



Hydrogène pour l'industrie : potentiel et applications

22^{ème} Forum Romand de l'AEnEC
16 novembre 2023

Juliana Leon – Responsable pôle gaz renouvelable

Juliana.leon@planair.ch

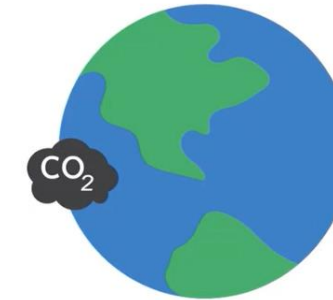
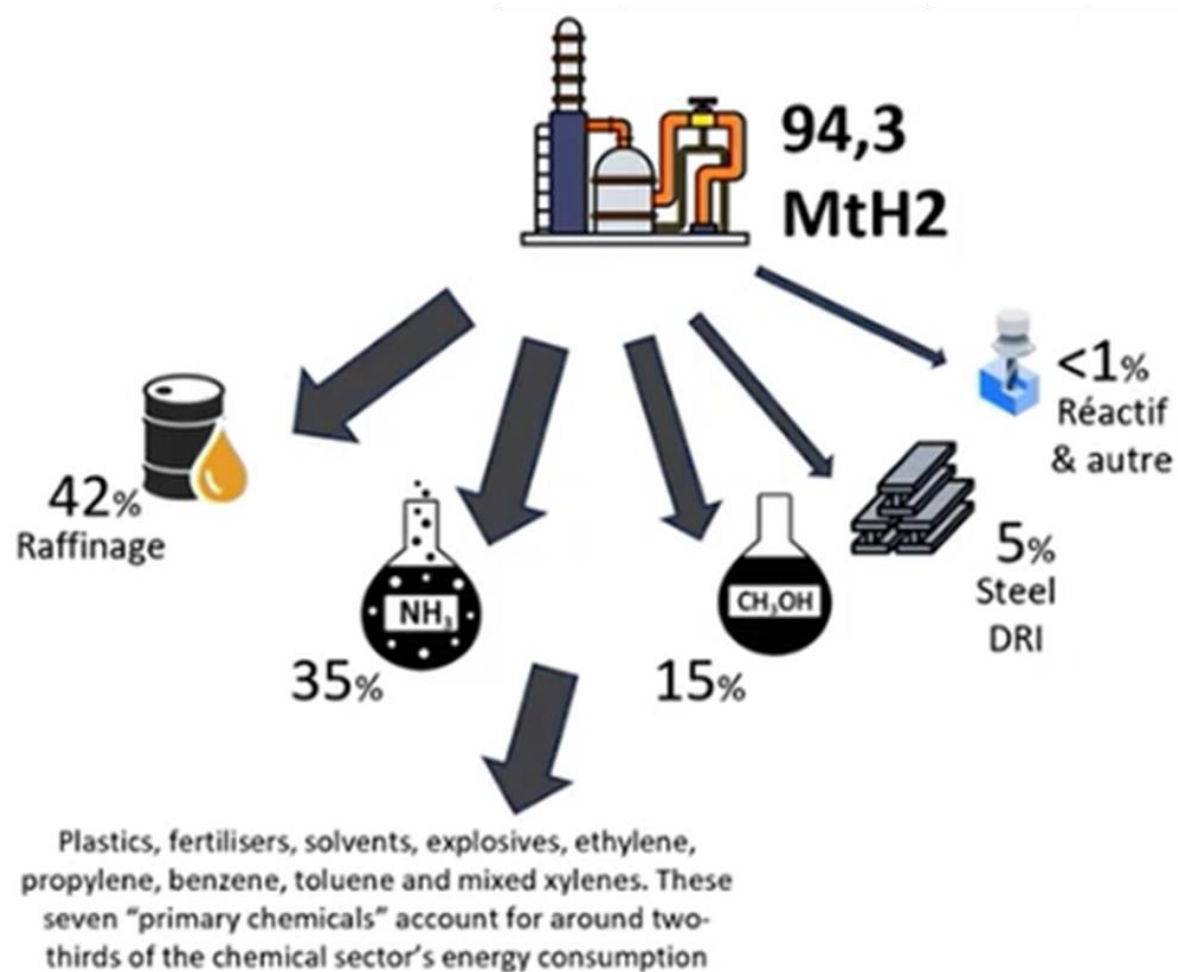


Hydrogène pour l'industrie

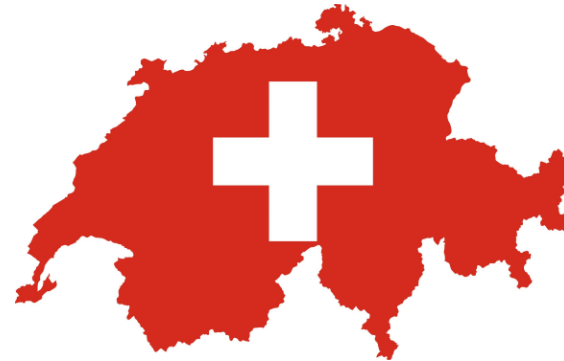
1. Quelles applications ?
2. Comment le produire proprement ?
3. Disponibilité et prix
4. Cas concret d'un industriel suisse

99%

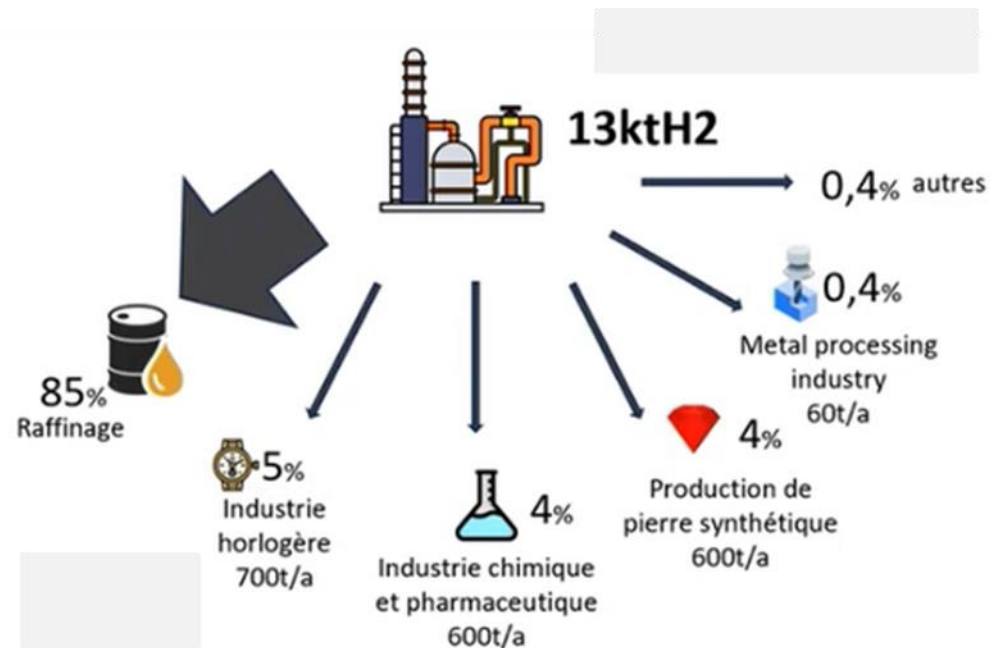
H₂ produit principalement à partir de combustibles fossiles



