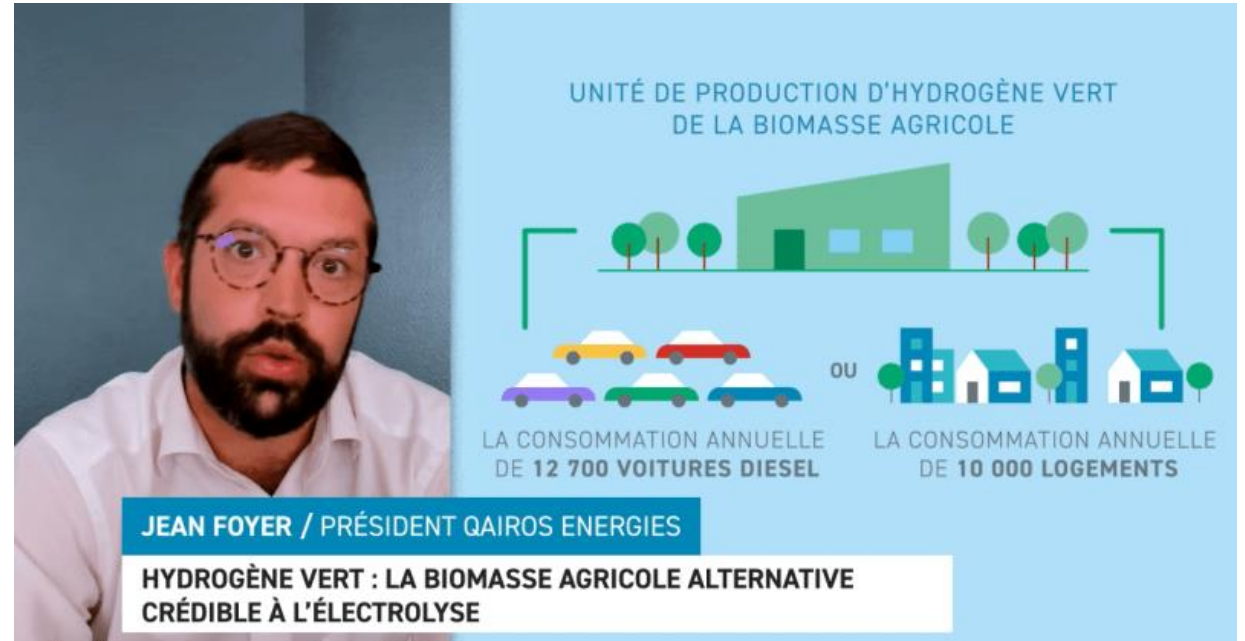
2) La production de l'hydrogène avec la biomasse

La production de l'hydrogène à partir de la biomasse est actuellement faible.

Quelques installations pilotes et projets de petite dimension.

Perspectives de croissance insuffisantes pour un rôle majeur dans la transition climatique.

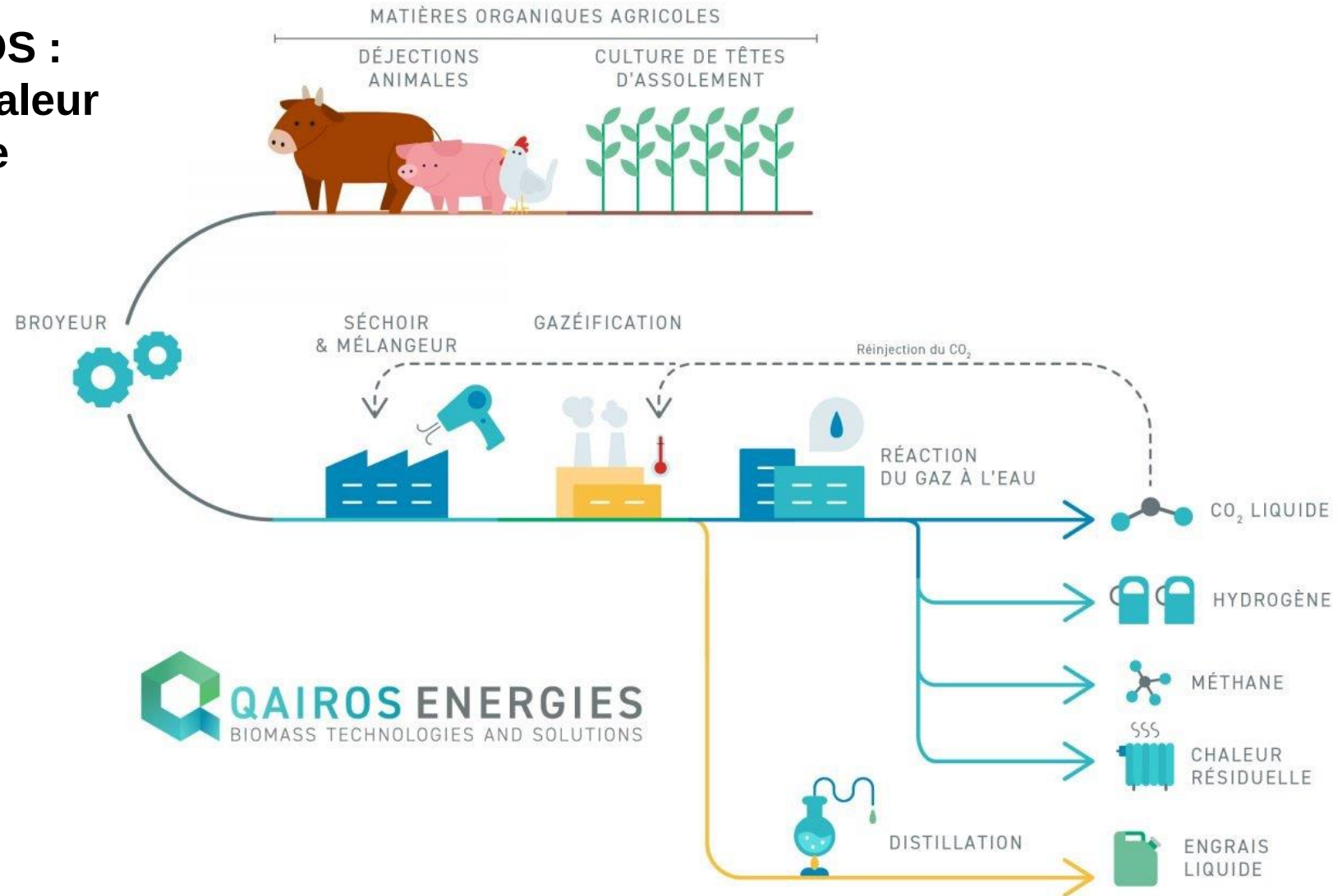
La biomasse est mieux adaptée à la production de méthane parce qu'elle en produit naturellement.



