

# Hydrogène et électricité photovoltaïque

## Quels challenges?

Fabrice Lemoine  
Professeur à l'Université de Lorraine



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

# Carte d'identité de l'hydrogène

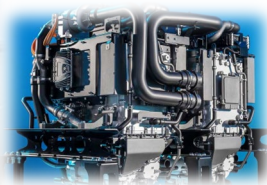
Pression atmosphérique : 0,09 kg/m<sup>3</sup>  
350 bars : 26,1 kg/m<sup>3</sup>  
700 bars : 42 kg/m<sup>3</sup>  
Liquide : 71 kg/m<sup>3</sup>

- Véhicule léger (moteur électrique + pile à combustible)



1000 km ≈ 8,5 kg d'H<sub>2</sub>

- Mobilité lourde (moteur électrique + pile à combustible)



1000 km ≈ 80 kg d'H<sub>2</sub>



## Pouvoir calorifique

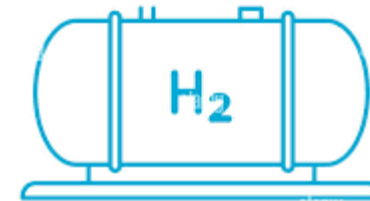


Essence : 48 000 kJ/kg  
ou 36 000 kJ/l

X 3, mais / 6

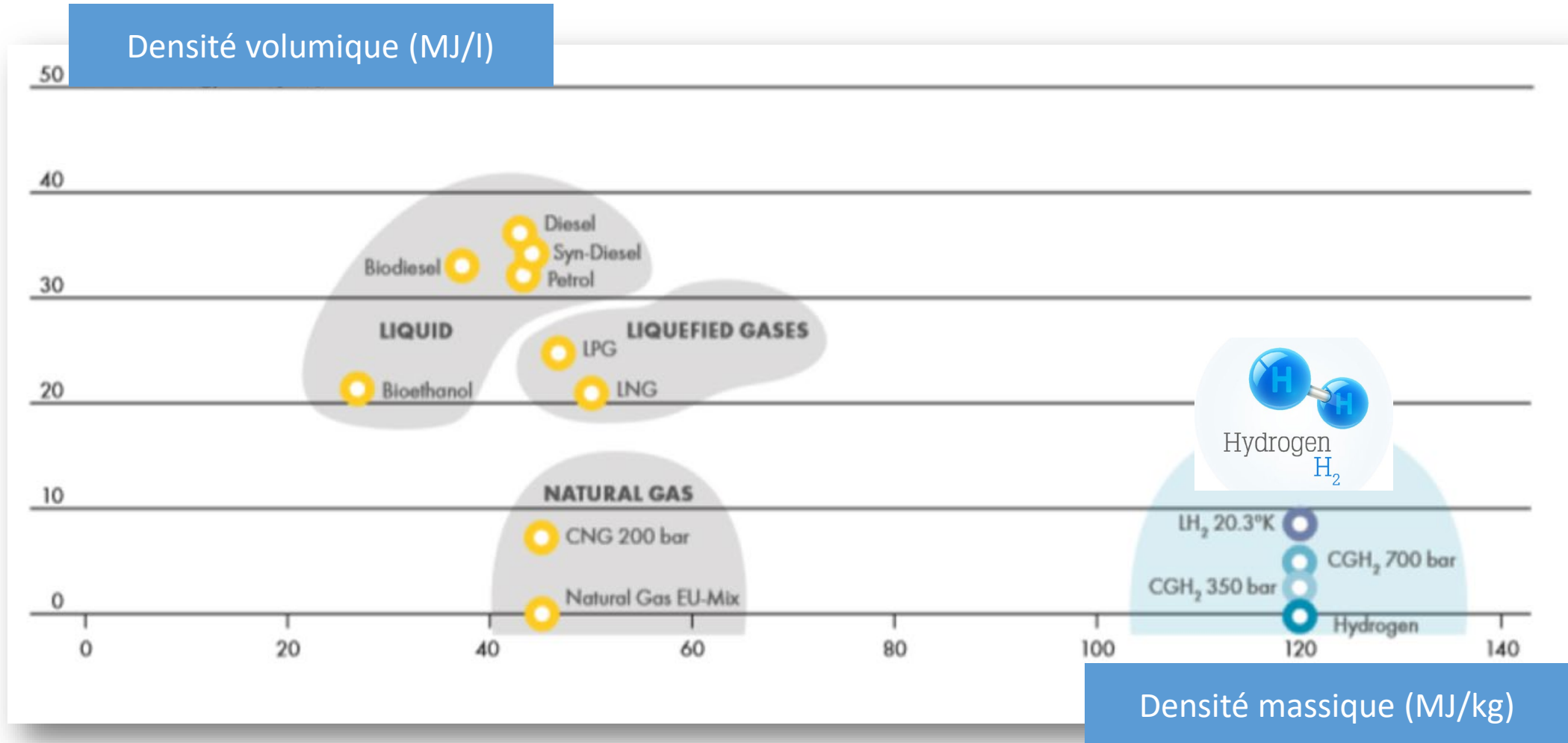
141 000 kJ/kg

6000 kJ/l à 700 bars

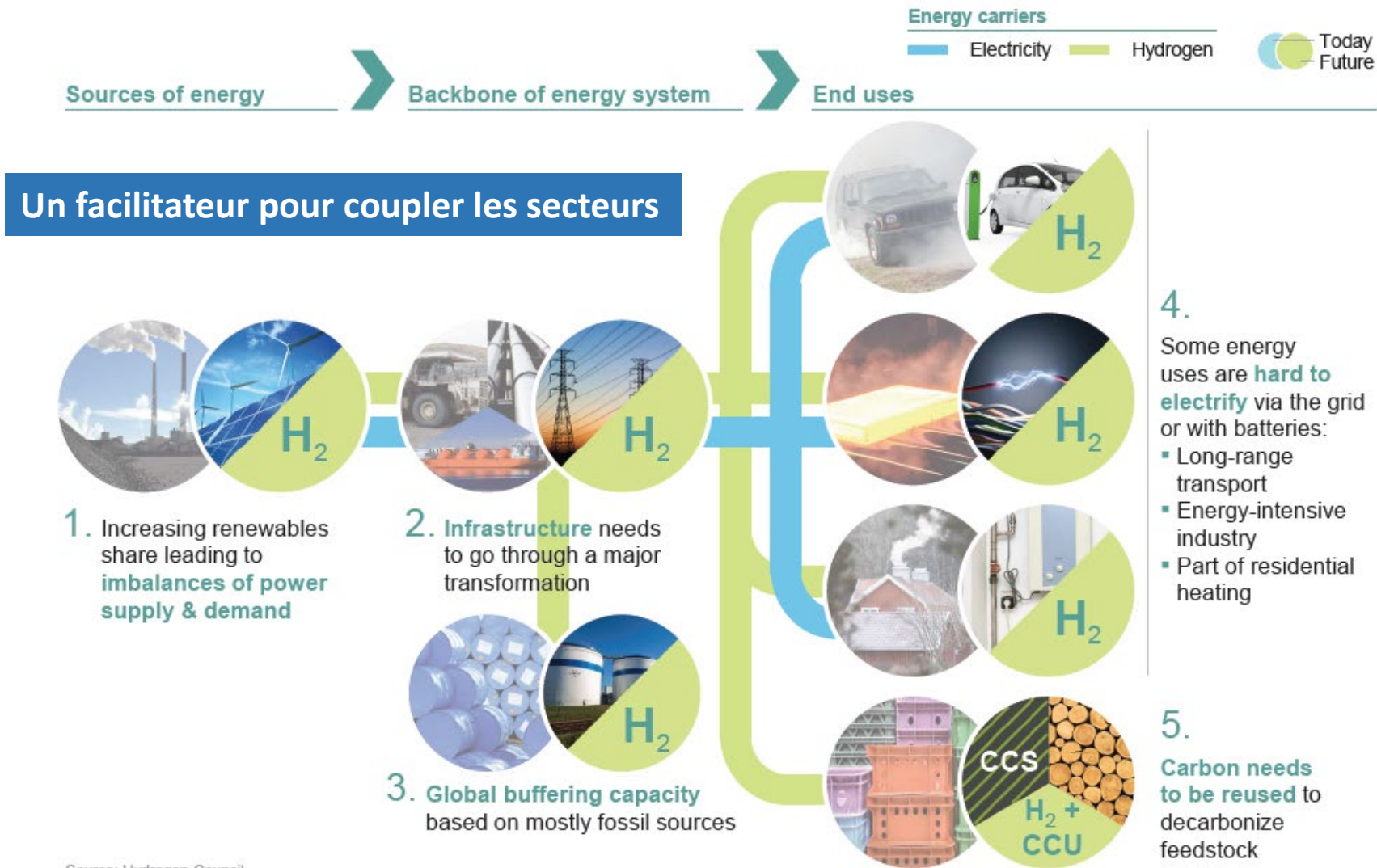


**Por faire 800 km avec un VL : réservoir de 270 l d'H<sub>2</sub>**

# Densité énergétique de l'hydrogène