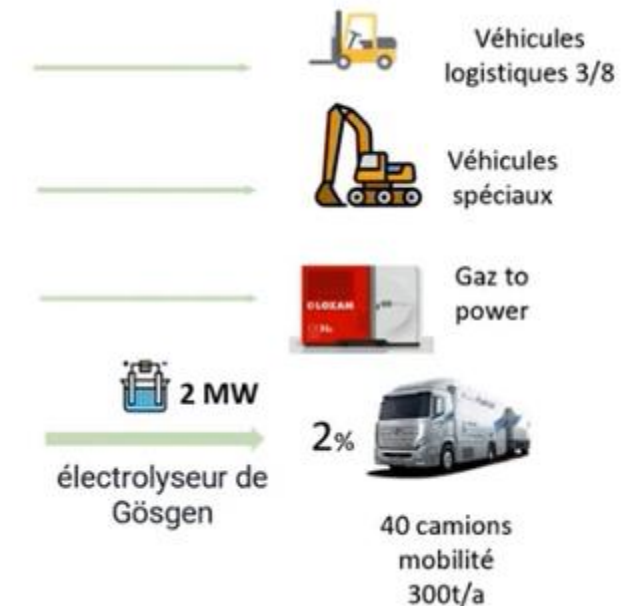
= **2%** des émissions de CO₂ mondiales



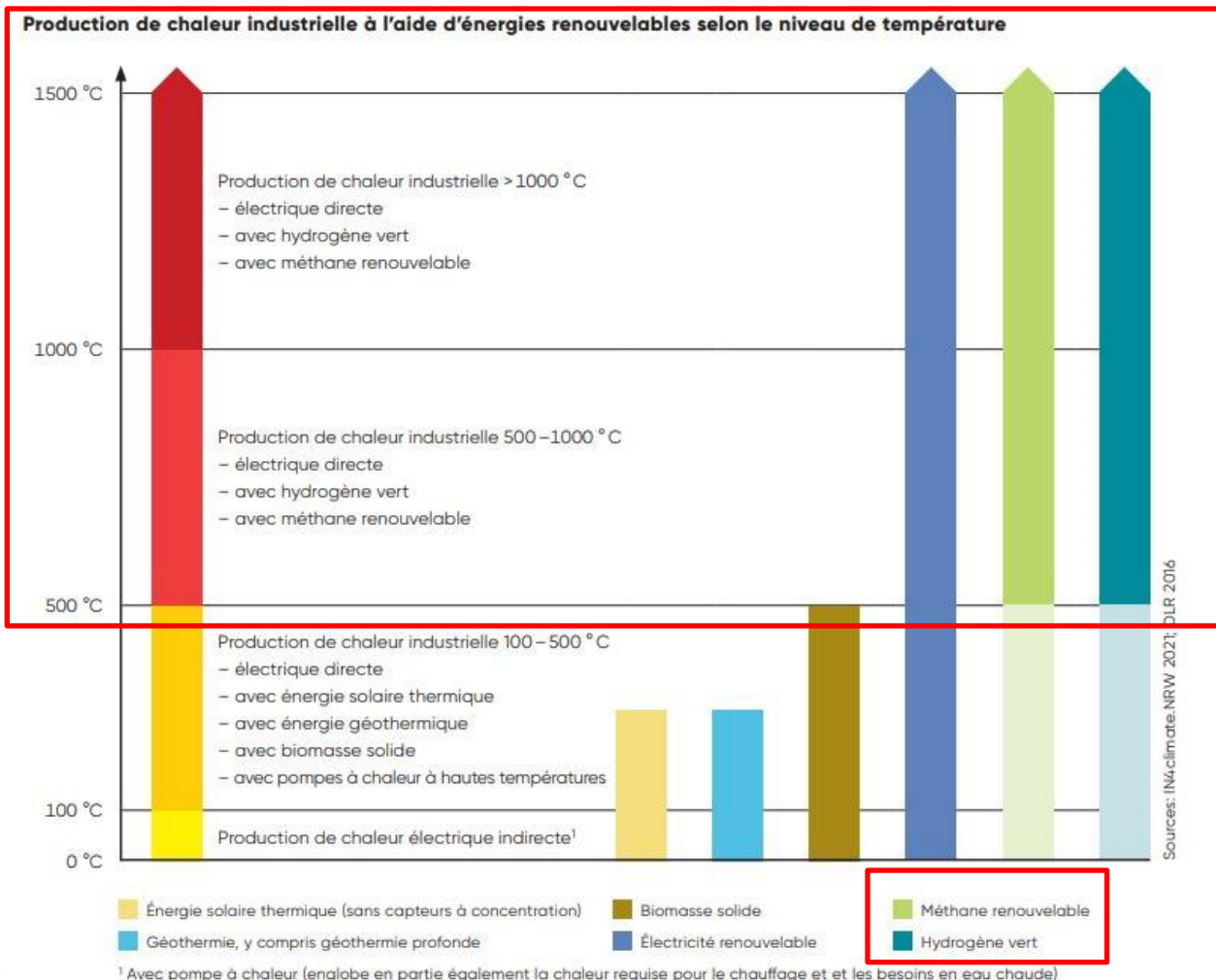
Aujourd'hui : H₂ gris



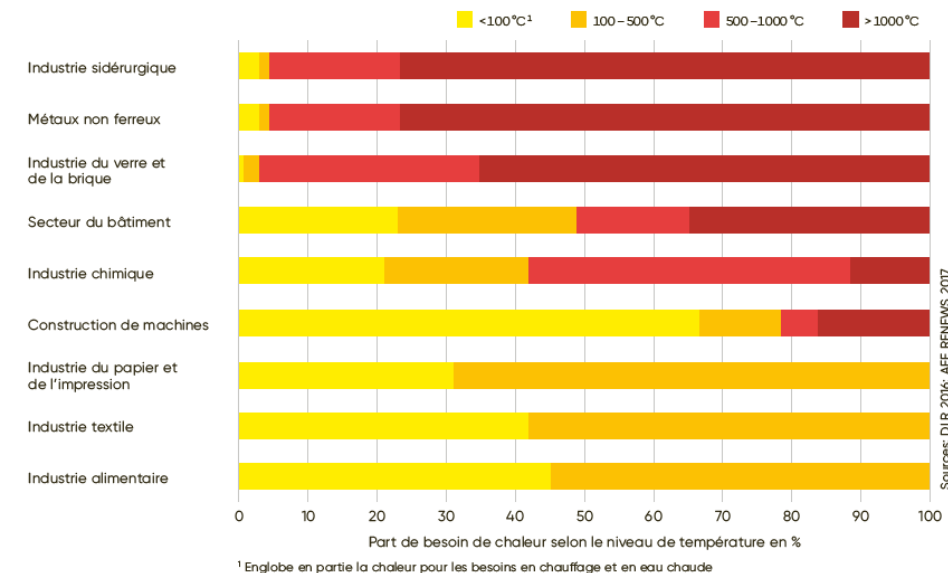
Demain : Opportunités de décarbonation avec H₂ vert



- 7 installations électrolyse en construction/réception
- ~10 autres projets H₂ en planification



Besoin de chaleur industrielle selon la branche et le niveau de température



- Avec une température de flamme à 2000 °C l'hydrogène et le méthane renouvelable sont intéressants pour les procédés à haute température
- Les procédés industriels de plus basses températures pourraient être alimentés par d'autres sources d'énergies renouvelables (énergie solaire thermique, géothermie...)

Les propriétés essentielles de l'hydrogène

Caractéristiques de l'hydrogène et du gaz naturel

	Unité	¹ Hydrogène H ₂	² Méthane CH ₄
Pouvoir calorifique	kWh/m ³	2,995	10,13
Pouvoir calorifique supérieur	kWh/m ³	3,54	11,24
Indice de Wobbe inférieur	kWh/m ³	11,359	13,37
Indice de Wobbe supérieur	kWh/m ³	13,427	14,82
Densité standard	kg/m ³	0,08989	0,743
Indice de méthane	–	0	91
Limite inférieure d'explosivité dans l'air	% vol.	4	4
Limite supérieure d'explosivité dans l'air	% vol.	77	17
Besoin en air (pour 21% vol. O ₂)	m ³ air / m ³ gaz	2,38	9,71
Température d'auto-inflammation selon DIN 51794	°C	560	570 ... 670
Retard à l'allumage	ms	0,04613	46,16
Vitesse de flamme laminaire maximale	cm/s	346	43
Température de combustion adiabatique de la flamme avec air lambda 1	°C	2050	1950
Couleur de la flamme	–	incolore	bleue

¹ Caractéristique de l'hydrogène à une pureté de 99,9 % vol.