QAROS ENEGIE fabricant d'unités de productions d'hydrogène à partir de la biomasse

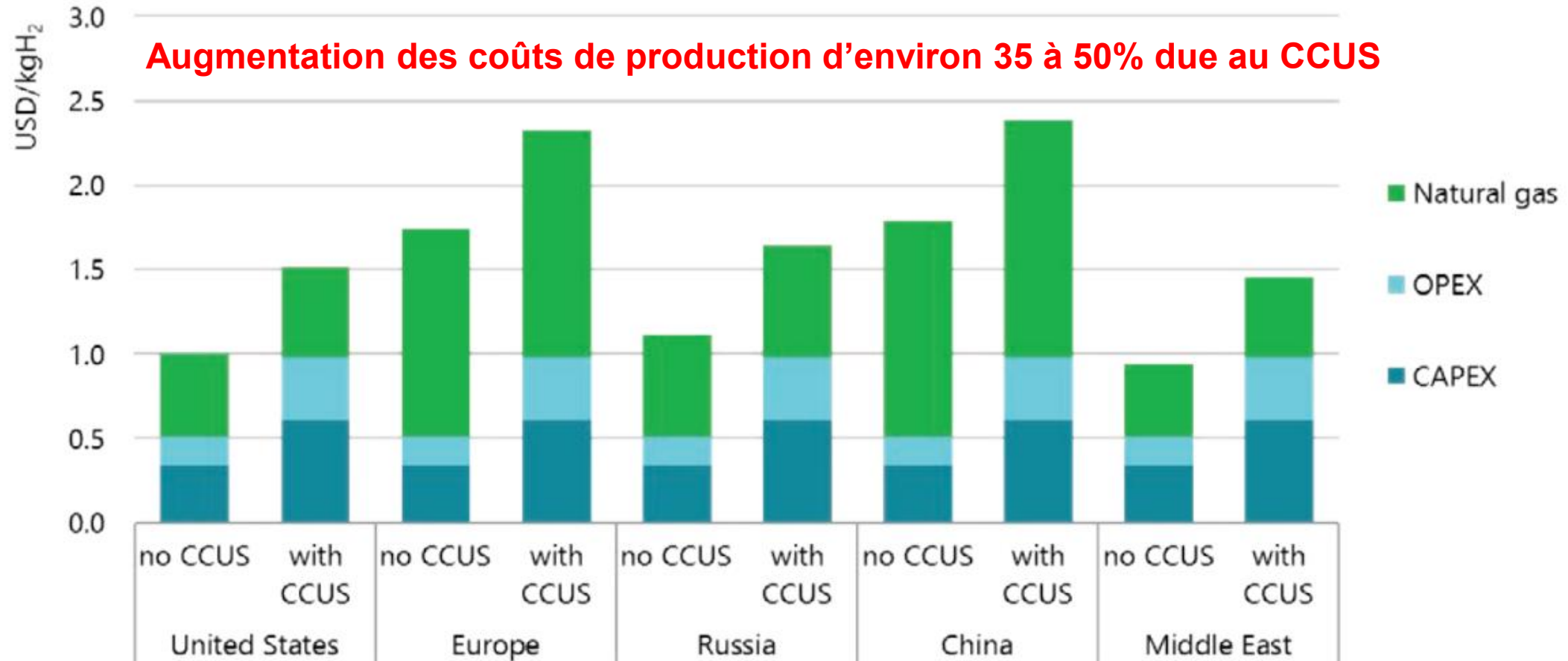
2) La production de l'hydrogène avec la biomasse

Société QAIROS : sa chaîne de valeur de la biomasse



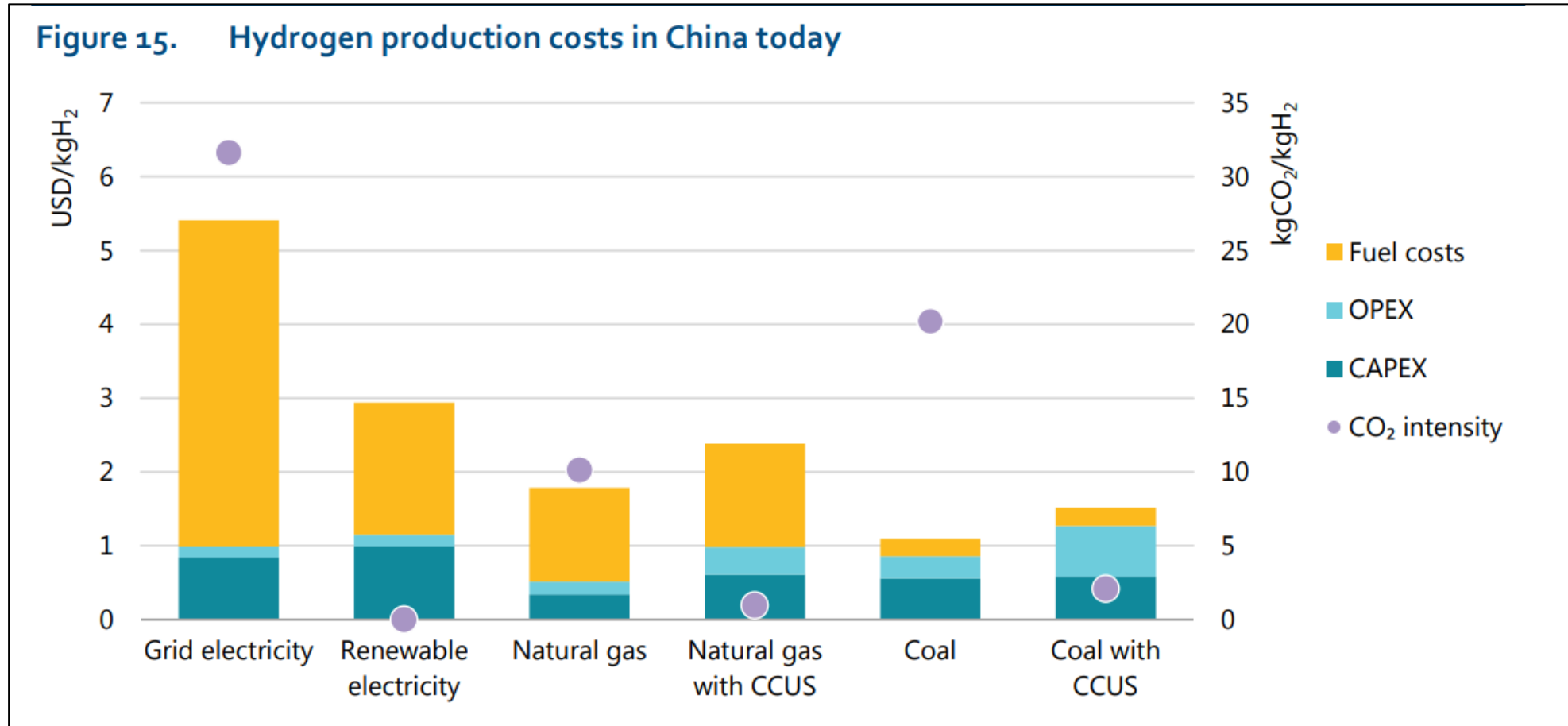
2) Les coûts de production : analyse comparative