# L'hydrogène, un facilitateur de la transition énergétique



## Mobilité

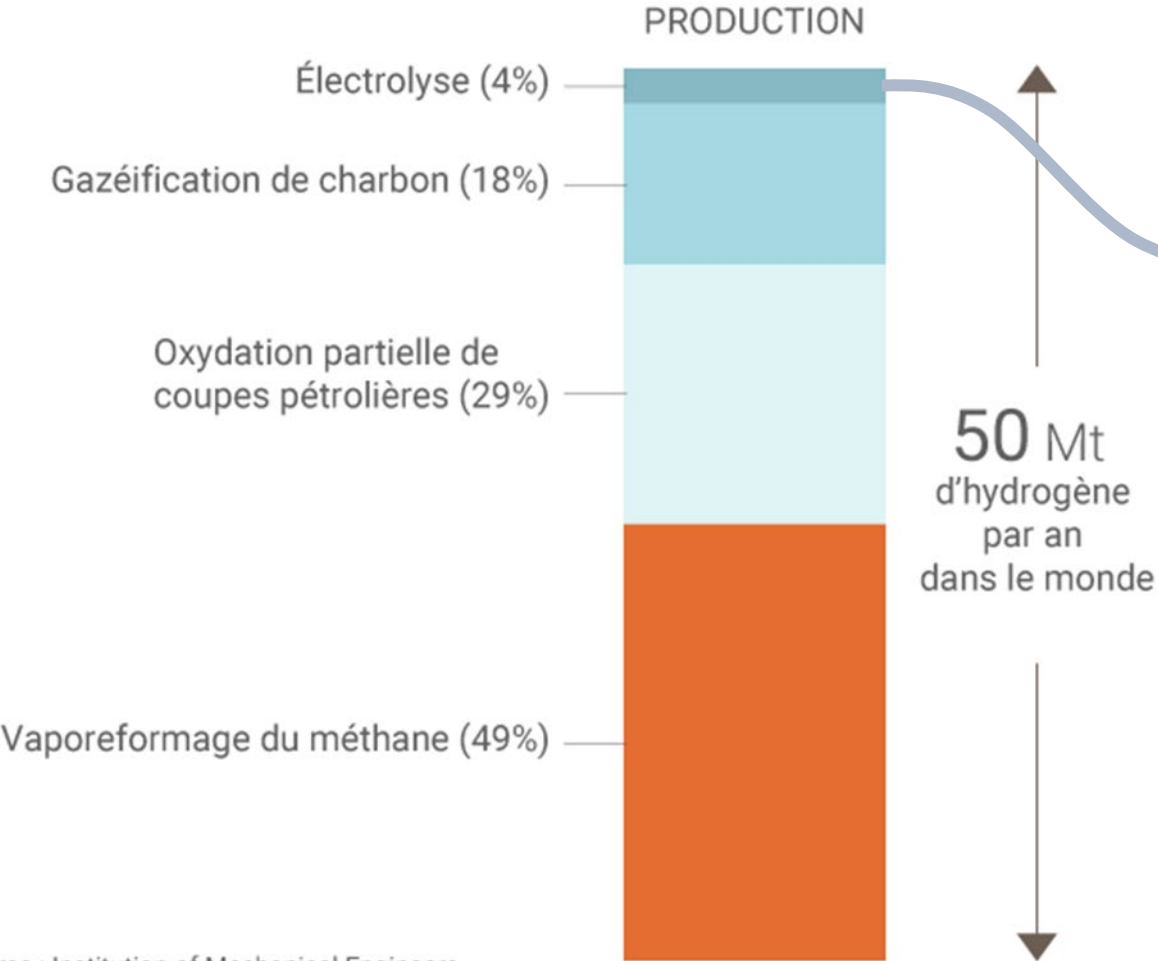
## Industrie Lourde

- Aciéries
- Chaleur haute température

## Défossilisation de l'industrie chimique (hydrogénation du CO2)

Source: Hydrogen Council

# Comment produit-on de l'hydrogène ?



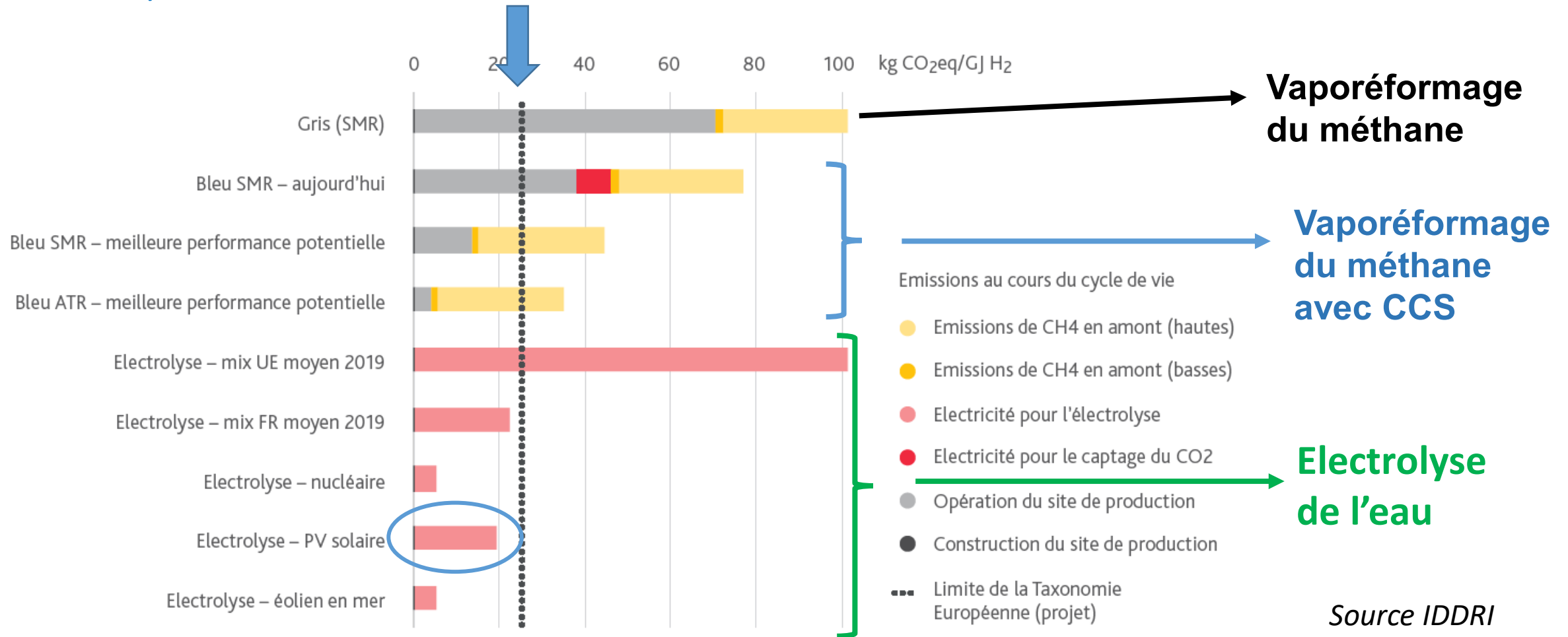
L'électrolyse de l'eau est la voie de production la plus décarbonée en FR

Source : Institution of Mechanical Engineers

**Production d'hydrogène : 830 Mt CO2/an ≈ 2% des émissions annuelles**

# Comment produit-on de l'hydrogène ?

Hydrogène « durable » - taxonomie européenne du janvier 2022 (European Commission) : 3 kg CO<sub>2</sub> eq/kg H<sub>2</sub> au cours du cycle de vie



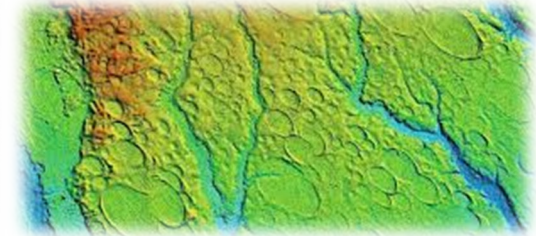
Source IDDRI

# Comment produit-on de l'hydrogène ?

➔ **L'hydrogène à l'état natif (hydrogène blanc)**  
...Des investigations plus poussées sont en cours