² Gaz naturel, biométhane, méthane synthétique

Difficultés H₂ vs CH₄

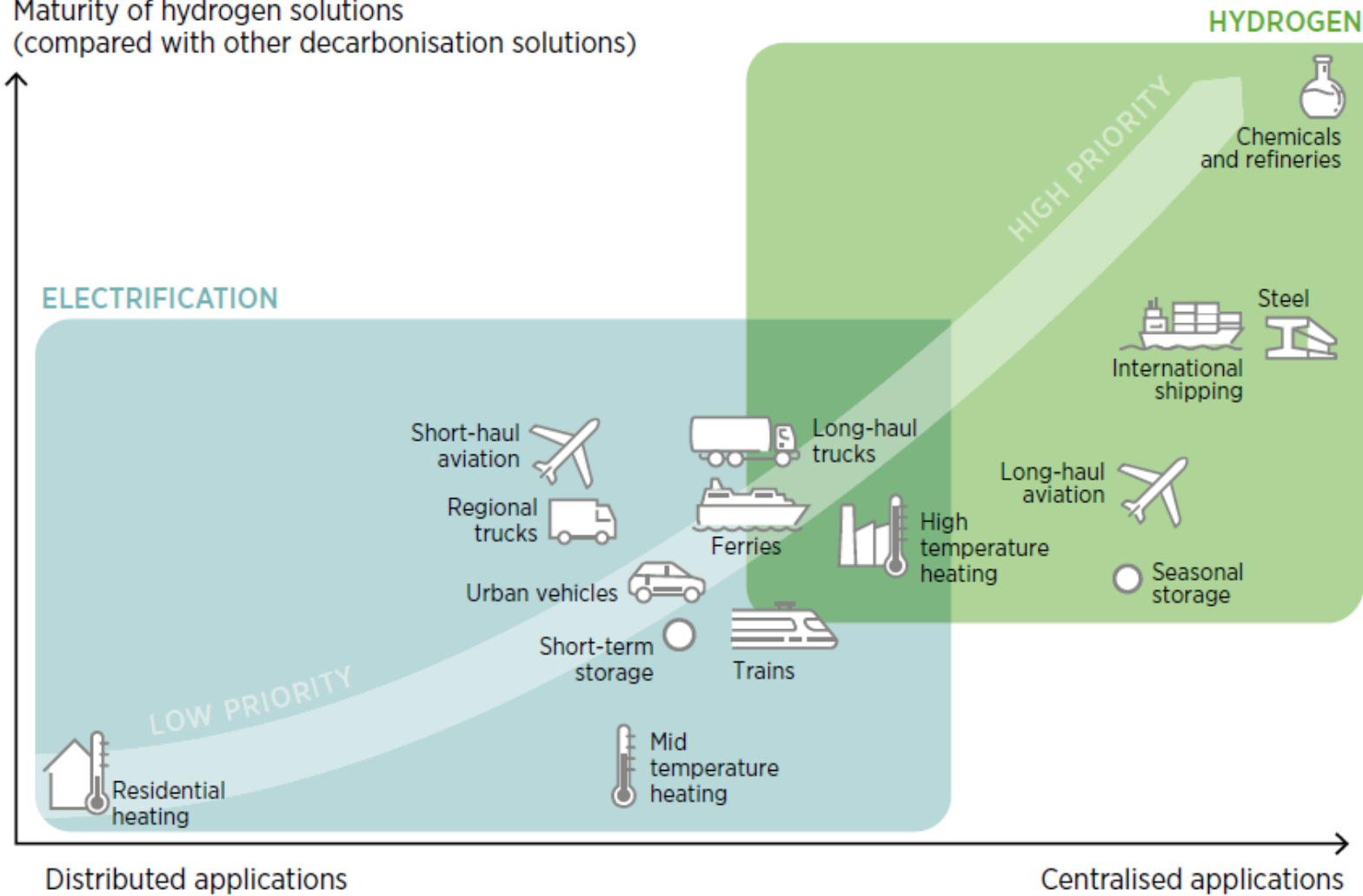
- Coût transport/stockage
 - 3.2x moins d'énergie par volume
- Sécurité
 - Taille molécule (risque fuite)
 - Vitesse de combustion plus élevée
 - Flamme incolore (indétectable)
 - Plage explosivité étendue
 - Corrosion de certains métaux
- Nécessite changement du brûleur actuel

Principal avantage H₂

- Zéro émissions directes CO₂

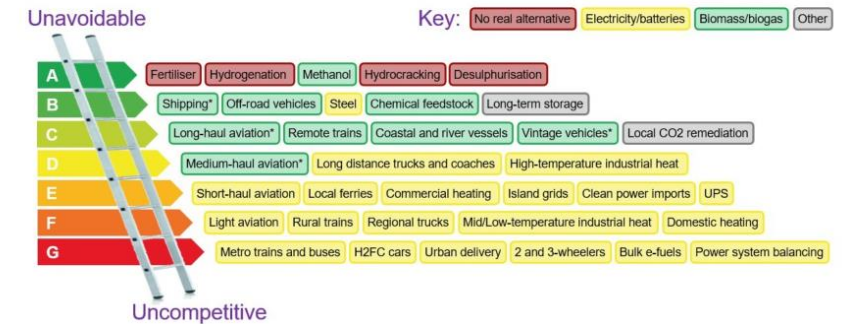
Source: ASIG – L'hydrogène dans l'industrie, gazette 2/2023

Maturity of hydrogen solutions
(compared with other decarbonisation solutions)



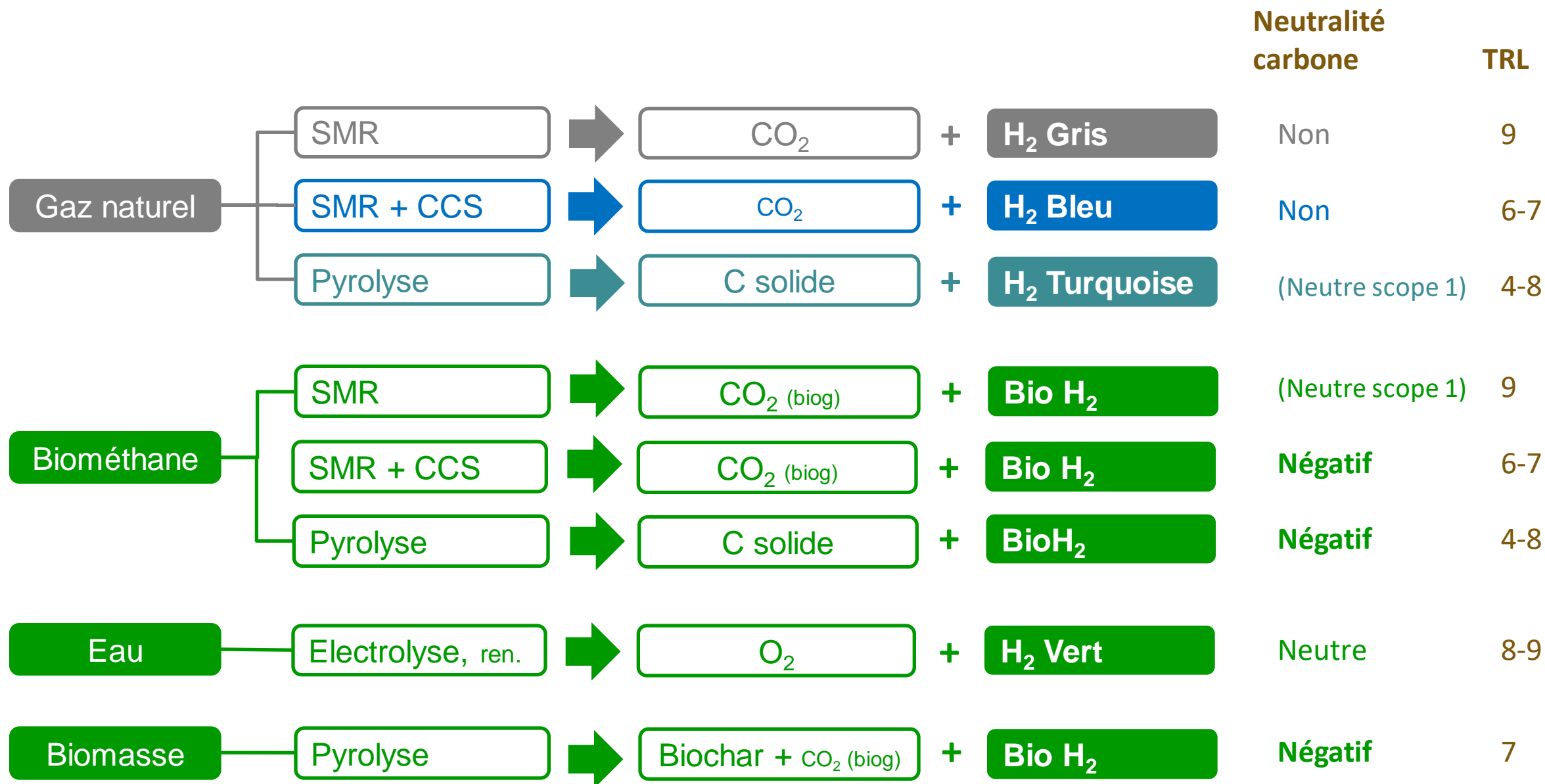
Autre approche [The Clean Hydrogen Ladder](#)

Clean Hydrogen Ladder: Competing technologies Liebreich Associates



Source: IRENA 2022

Hydrogène : comment le produire proprement ?

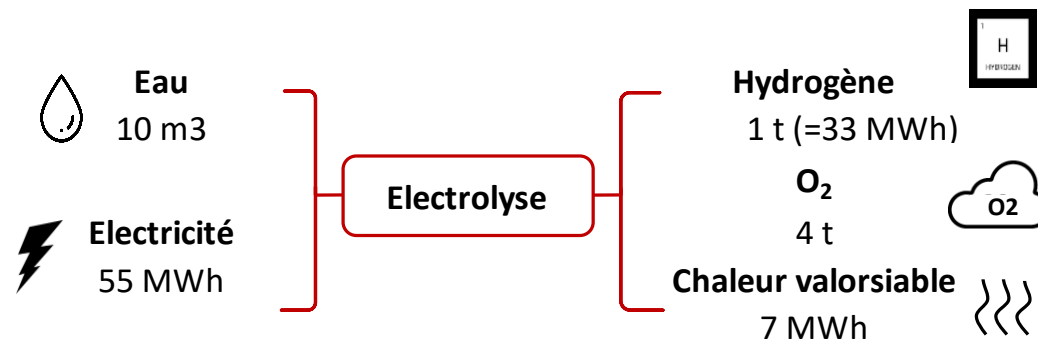


- **Principe:** décomposition de l'eau en dioxygène et dihydrogène grâce à un courant électrique

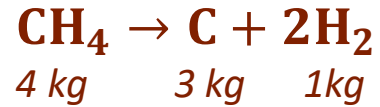


9 kg 8 kg 1kg

Electrolyseur	Alcalin	PEM	SOEC
TRL	9	8-9	7-8
Rendement actuel	59-67% (49-57 kWh/kg H ₂)	58-65% (55-60 kWh/kg H ₂)	81-83% (40 kWh/kg H ₂)
Rendement attendu 2050	70-80%	70-82%	>90%



- **Principe:** décomposition du méthane par l'apport de chaleur à haute température



Gaz naturel
58-70 MWh

méthane slip"?