Figure 9. Hydrogen production costs using natural gas in different regions, 2018



From : The future of hydrogen : report prepared by the IEA for the G20 Japan

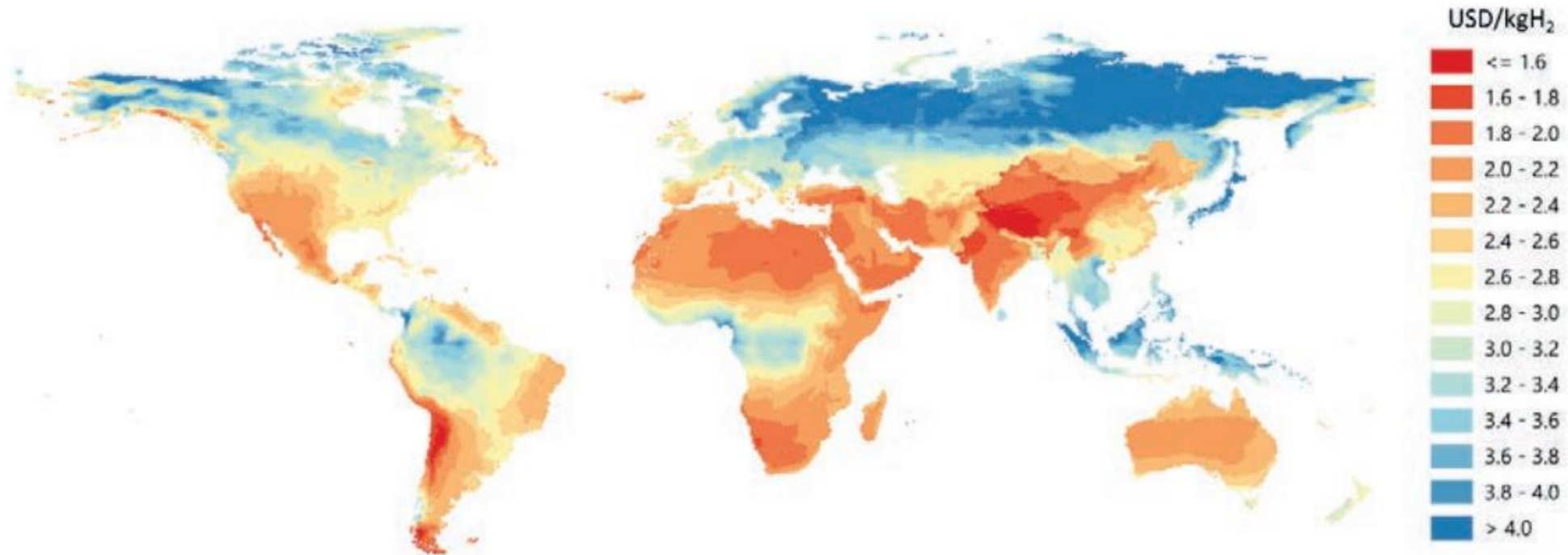
2) Les coûts de production : analyse comparative (suite)



From : The future of hydrogen : report prepared by the IEA for the G20 Japan

2) Les coûts de production : analyse comparative (suite)

Figure 14. Hydrogen costs from hybrid solar PV and onshore wind systems in the long term



From : The future of hydrogen : report prepared by the IEA for the G20 Japan

2) La production locale d'hydrogène

Nombreuses créations d'unités de production locales d'hydrogène.

- Promoteurs : villes, collectivités...
- Sources d'énergie : **solaire, éolienne, biomasse.**
- Utilisations locales de l'hydrogène: transport, chauffage, industrie.
- Motivation des projets : écologie, publicité, pallier l'absence de réseaux de distribution
- Technologie : électrolyse
- Investissement : > 2MEuros

La station service de Fayence avec production locale d'hydrogène par électrolyse



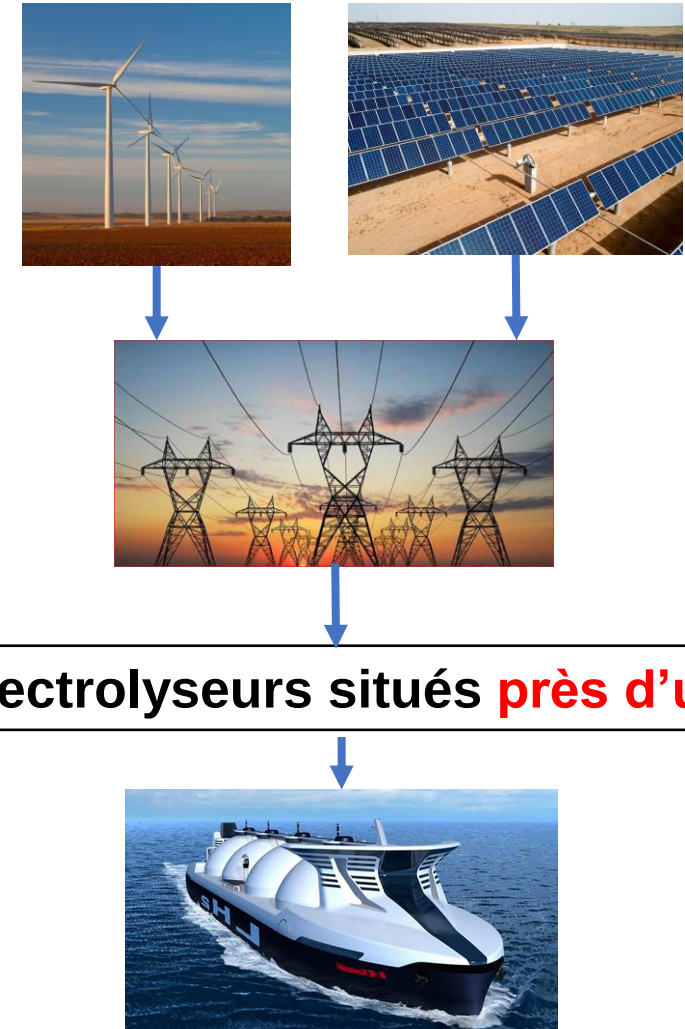
2) Production d'hydrogène à partir des énergies solaires et éoliennes des déserts

Arguments positifs :

- Ressources solaires et éoliennes inépuisables
- Compétitivité au niveau local des énergies vertes produites (fort ensoleillement)
- L'Australie livre par bateau de l'hydrogène qu'elle produit à partir de lignite.