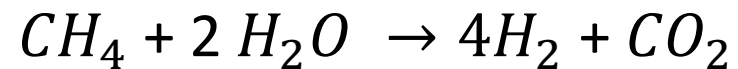
(gisement en Turquie)



➔ L'hydrogène peut être extrait **d'hydrocarbures fossiles** (gaz, pétrole, charbon) mais cela nécessite de l'énergie et émet du CO2

## La voie hydrocarbure

Ex- Réformage du gaz naturel à la vapeur d'eau  
Réaction catalytique très endothermique



T=700°C – 1100°C

11,1 kgCO2/kgH2



# Production par électrolyse de l'eau



## Electrolyse de l'eau

Et l'hydrogène est un e-fuel ...

Alcaline

TRL 10-11

Mature

PEM

Polymer electrolyte membrane

TRL 8

Bonne flexibilité

Haute température

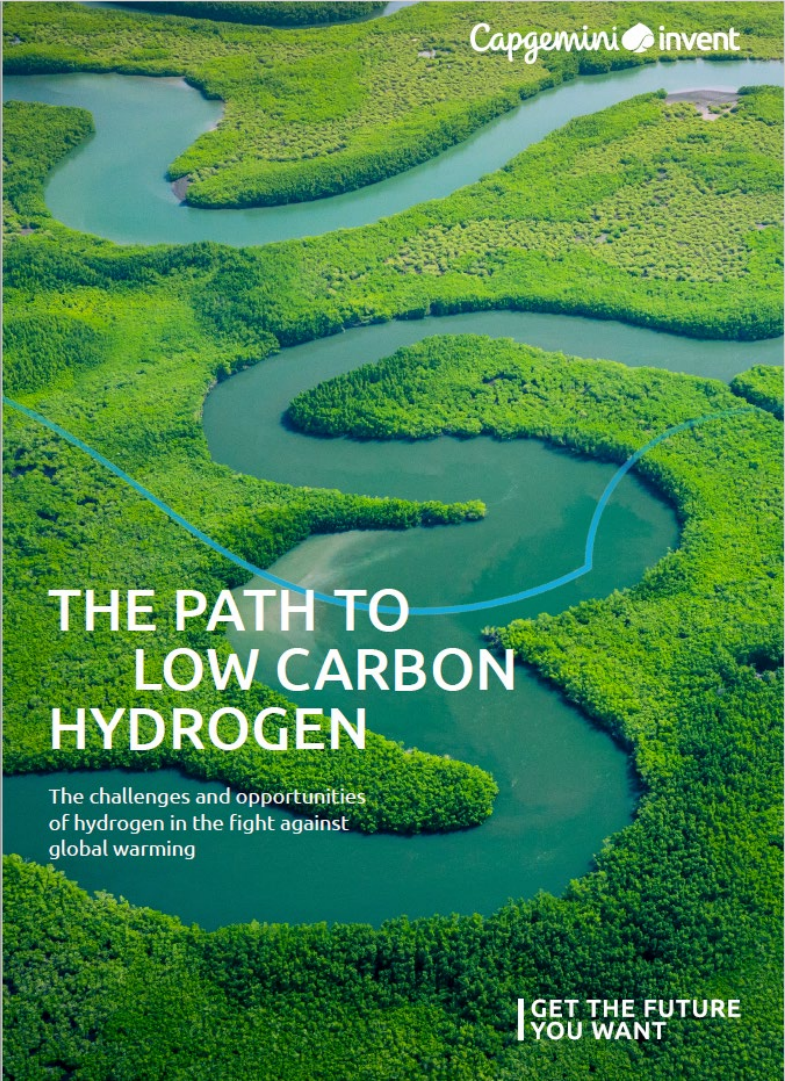
TRL 5-6

Très bon rendement  
Stade R&D avancé  
Besoin en chaleur (fatale ou solaire)





