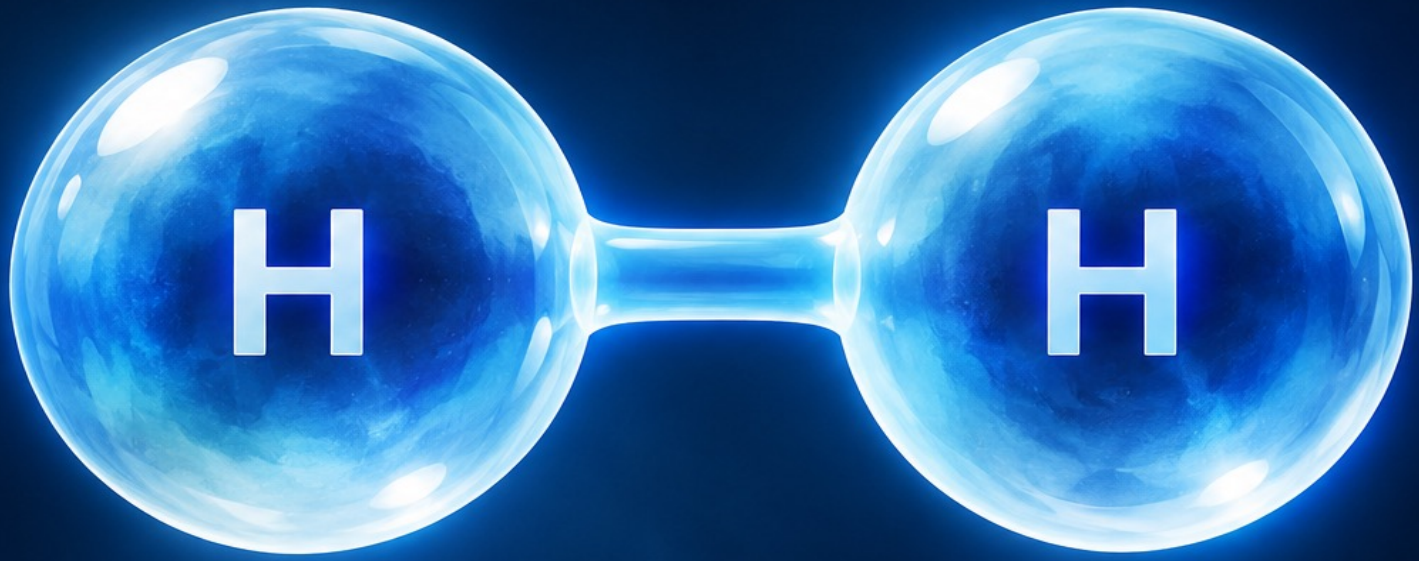
L’hydrogène:



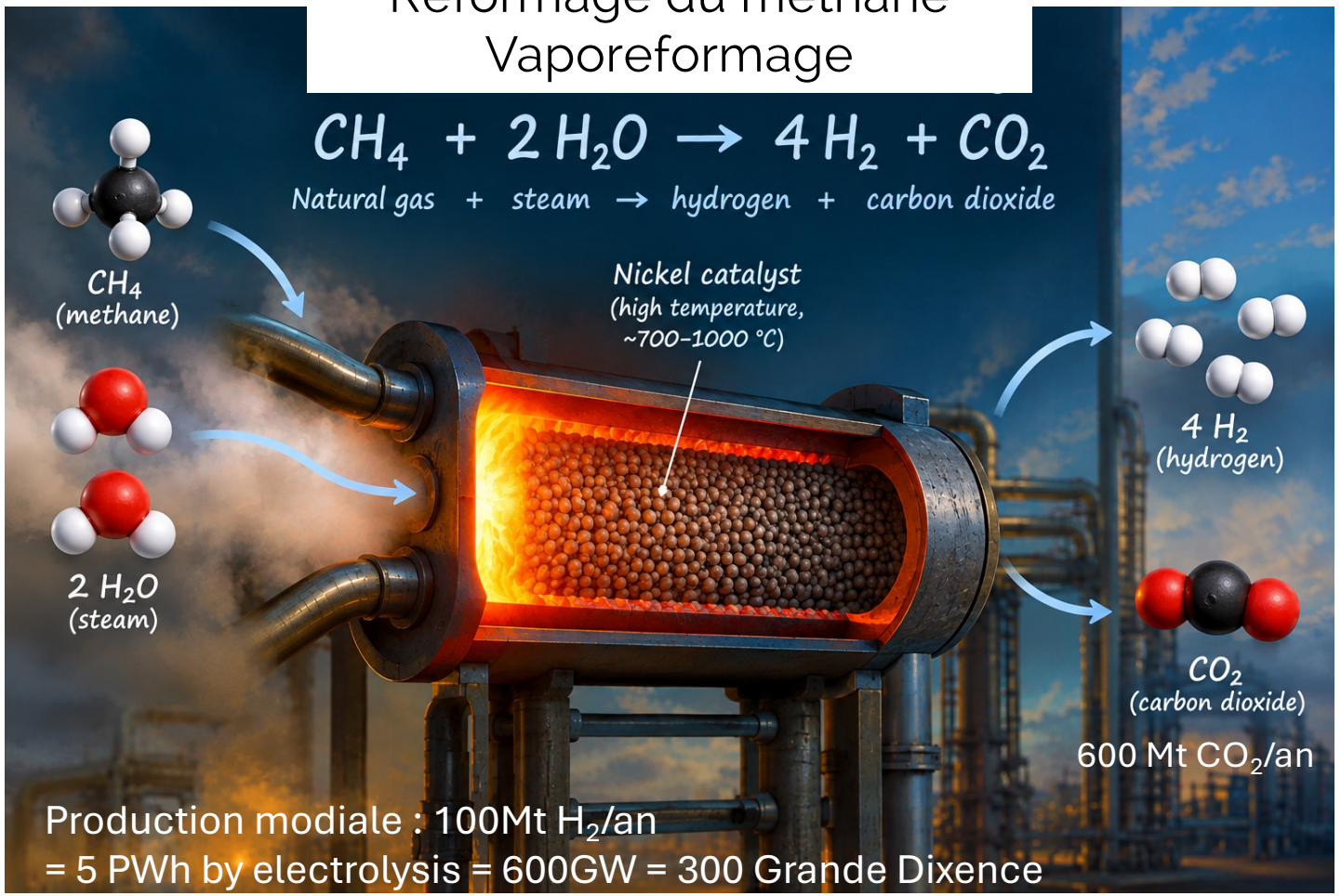
Pourquoi et Comment?

H.H. Girault

Société Vaudoise des Sciences Naturelles

L'hydrogène aujourd'hui

Reformage du méthane
Vaporeformage



TotalEnergies

Hydrogénation
Raffinage
500kt/y

Biofuels

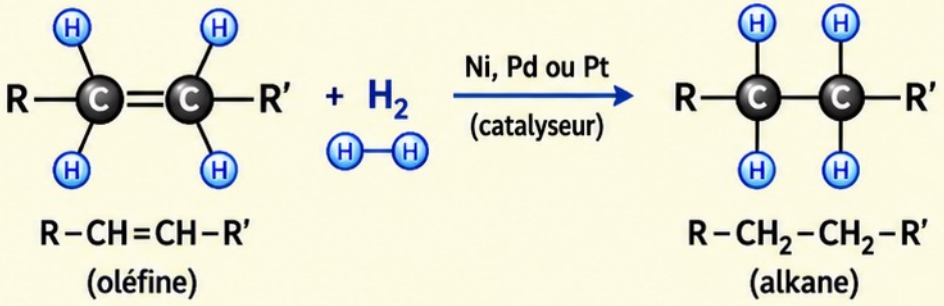
Pourquoi faire ?