Arguments négatifs :

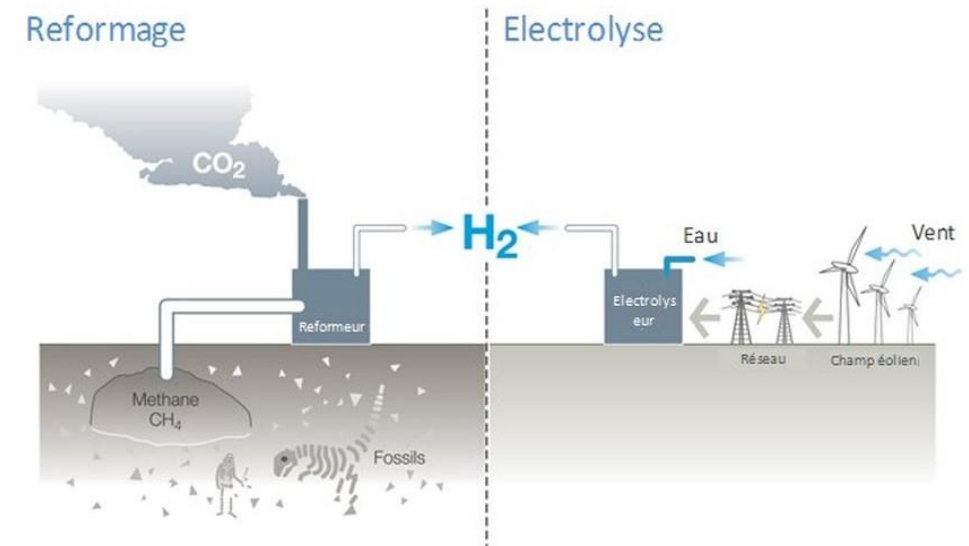
- Transport
- Problème politique de sécurité des approvisionnements d'énergie



2) Pour une production décarbonée et massive d'hydrogène

Pourquoi ?

- Empreinte carbone actuelle de la production d'hydrogène :
 - 830 MtCO₂/an : **2,1%** de l'empreinte carbone anthropologique mondiale
 - **Comparable au transport aérien.**
- La décarbonisation de la production d'hydrogène est **techniquement faisable** alors que celle du transport aérien est difficile et incertaine.
- **Forte demande d'hydrogène décarboné** pour les nouvelles utilisations de la transition écologique



2) Pour une production décarbonée et massive d'hydrogène

Jusqu'à présent aucun progrès dans la décarbonisation de la production de l'hydrogène.

Point de vue de RTE :

- A cadre réglementaire inchangé le prix de l'hydrogène produit par électrolyse **n'est pas compétitif**.
- Le développement de la filière de l'électrolyse **dépend de l'évolution de la fiscalité et de la réglementation** (par exemple limite de la production de CO₂).

2) Comment obtenir une production décarbonée et massive d'hydrogène ?

Assurer la compétitivité de la production d'hydrogène décarboné **au moyen des outils de régulation** européens et français de la transition climatique.

Production par les filières de :

- **Electrolyse** de l'eau avec de l'électricité verte ou nucléaire.
- **Vaporeformage avec CCUS** du gaz naturel

2) Pour une production décarbonée et massive d'hydrogène

La filière de l'électrolyse :

- Quelques chiffres, à titre indicatif, pour illustrer l'ampleur des développements.
- Pour produire par électrolyse toute la production mondiale actuelle d'hydrogène il faudrait :
 - **Augmenter d'environ 12%** la production mondiale d'électricité.
 - **Construire 140.000** usines comparables à la plus grande usine de production d'hydrogène par électrolyse du monde récemment construite par Air Liquide à Bécancourt au Canada (500 tH₂/an).

2) Pour une production décarbonée et massive d'hydrogène

La filière du vaporeformage avec CCUS

- **Les CCUS entraînent :**
 - une augmentation des coûts de production d'environ **30 à 50%.**
 - un engagement de longue durée dans la production d'hydrogène à partir du méthane naturel pour justifier les investissements dans les CCUS.
- Actuellement il y a une préférence pour la filière de l'électrolyse parmi acteurs de la transition écologique.

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

La taxonomie des énergies renouvelables :

- Un document d'environ **450 pages** qui définit le **statut écologique** d'un grand nombre de produits :
 - **Renouvelable**
 - **Non renouvelable**
 - **En transition** : peut devenir renouvelable ou non renouvelable, durées des transitions non définies
- **Produits actuellement en transition** : **énergie nucléaire**, le gaz naturel, **l'hydrogène produit par électrolyse avec de l'électricité du réseau**.
- **Impacts financiers et commerciaux très importants.**

Dernière nouvelles : la commission européenne vient de décider, après des discussions animées, de prolonger le statut de « transition » pour le nucléaire et le gaz naturel.

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

La taxe carbone : ne concerne pas directement les activités industrielles

Les quota de carbone :

- Concerne les activités industrielles
- Prix de la tonne de carbone **fixé par le marché** : aujourd'hui 50 Euros, récente augmentation importante.
- Attribution gratuite de quota à certaines filières

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

La valeur tutélaire du carbone (seulement en France) :

- Tonne de carbone en Euros : 2020 : 87, 2030 : 250, 2050 : 600 à 900.
- Une référence pour valoriser en euro la contribution des projets et des investissements à la diminution des empreintes carbone.
- En France il est demandé aux administrations publiques françaises d'en tenir compte dans les arbitrages entre les projets.
- Il est prévu que la valorisation basée sur la valeur tutélaire du carbone devienne obligatoire en France pour tous les projets publics et privés.
- Impact important dans les décisions et le financement des projets

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

Le statut de l'hydrogène jaune (production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire) :

- Considéré comme non renouvelable du point de vue des réglementations européennes et françaises de la transition climatique.
- Soumis à la taxe carbone sur la base de l'empreinte carbone de la production d'électricité en Europe..

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

Impact des prix sur la compétitivité de la production d'hydrogène décarboné vis-à-vis de la production à partir gaz naturel sans CCUS :

- Impact d'une augmentation du prix européen de l'électricité :
 - **négatif** : l'électrolyse consomme nettement plus d'électricité que le vaporeformage.
- Impact d'une augmentation du prix des quota de carbone :
 - **positif** : l'électrolyse n'est pas soumise aux quota de carbone
 - **négatif** : augmentation du prix de l'électricité due à l'augmentation du prix des quota de carbone.