# L'hydrogène est en lien avec des choix stratégiques nationaux



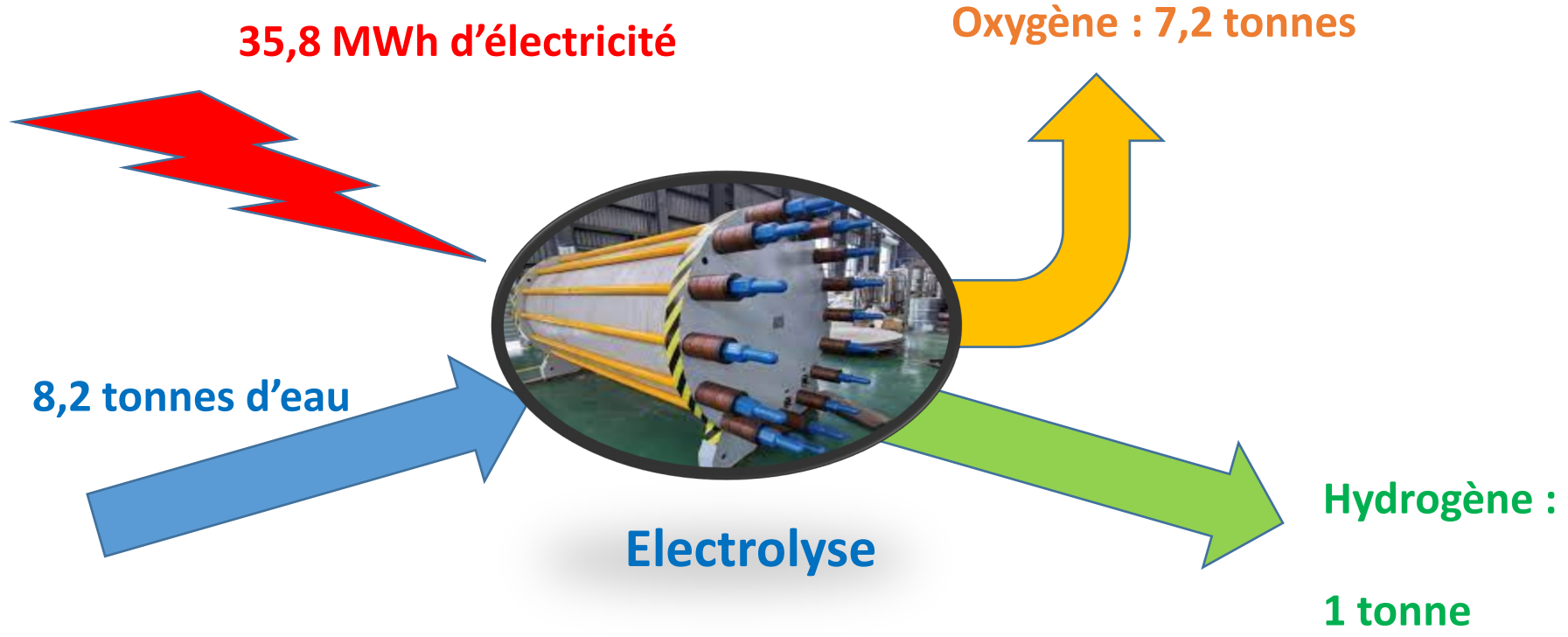
	EU	DE	NL	FR	ES	IT	UK	NO	CH	UA	RU	JP	KR	CN	AU	CA	MO
Hydrogen use by sector																	
Industry	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✗	✗	✓	(✓)	✗	✗	✓	(✓)	✓
Energy	(✓)	(✓)	(✓)	✓	(✓)	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)
Transport	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)
Building	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✗	✗	(✓)	✗	✗	(✓)	(✓)	✓	✓	✗	(✓)	(✓)	(✓)
Export	✗	✗	✗ <sup>1)</sup>	✗	✓	✗	✗	✗ <sup>2)</sup>	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓

Main sector     
 Least importance     
 Not-addressed

# Production par électrolyse de l'eau- bilan énergétique



2,8 kWh par m<sup>2</sup>/jour dans l'Est de la France



**Env. 13 000 m<sup>2</sup> (1,3 ha) de surface PV pour produire 1 tonne d'hydrogène/jour**

# L'hydrogène rend possible la synthèse de carburants

## ✓ Carburants renouvelables : produit par des sources d'énergie renouvelables

- ❑ **Biofuels:** produits par la biomasse
- ❑ **e-fuels** (ou électrofuels): produits en utilisant le  $\text{CO}_2$  ou  $\text{CO}$  capturé +  $\text{H}_2$  produit par des sources d'électricité renouvelables (*éolien, solaire*)
- ❑ **Solar fuels:** l'énergie solaire est utilisée comme source d'énergie