L'hydrogénation dans le raffinage du pétrole

Hydrogène + Catalyseur = Carburants plus propres • Élimination des impuretés • Meilleure qualité

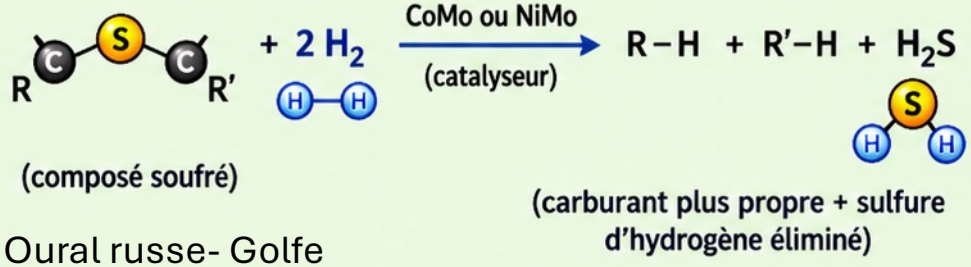
1. Saturation des oléfines (hydrogénation de l'oléfine)

Élimine les doubles liaisons et augmente la stabilité.



2. Hydrodésulfuration (désulfurisation, dénitruration, désoxygénation)

Élimine le S, le N, l'O ou les composés et sature les oléfines.

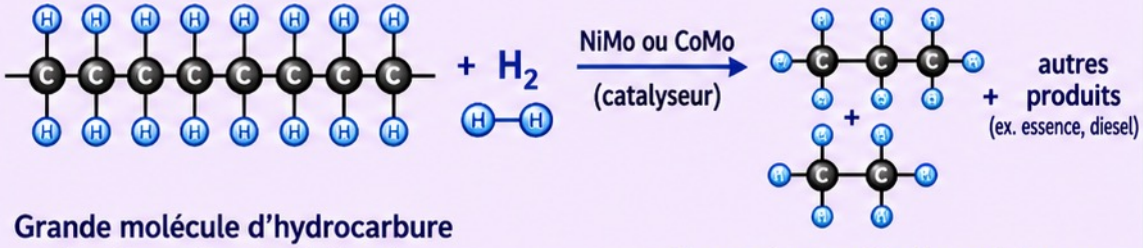


Oural russe- Golfe

3. Craquage catalytique

Casse les grosses molécules en plus petites, précieuses en utilisant l'hydrogène.