2) Les outils européens et français de la régulation de la transition écologique

Pistes pour orienter la politique de transition climatique en faveur de la production d'hydrogène décarboné :

- Augmenter la valeur des quota de carbone.
- Donner aux producteurs d'hydrogène des compensations aux augmentations des prix de l'électricité dues aux taxes carbone.
- Donner dans la « taxonomie » le statut d'énergie renouvelable à :
 - l'hydrogène produit par vaporeformage avec CCSU
 - l'énergie nucléaire.

3) Le stockage et le transport de l'hydrogène

Les solutions pour pallier la faible densité de l'hydrogène.

- **Compression** : jusqu'à 700 bars.
 - Densité à 700 bars : **42kg/m³**
 - **1/6** de l'énergie de l'hydrogène comprimé pour comprimer à 700 bars.
- **Liquéfaction** : température : -252°C.
 - Densité : **71kg/m³**
- **Conversion** dans un autre produit plus dense :
 - Ammoniac : NH₃
 - LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier)

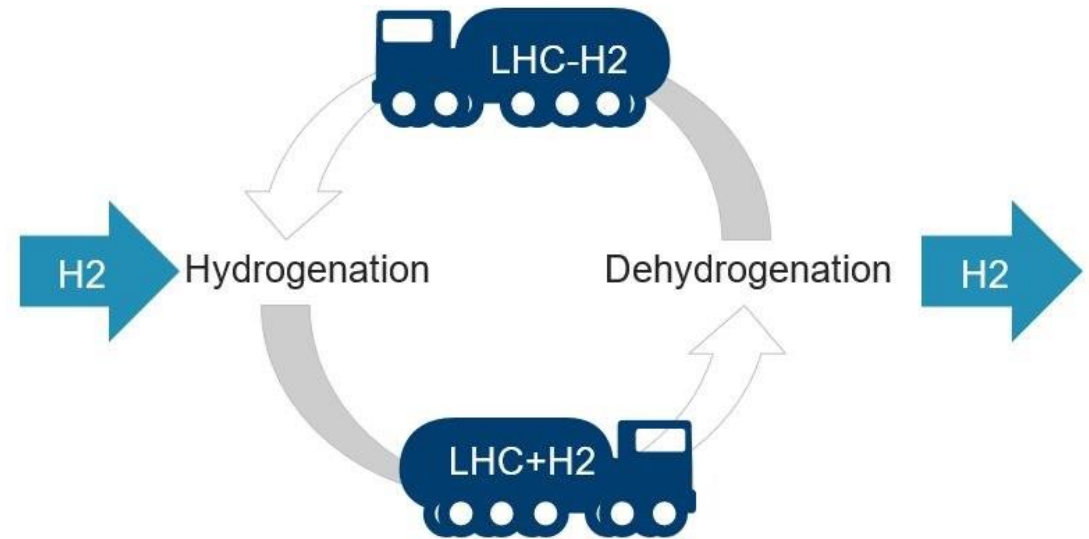


Compresseur d'hydrogène à membrane jusqu'à 900 bars

3) Le LOHC (Liquid Organic Hydrogene Carrier)

Liquide organique capable d'absorber et de restituer de l'hydrogène :

- Un m³ de LOHC peut contenir 57 kg de H₂
- Transport et stockage de l'hydrogène **sans compression ni refroidissement.**
- **Réutilisable sans perte** dans de nombreux cycles d'absorption et de restitution
- Inventé en Allemagne par la société « Hydrogenous technologies » et l'université d'Erlangen Nuremberg



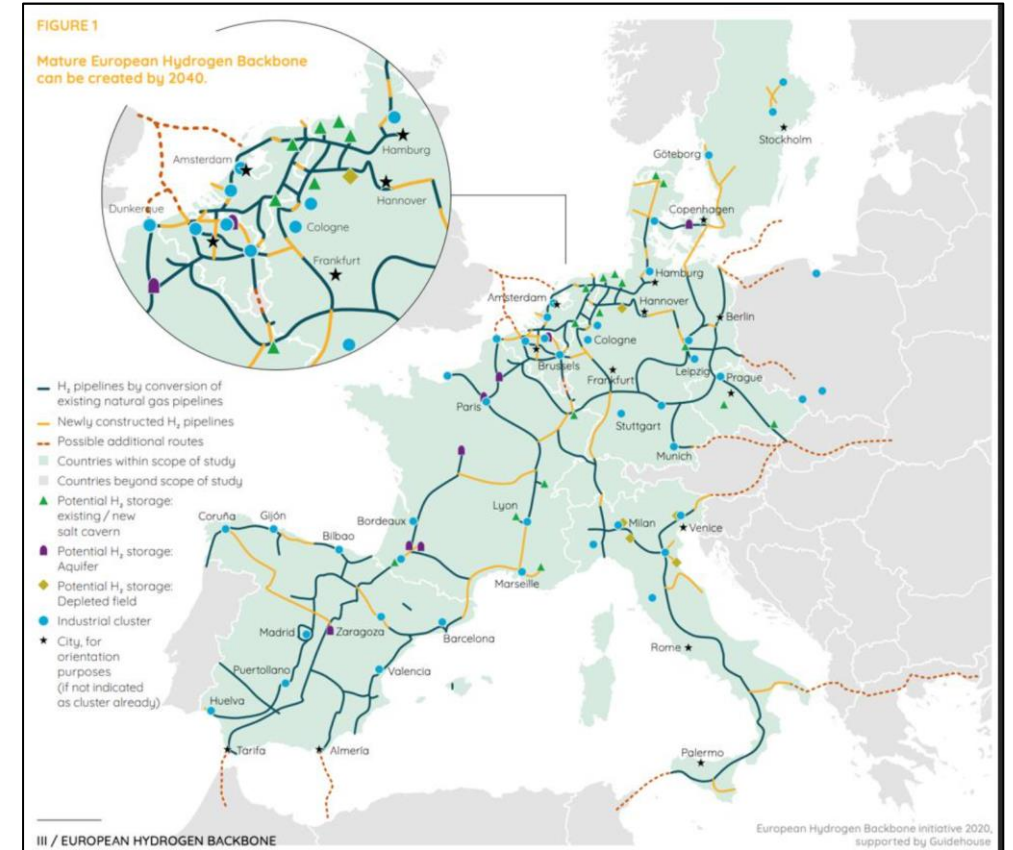
3) Le transport par pipeline de l'hydrogène

Aujourd'hui il y a dans monde **5000** kilomètres de pipeline d'hydrogène contre **3 millions** pour le gaz.

Il est possible de convertir à l'hydrogène des réseaux pipeline de gaz.

Prévisions d'importants développements.