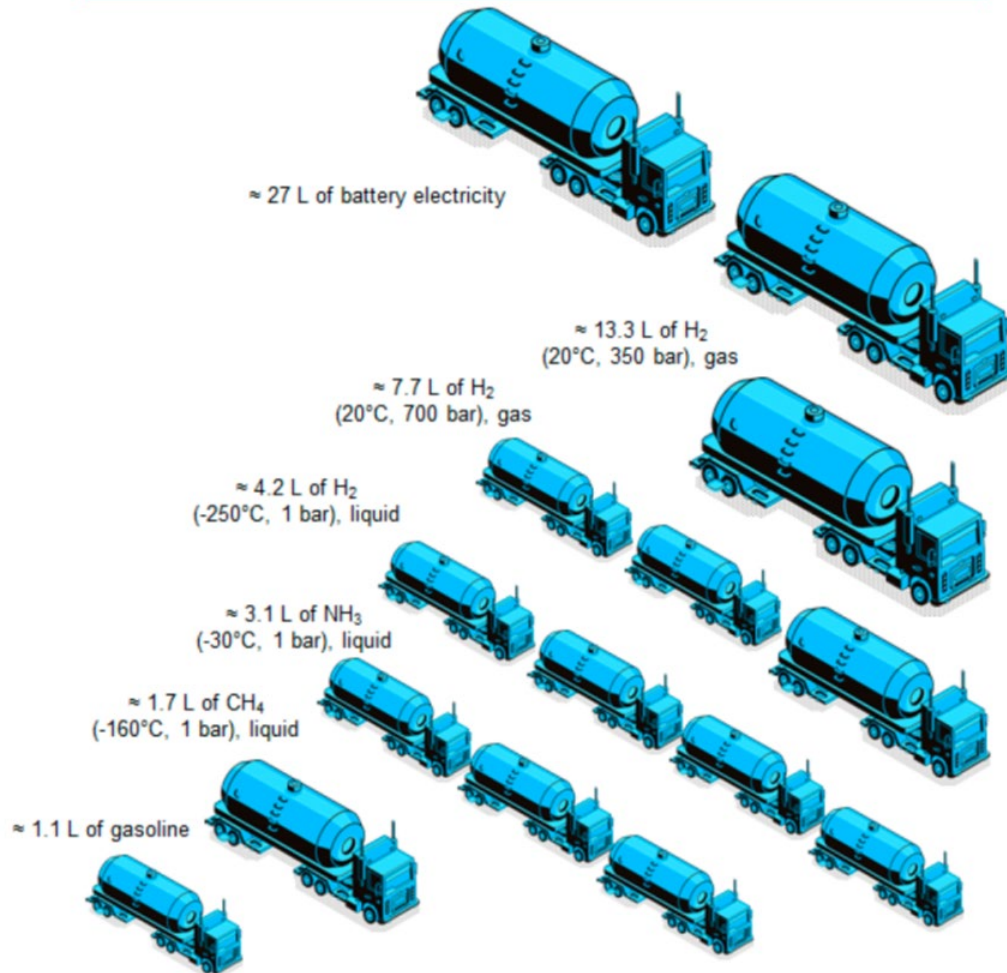
## ✓ Capture du carbone et utilisation (CCU): procédés qui permettent de capturer le $\text{CO}_2$ issus de processus industriels émetteurs et directement dans l'air. Il s'agit d'une source de carbone (recyclée) qui peut être convertie en combustibles renouvelables ou molécules habituellement produit par des combustibles fossiles



# Batteries, hydrogène, e-fuels ?

How to transport or store 10kWh of energy?

**10 kWh : énergie nécessaire pour parcourir 50 km avec une voiture particulière**



Pour les applications « transport », les combustibles à base de carbone sont beaucoup plus denses (énergétiquement) que les batteries et l'hydrogène

→ Mertens, J., R. Belmans and M. Webber, 2020. *Why the carbon neutral transition will imply the use of lots of carbon.* *C-Journal of Carbon research*, 6 (39), 1-8