Pyrolyse



Electricité
10-20 MWh

Hydrogène

1 t (=33 MWh)



Noir de carbone

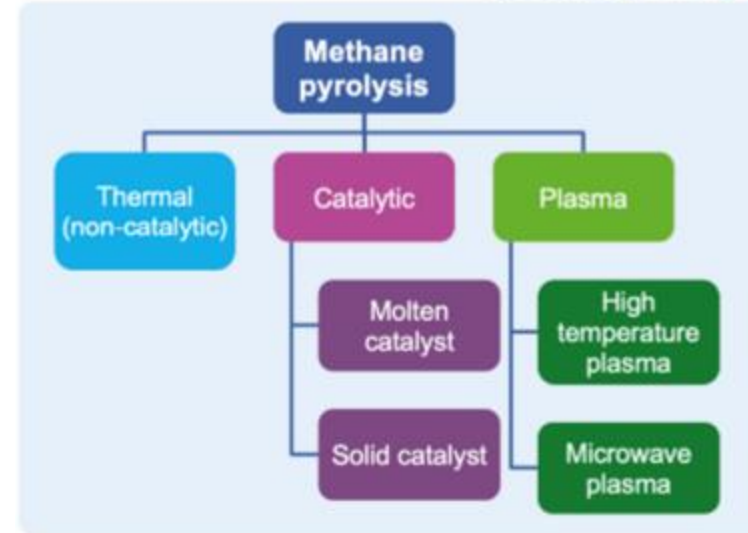
3 t



Chaleur valorsiable

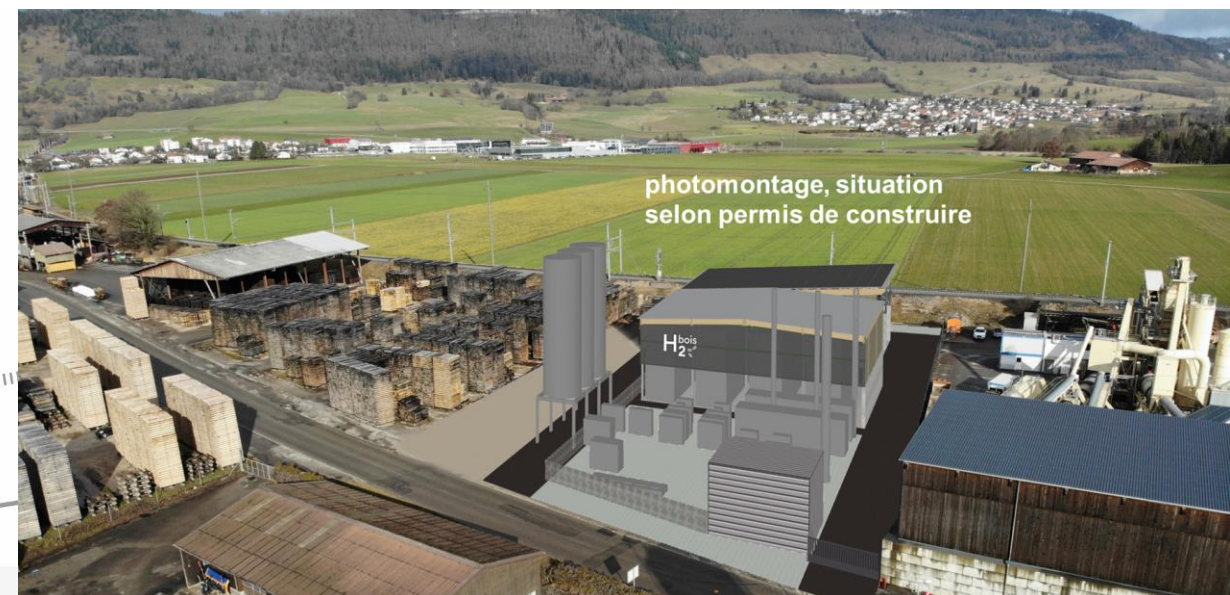
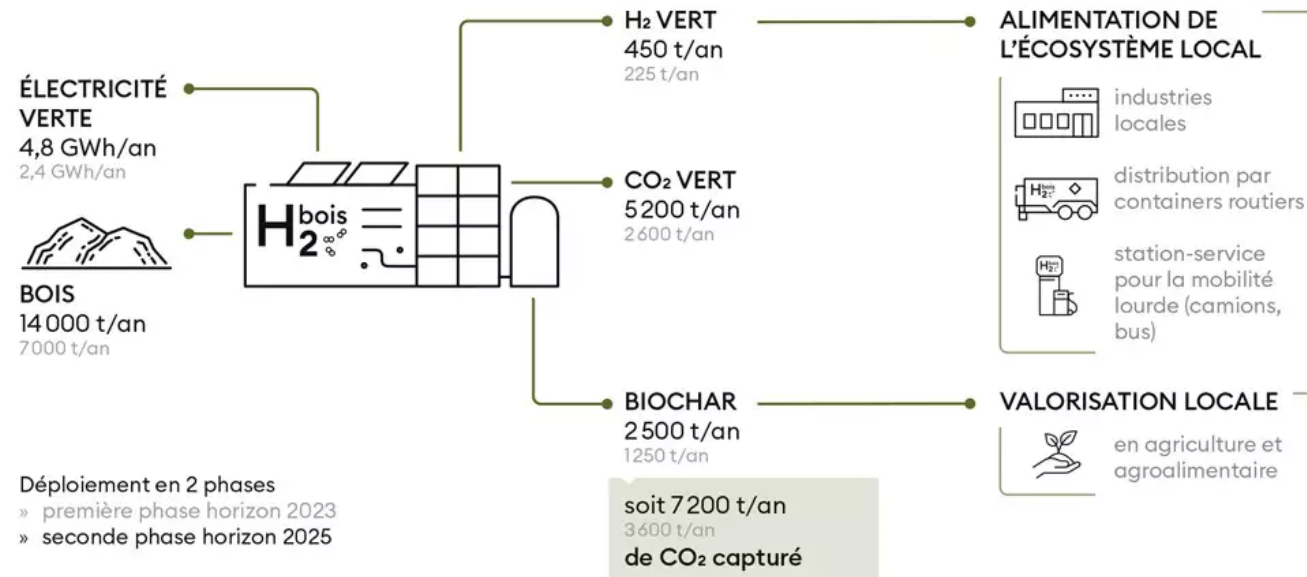
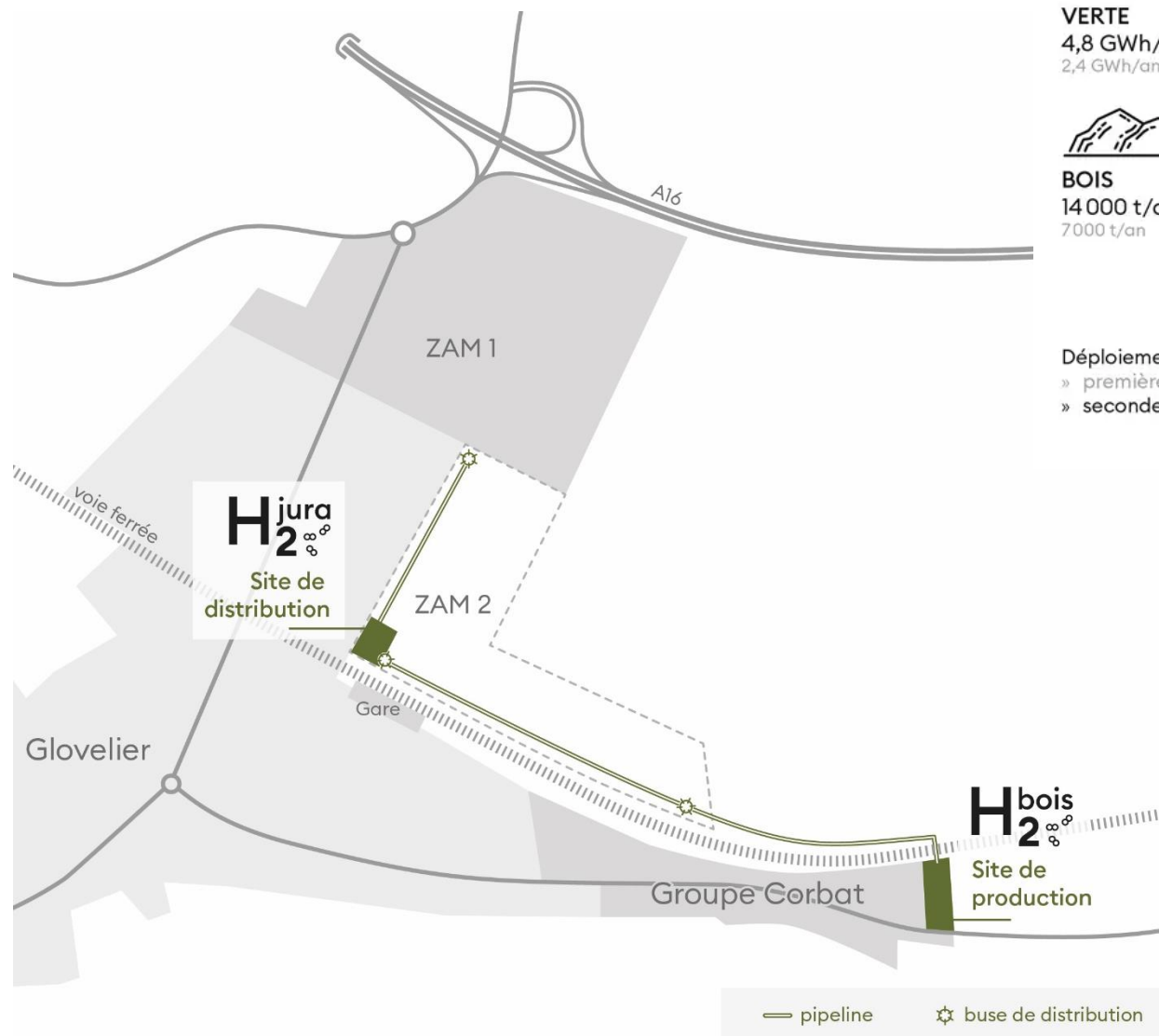
0- 5 MWh