Un projet d'un réseau de pipelines appelé « european hydrogen backbone initiative » a été conçu par un groupe d'industriels.



European Project Backbone

3) Le transport maritime de l'hydrogène

Aujourd'hui très peu de transport d'hydrogène par bateau :

Pas de perspective, à court terme, d'une demande importante de transport maritime de l'hydrogène.

Techniquement faisable :

- Hydrogène liquide
- Hydrogène converti en LOHC, ammoniac
- Réservoirs d'hydrogène sous haute pression.



Bateau dédié au transport de l'Australie vers le Japon d'hydrogène produite en Australie à partir de lignite. Capacité : 1250 m3 d'hydrogène liquide.

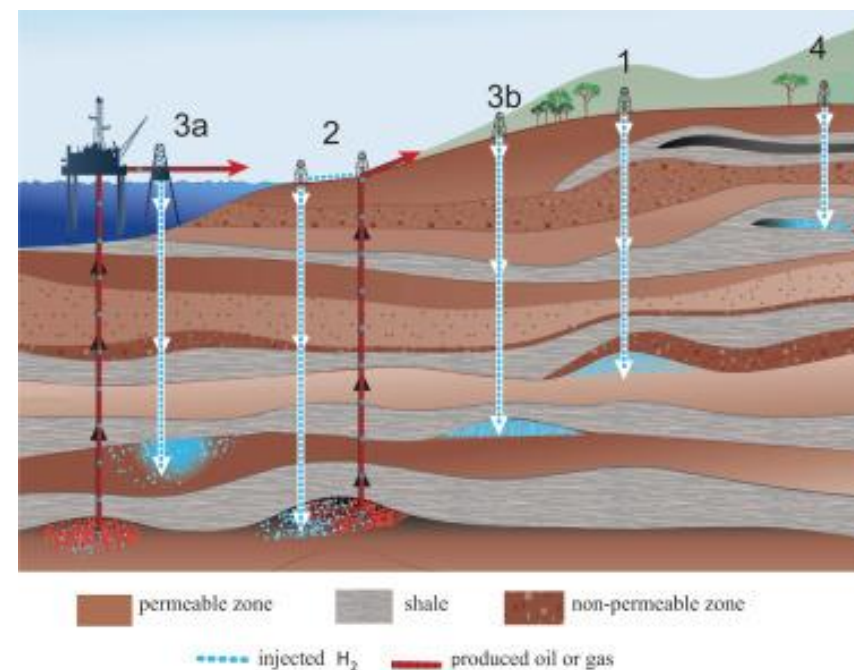
3) Le stockage géologique de l'hydrogène

Les réservoirs géologiques souterrains, notamment des cavités salines, offrent la possibilité de stocker des quantités très importantes d'hydrogène pur.

Stockage sous pression jusqu'à 100 bars

Aujourd'hui peu de réservoirs géologiques d'hydrogène dans le monde : 2 aux USA, 1 en GB, aucun en France.

Nécessité d'études sur la sécurité des réservoirs géologiques d'hydrogène : risques de fuites dues à une plus grande fluidité que celle du méthane, corrosivité de l'environnement souterrain.



3) Le stockage de l'hydrogène gazeux dans des réservoirs

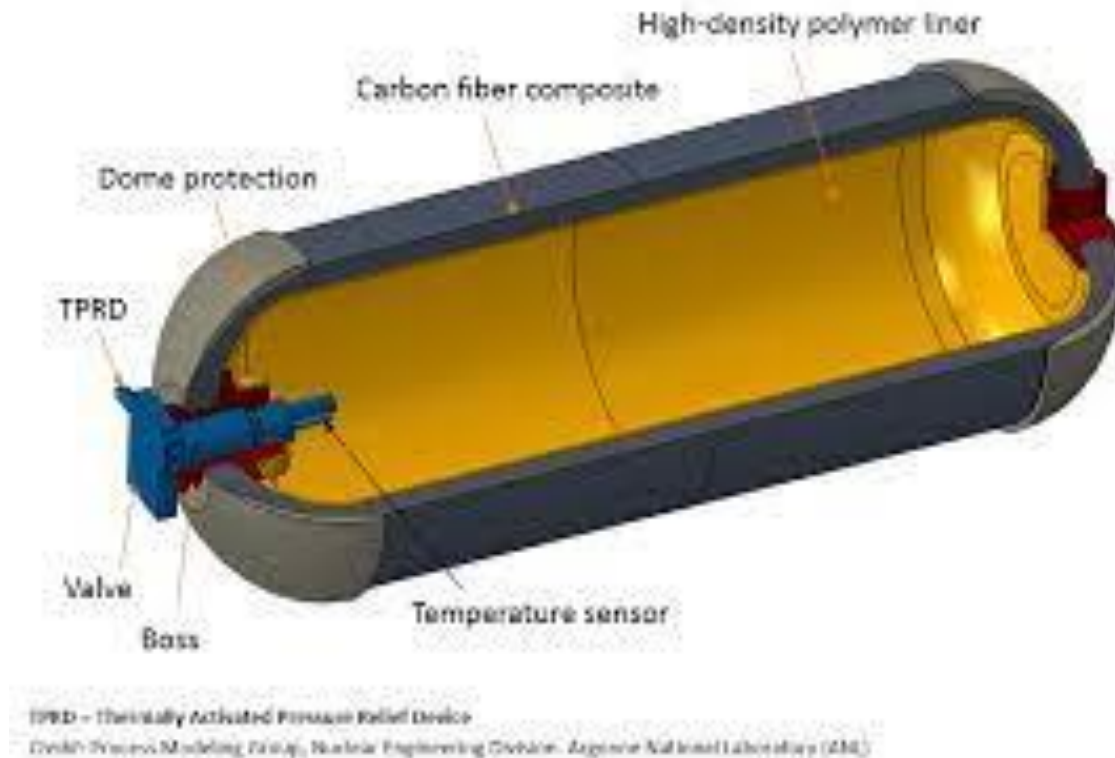
Réservoirs d'hydrogène gazeux cylindriques

Produits de la société Didion Vessel

Type	Matériau	Pression	Commentaire
1	Tout métal	200 bars	Très grande capacité Très lourd
2	Métal. Entourage matériaux composite sur la partie cylindrique	300 bars	Semblable au type 1
3	Métal. Entourage de matériaux composites totalité du réservoir	700 bars	Léger
4	Fibre de carbone	700 bars	Très léger. Cher.