IDTechEx Research



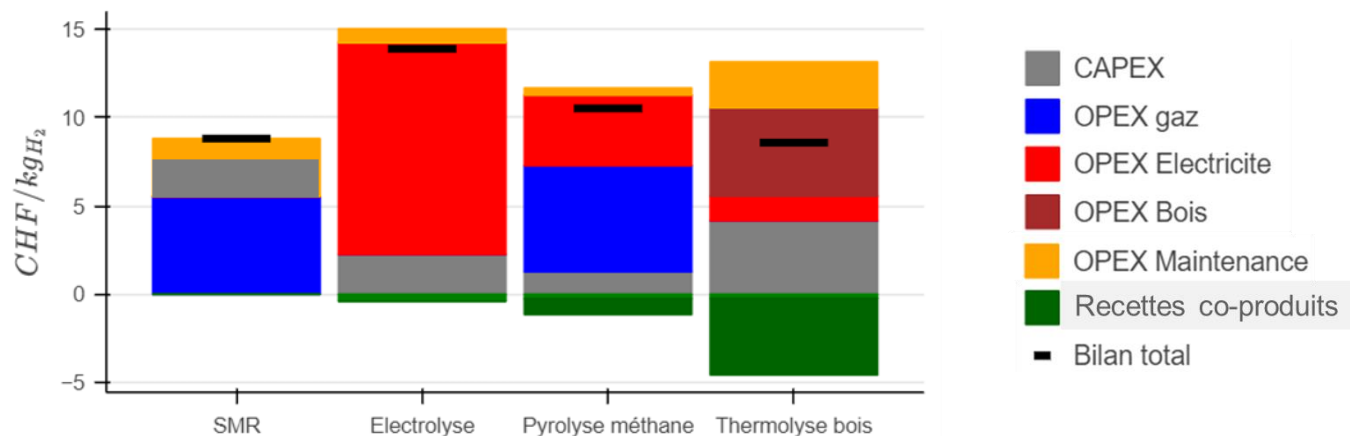
[Plasmalyser Graforce 0.5MW pour RAG Austria à Kremsmünster \(AT\)](#)

Exemple H2Bois

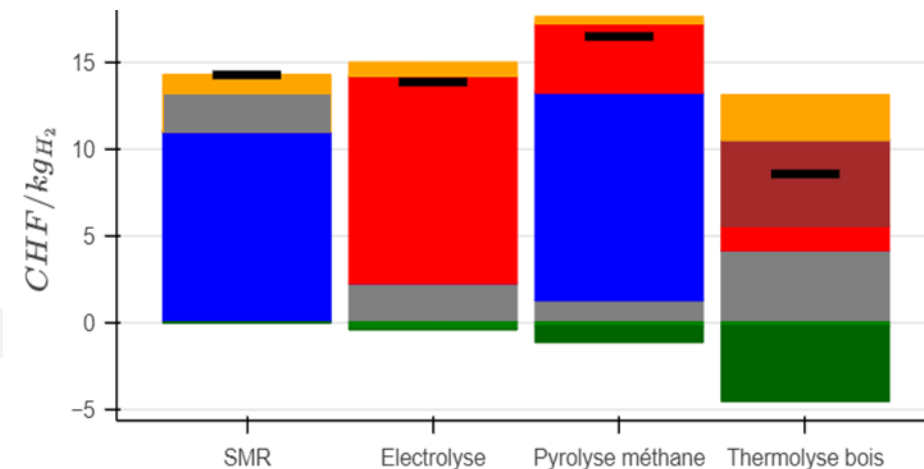


LCOH et Emissions CO₂ sur le site de production

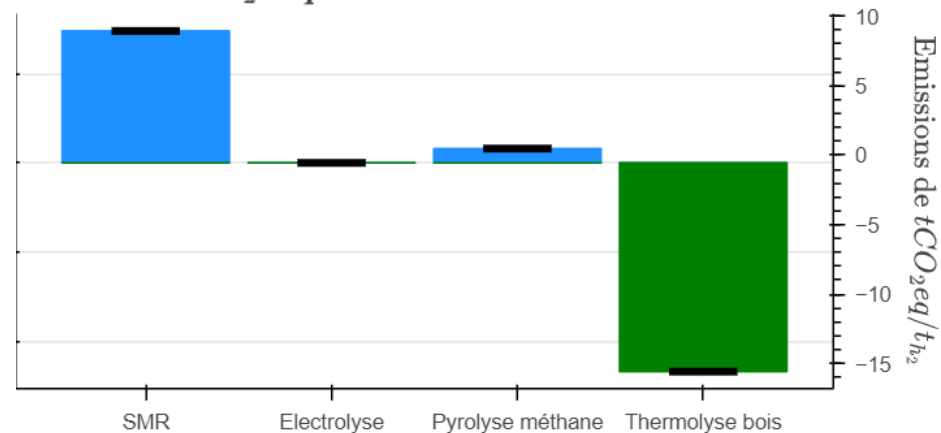
Avec gaz naturel



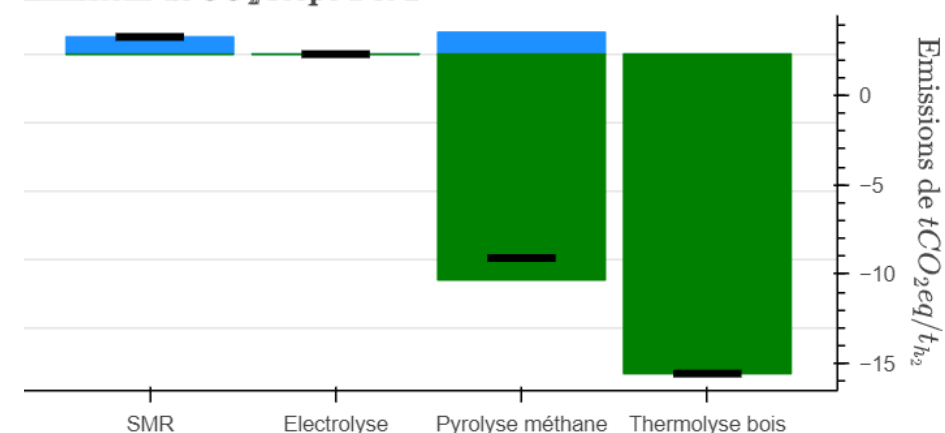
Avec biométhane



Émissions de CO₂ scope 1 et 2

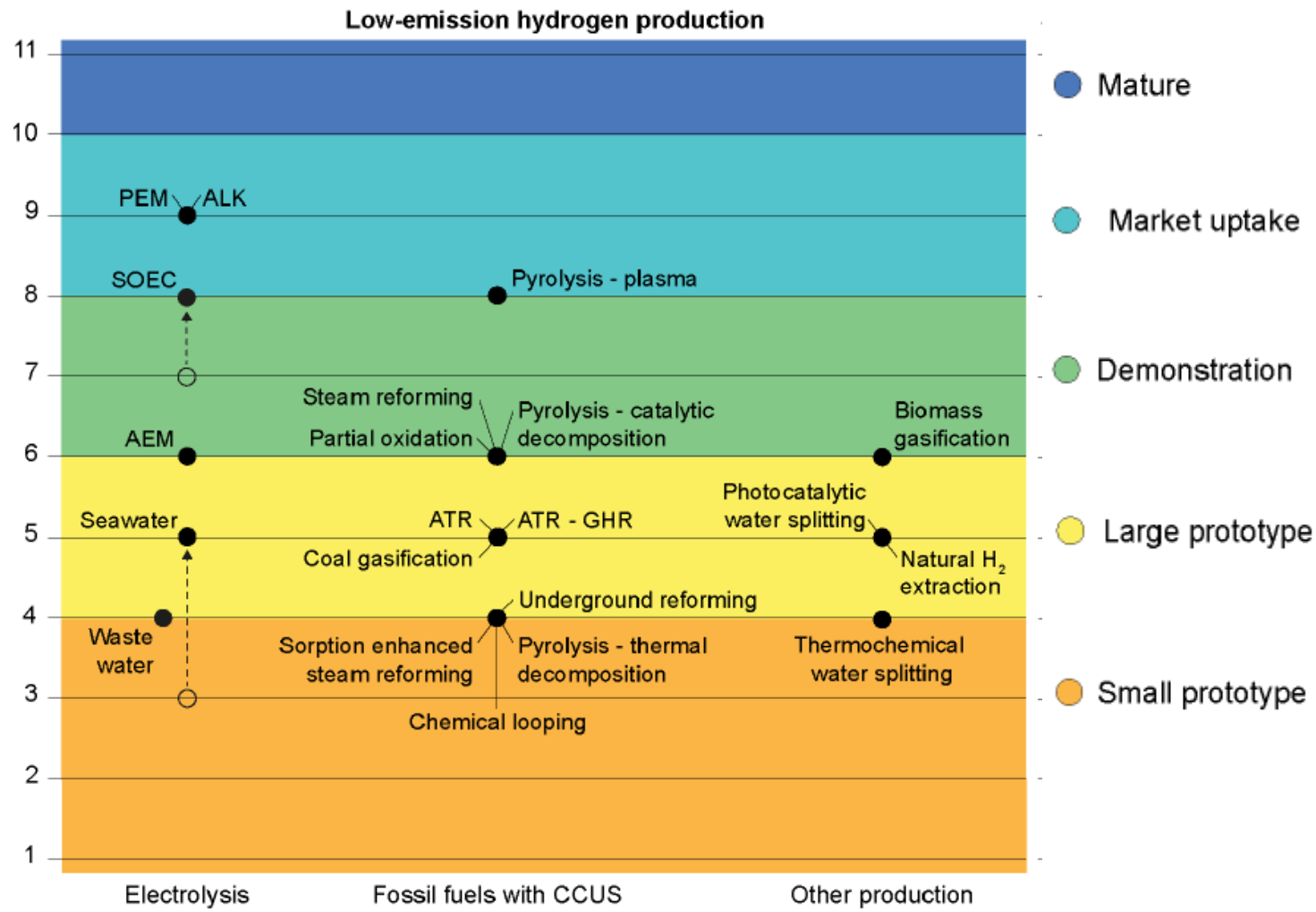


Émissions de CO₂ scope 1 et 2



Hypothèses : Prix Energies : Gaz: 10 cts/kWh, Biométhane: 20 cts/kWh, Electricité 20 ct/kWh (100% renouvelable) et Bois 5 ct/kWh

Recettes co-produits : Chaleur 5 ct/kWh, Noir carbone 300 CHF/t, biochar 500 CHF/t, certificats CO₂ 100 CHF/t



Procédés au stade R&D :

- Electrolyse eaux salées/eaux usées
- Photolyse de l'eau
- Thermolyse de l'eau
- Pyrolyse CH₄ catalytique ou thermique
- Pyrolyse déchets (ex. plastiques)
- Hydrogène blanc (naturel)
- ...

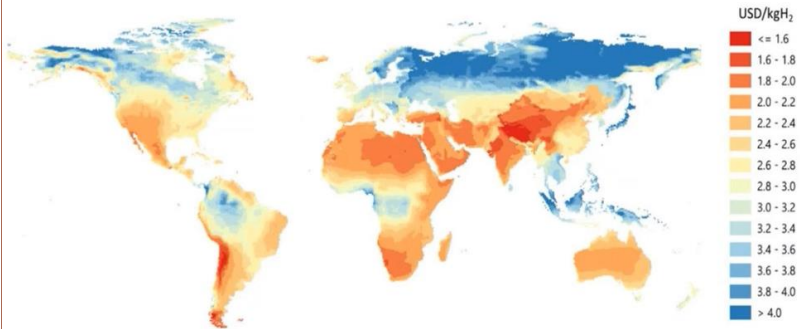


Source: SoHHytec (www.sohhytec.com)

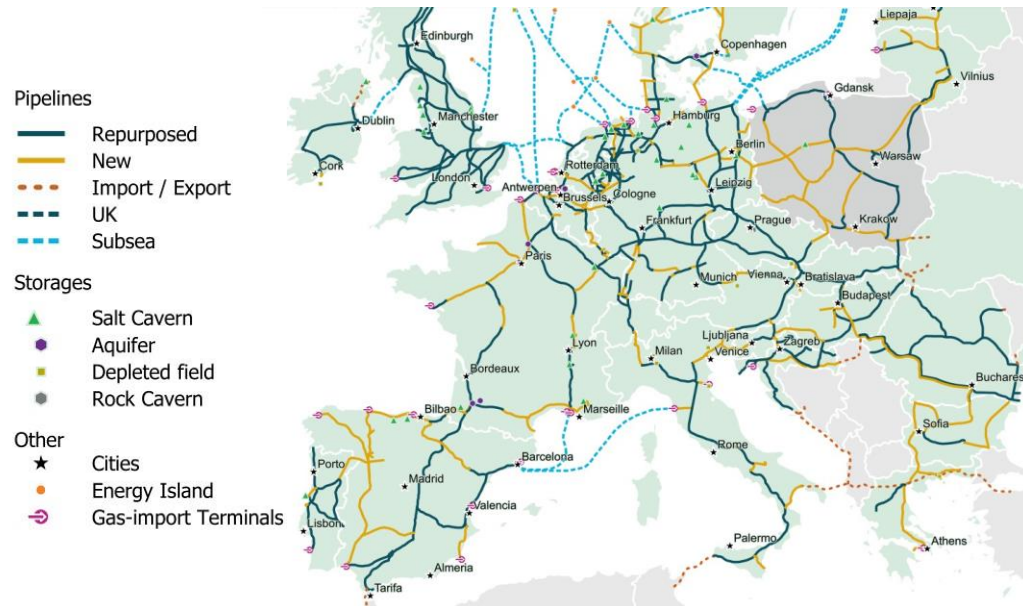
Source: IEA Global Hydrogen Review 2023

Hydrogène : disponibilité et prix

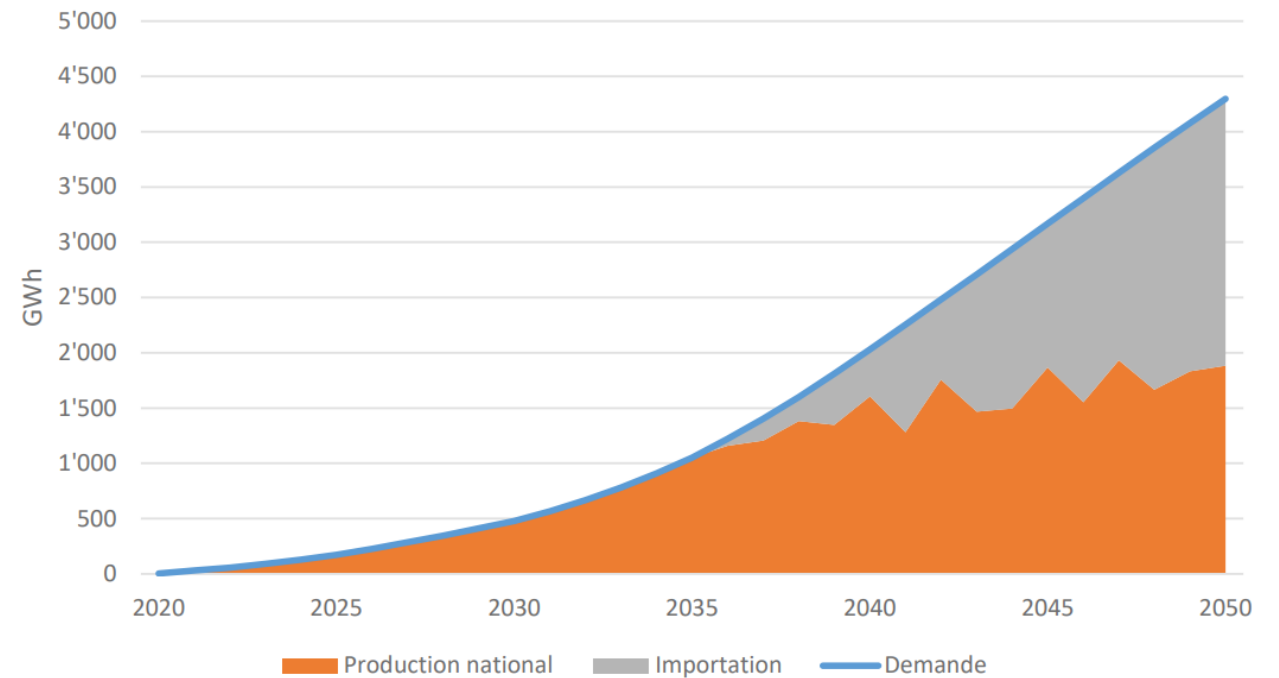
Hydrogen costs from hybrid solar PV and onshore wind systems in the long term