3) Le stockage de l'hydrogène dans des réservoirs

Réservoirs d'hydrogène gazeux cylindriques

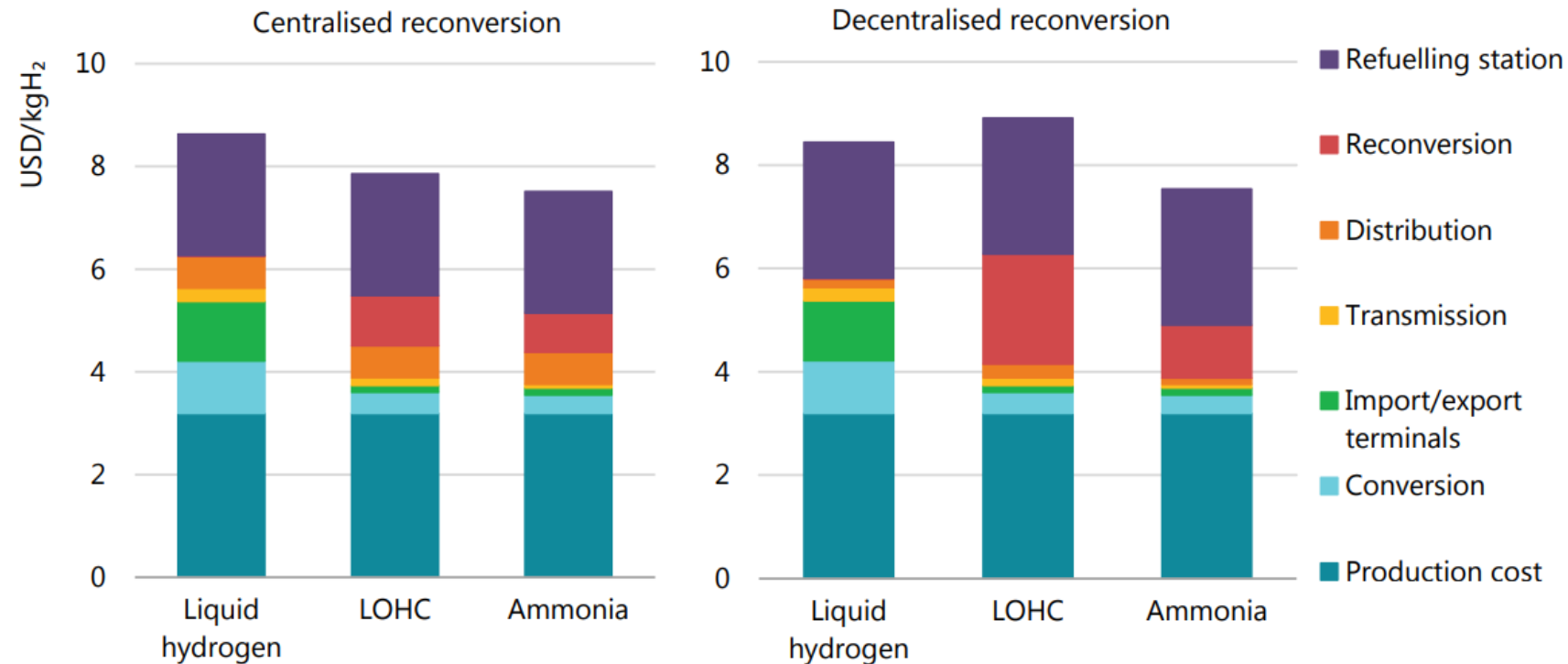


3) Le stockage de l'hydrogène liquide



3) Les coûts du transport et de la distribution

Figure 32. Cost of electrolytic hydrogen imports from North Africa supplied to a hydrogen refuelling station in Europe in 2030



Note: Assumes a distribution distance of 100 km. More information on the assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2019.

From : The future of hydrogen : report prepared by the IEA for the G20 Japan

3) Le stockage et le transport de l'hydrogène

	Transport par bateau	Transport par camion	Pipeline	Stockage réservoir	Stockage géologique
Hydrogène liquide	oui	oui	non	oui	non
Hydrogène gazeux	oui	oui	oui	oui	oui
Converti en ammoniac	oui	oui	oui	oui	oui
Converti en LOHC	oui	oui	non	oui	oui

4) L'hydrogène pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables

Comment l'hydrogène pallie l'intermittence des énergies renouvelables?

- **Stockage** de l'hydrogène : Réservoir naturel souterrain, Réservoir fixe (gazeux ou liquide)
- **Rapidité** de réaction des électrolyseurs aux demandes de variation de leur débit (quelques secondes)
- **Réversibilité** de certains électrolyseurs qui peuvent basculer dans le mode pile à hydrogène pour produire de l'électricité.

4) L'hydrogène pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables

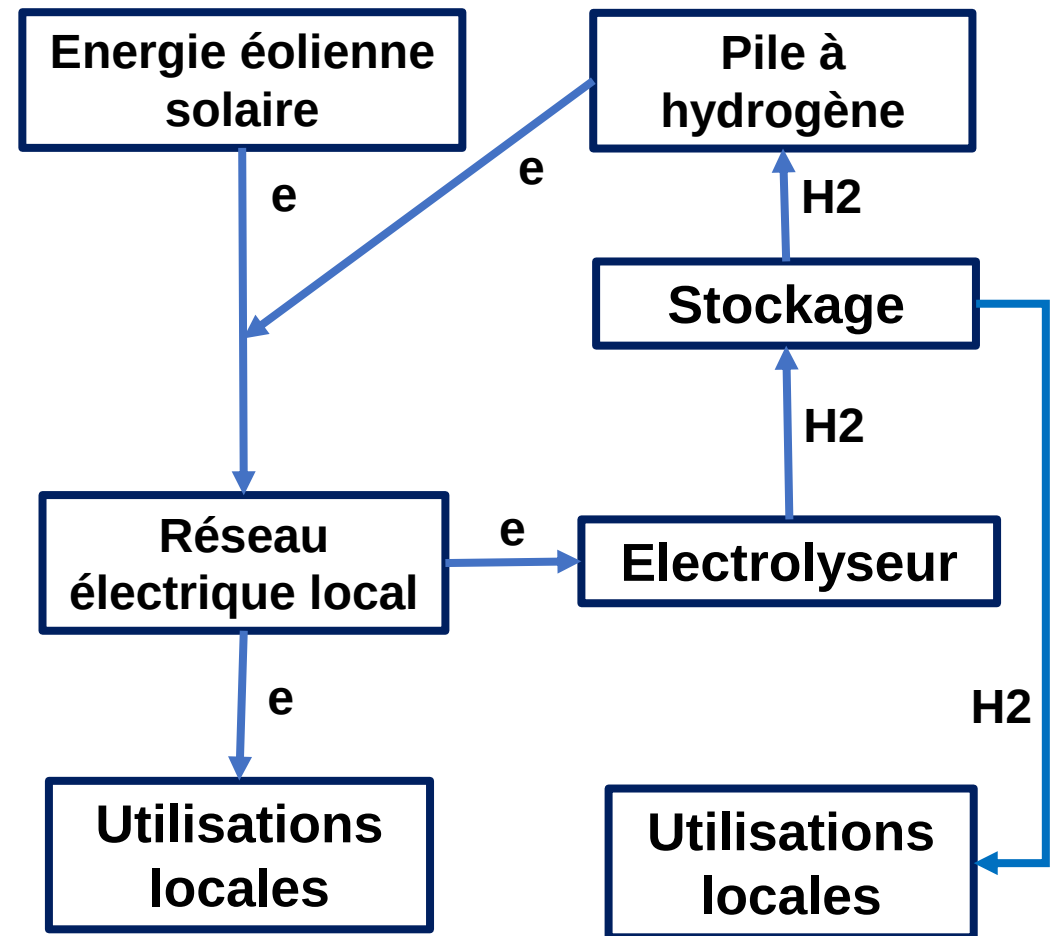
Position de RTE au sujet de l'intermittence des énergies renouvelables