Projet European Hydrogen Backbone, année 2040)

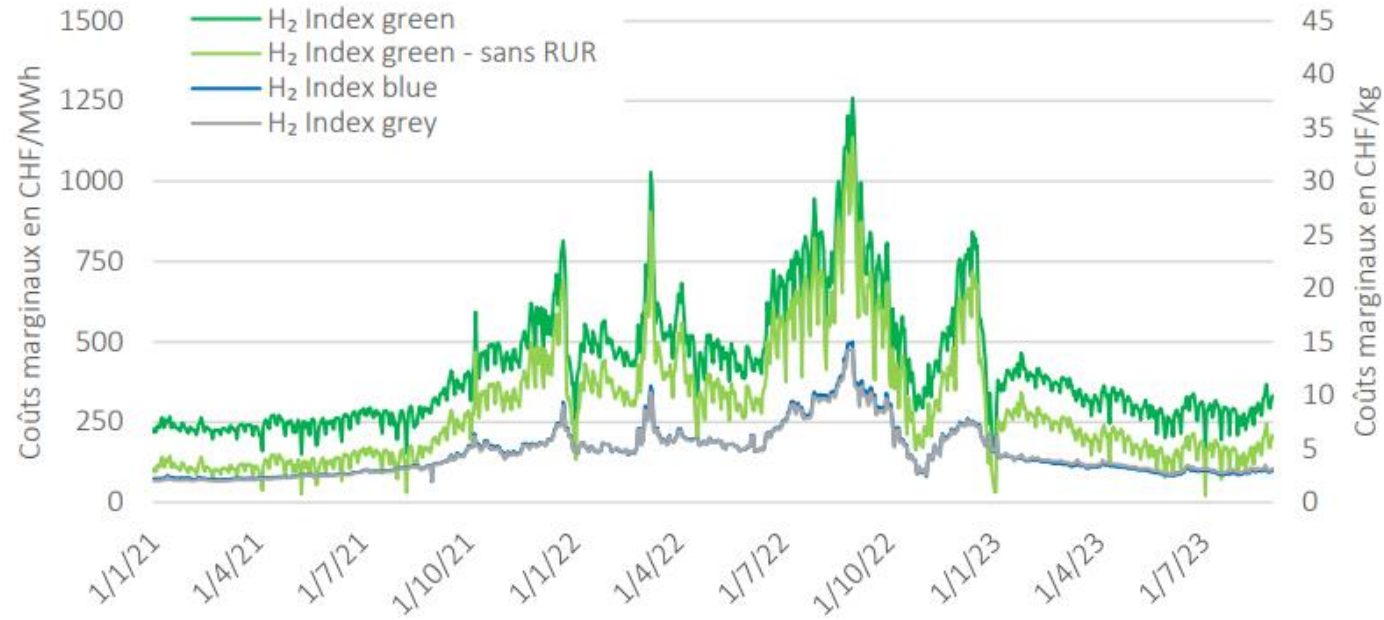


Évolution de l'hydrogène (PE2050+, ZÉRO base)

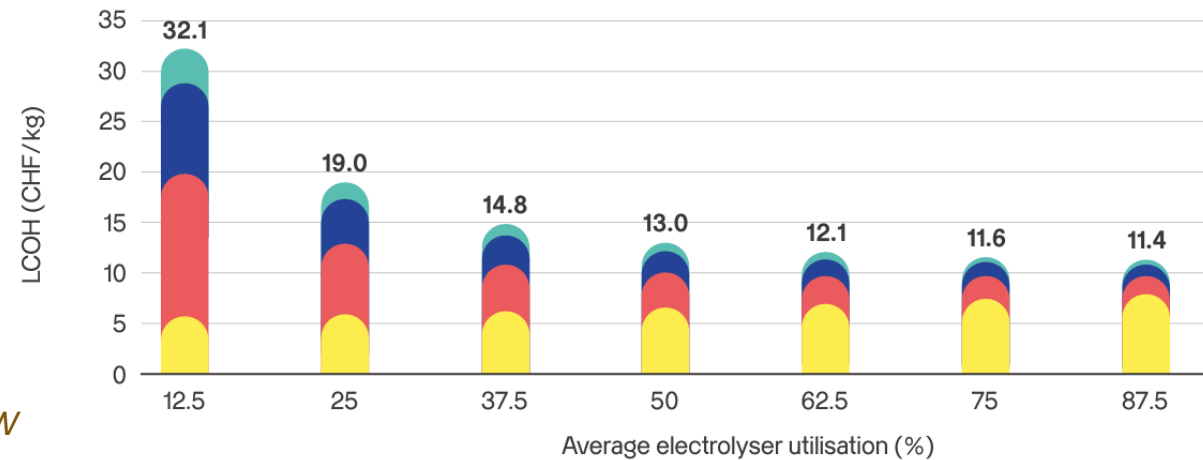
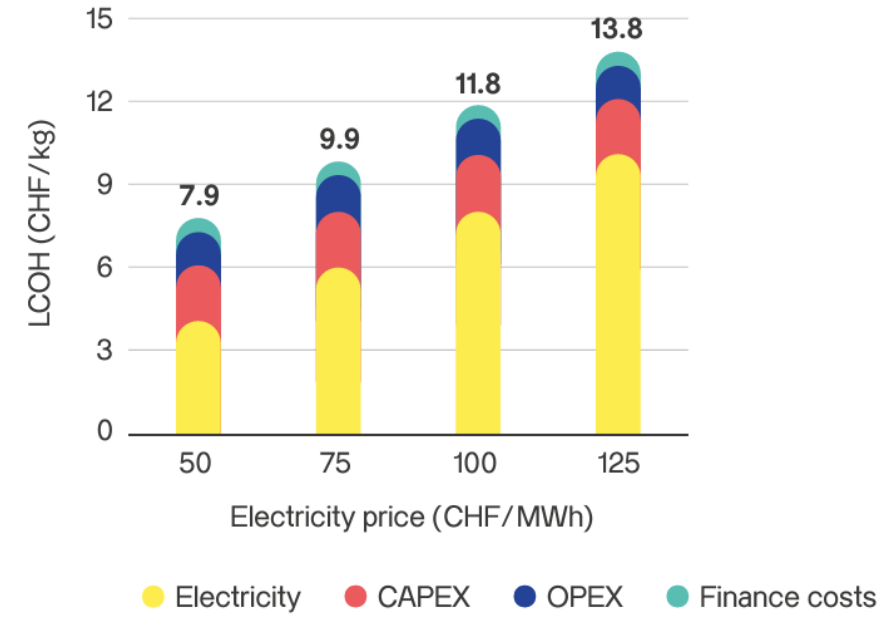


Évolution de la production et de la demande d'hydrogène en Suisse d'ici 2050 selon le scénario ZÉRO base des PE2050+ (Source: OFEN d'après Prognos et al., 2020)