- le stockage de l'hydrogène ne **présente pas d'intérêt jusqu'en 2035** parce qu'il y a des moyens plus économiques pour gérer l'intermittence de énergies renouvelables.
- Au-delà de 2035 des solutions telles que le stockage de l'hydrogène s'imposeront pour répondre au développement des énergies intermittentes.

4) L'hydrogène pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables

Cas des unités de production locale d'hydrogène :

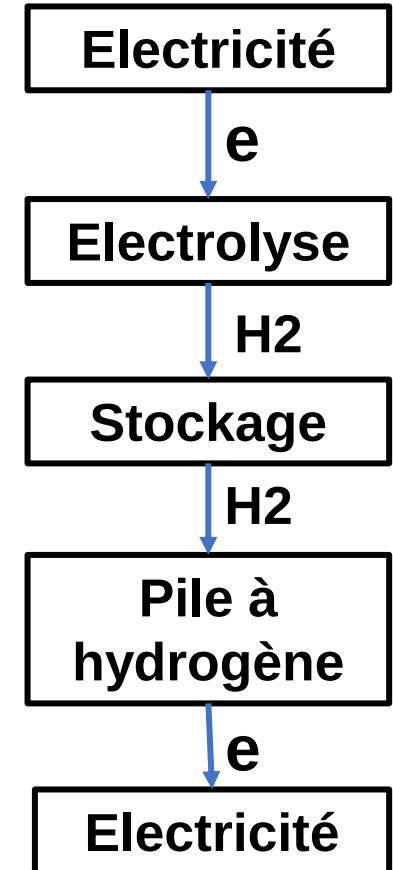
- **Le stockage de l'hydrogène dans des réservoirs** assure la continuité des fournitures locales d'électricité et d'hydrogène.
- Certains électrolyseurs réversibles peuvent assurer la fonction de pile à hydrogène.



4) L'hydrogène pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables

Le très faible rendement du stockage de l'électricité sous forme d'hydrogène est-il **réddhibitoire** ?

- **Non** malgré la multiplication par 4 de l'électricité consommée (rendement 25 %).
 - Consommation d'électricité excédentaire **très bon marché**
 - **Faible prix du stockage géologique** dans des cavités souterraine
 - Des analyses financière de projets concrets ont démontré la supériorité de l'hydrogène lorsque les volumes de stockage sont importants.



5) Sécurité

Problèmes de sécurité de même nature que ceux du gaz naturel mais **nettement plus sévères** :

- Risque de fuite plus élevé à cause de la petite dimension de la molécule de H_2 .
- **Plus grande inflammabilité** : spontanément avec seulement 4% d'hydrogène dans l'air.
- Risques de corrosion des métaux.
- L'hydrogène monte dans les espaces supérieurs des bâtiments à cause de sa faible densité : risque d'arrachement des toitures en cas d'explosion.



Explosion d'une station service d'hydrogène en Suède

6) Perspectives d'innovations techniques : hydrogène solide

Nombreuses recherches

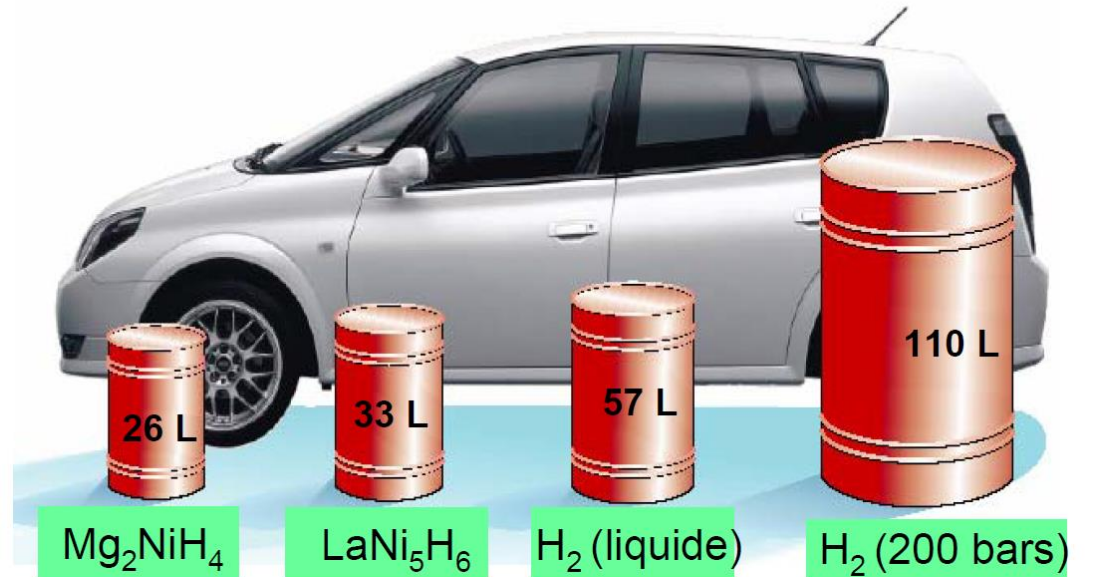
Deux pistes :

- **Adsorption** : fonctionne comme une éponge. L'hydrogène est absorbé par un matériau poreux, par exemple des feuillets de graphène.
- **Absorption** : l'hydrogène est intégré dans des molécules, par exemple l'hydruure de magnésium : Mg_2NiH_4

Pas encore au stade de l'industrialisation.

6) Perspectives d'innovations techniques : hydrogène solide

➤ Stockage de H₂ dans un matériau solide



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

6) Perspectives d'innovations techniques : photo-électrolyse de l'eau

Procédé par lequel la lumière est utilisée pour dissocier la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène.

Procédé simple et séduisant mais encore loin du domaine des applications.