Index H₂ 2021 - 2023

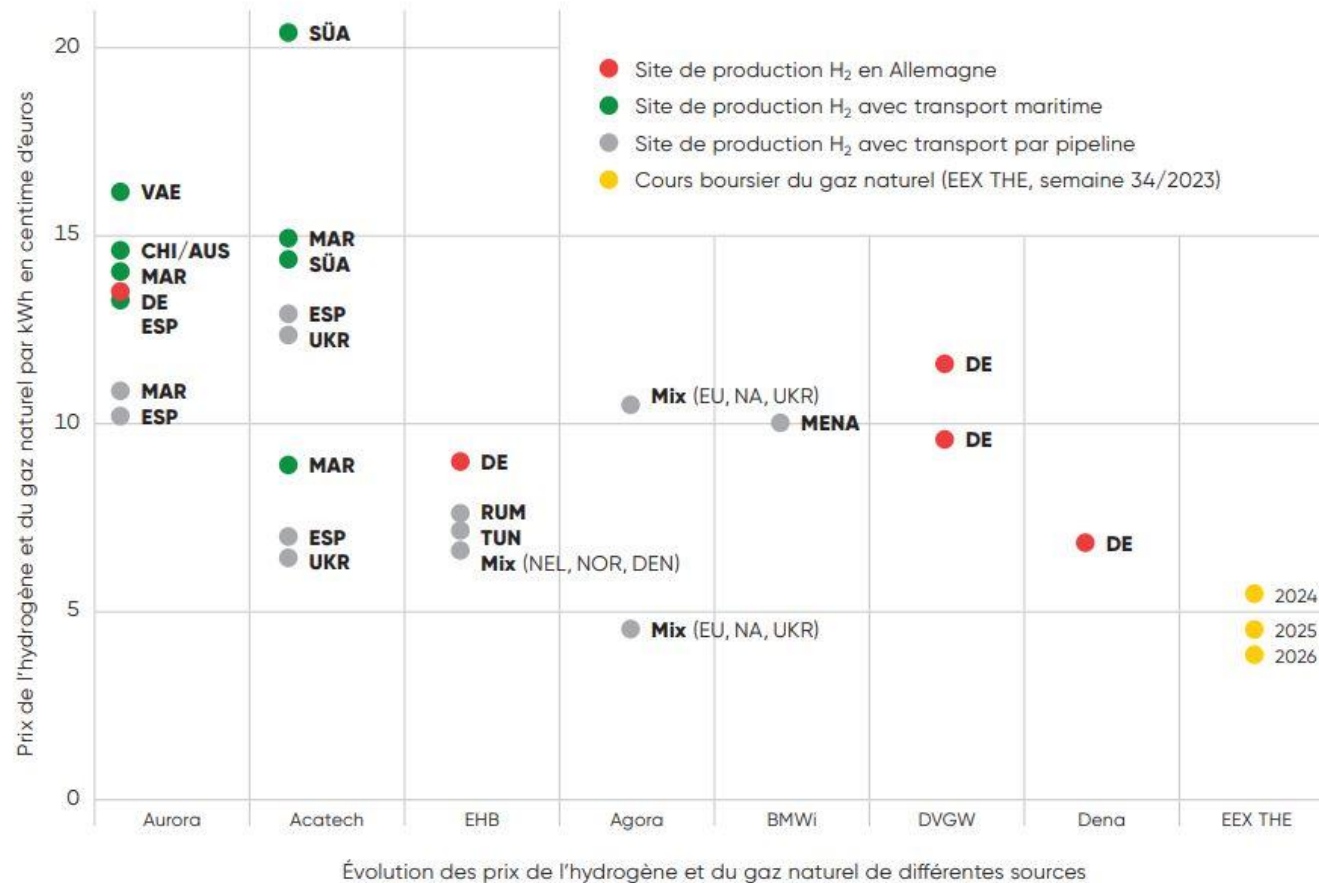


Source: Baromètre H2 Suisse, octobre 2023



Source: Axpo, électrolyseur 2.5 MW

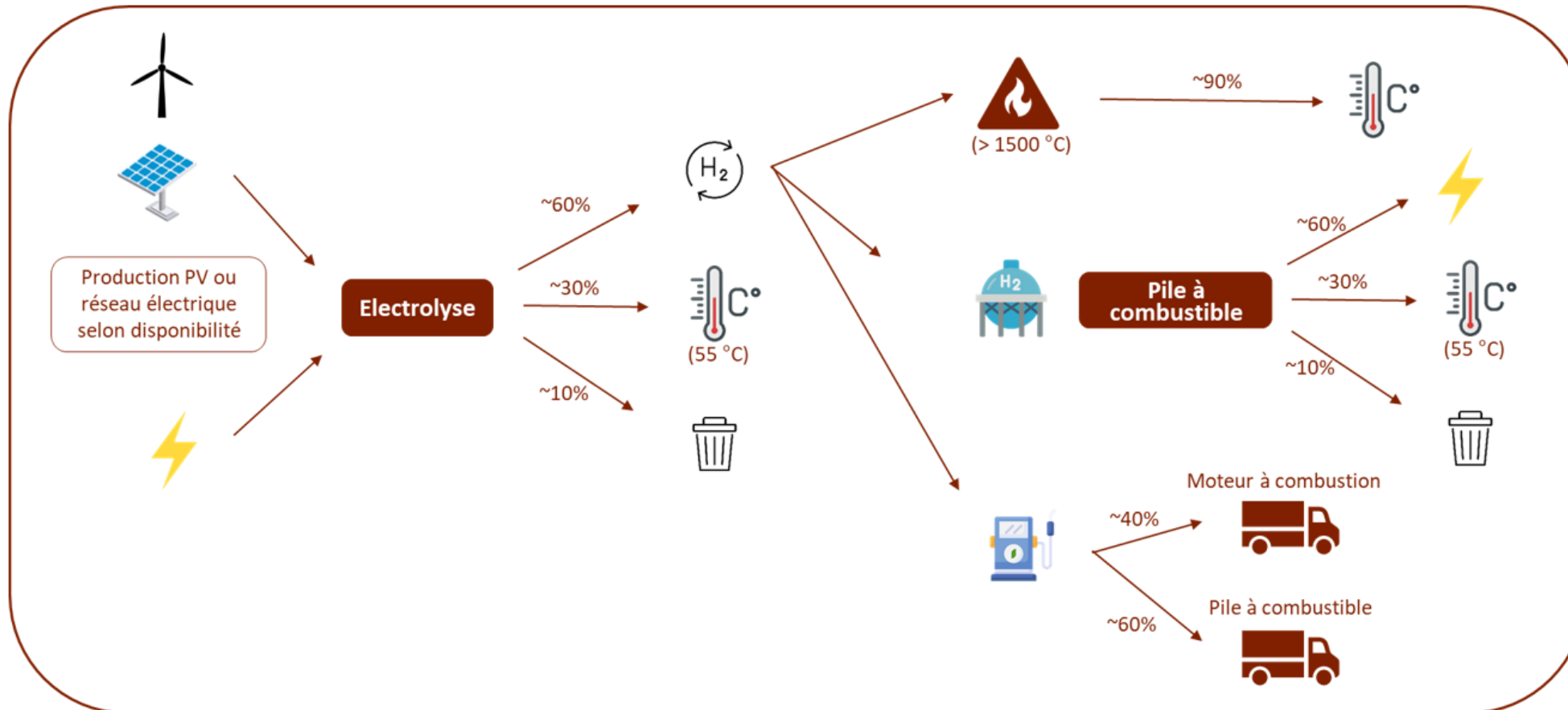
Coûts de fourniture d'hydrogène en 2030 selon le site de production



- En 2030, la demande de H₂ bas carbone se situera entre 90 et 160 TWh en Allemagne.
- Les coûts de fourniture d'hydrogène seront en partie comparables à ceux du gaz naturel
- L'importation d'hydrogène par pipeline sera considérée meilleurs marchés que par bateau
- Les coûts de productions de H₂ vert en Allemagne seront généralement inférieurs aux coûts d'importation par voie maritime.

Hydrogène : cas concret sur un site industriel

■ Chaine de l'hydrogène



Alternatives :

Chaleur HT

- Electrification process
- Biogaz

Production élec différée

- Achat réseau
- Stockage batterie

Carburant mobilité lourde

- Véhicules à batterie

Situation considérée	PV maximisé							
Prix de rachat de la production locale (cts/kWh)	5	5	5	5	5	5	5	5
Utilisation de l'énergie du réseau (fixée à 20 cts/kWh)	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Taille électrolyseur (kW)	400	1000	400	1000	400	1000	400	1000
Coût d'investissement de l'électrolyseur (CHF/kW)	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1000
Production annuelle (tonnes)	16	35	63	158	16	35	63	158
Coût de revient de l'H2 (CHF/kg)	7.3	7.9	11.0	11.3	5.1	5.4	10.4	10.7
Part du besoin de chaleur HT [%]	4,5	10	19	47	4,5	10	19	47
Nombre de pleins de camion	450	1000	1800	4500	450	1000	1800	4500

- Utilisation directe comme combustible ne fait pas de sens (rendement 54%)
- Utilisation comme carburant fait sens si :
 - Baisse prix électrolyseurs
 - Maintien prix diesel et baisse forte du tarif rachat électricité
- Stockage saisonnier : investissement trop élevé (> 3mio CHF pour 6 t H2)

- Aujourd'hui, la production H_2 à partir de combustibles fossiles entraîne fortes émissions de CO_2
- H_2 vert est essentiel pour atteindre l'objectif Net Zéro 2050, en particulier pour décarboner les secteurs difficiles à électrifier
- Production H_2 vert reste actuellement coûteuse (en énergie et en CAPEX) rendant ce vecteur énergétique encore difficilement concurrentiel par rapport aux fossiles
- Une baisse des coûts de production et le développement de l'infrastructure pourrait rendre un plus grand nombre d'applications économiquement intéressantes
- Stockage : technologie disponible ne permet pas encore un stockage long terme à des prix raisonnables

Merci pour votre attention

Juliana Leon

Responsable pôle gaz renouvelable



Contact : juliana.leon@planair.ch