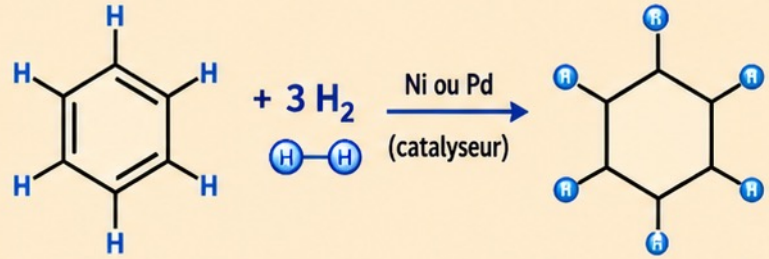
Diesel Kérosène Naphta



Vénézuela Canada

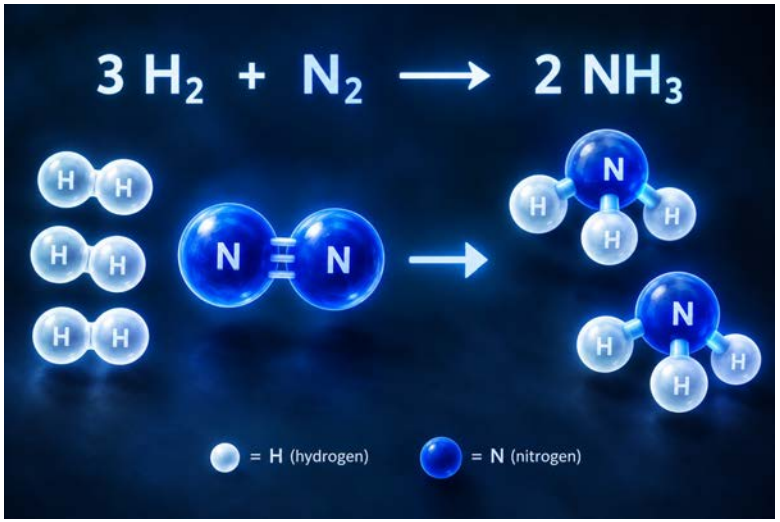
4. Aromatisation

Sature les anneaux aromatiques, réduit le contenu aromatique.



Les 3 besoins fondamentaux en hydrogène vert

Ammoniac



Procédé Haber-Bosch
400-500°C 150-350 bars
Catalyseur Fe

CASALE

Nourrir l'humanité..

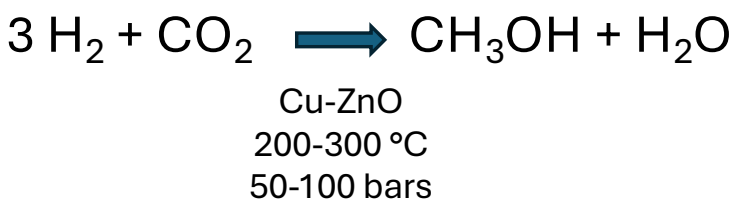
Engrais azotés:
Urée $2\,NH_3 + CO_2 \rightarrow CO(NH_2)_2 + H_2O$
Nitrate d'ammonium
Sulfate d'ammonium
Phosphate diammonique



Les 3 besoins fondamentaux en hydrogène vert

Remplacer la pétrochimie
Recyclage du carbone

Synthèse du méthanol (alcool de bois) : molécule universelle

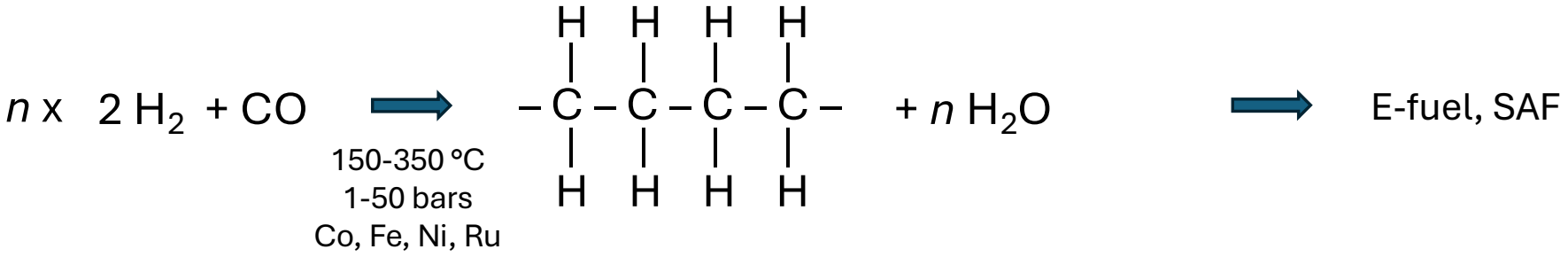


→ Oléfines (C=C): Plastique, fibres, …

→ Formaldéhyde : adhésifs, peintures,…

→ Carburant marin

Procédé : Fischer-Tropsch (1926)



→ E-fuel, SAF

Les 3 besoins fondamentaux en hydrogène vert

Acier vert

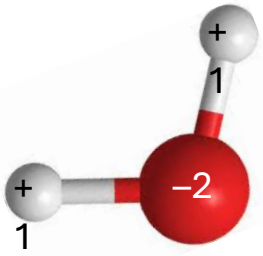


Four à arc électrique
Réduction directe par l’hydrogène

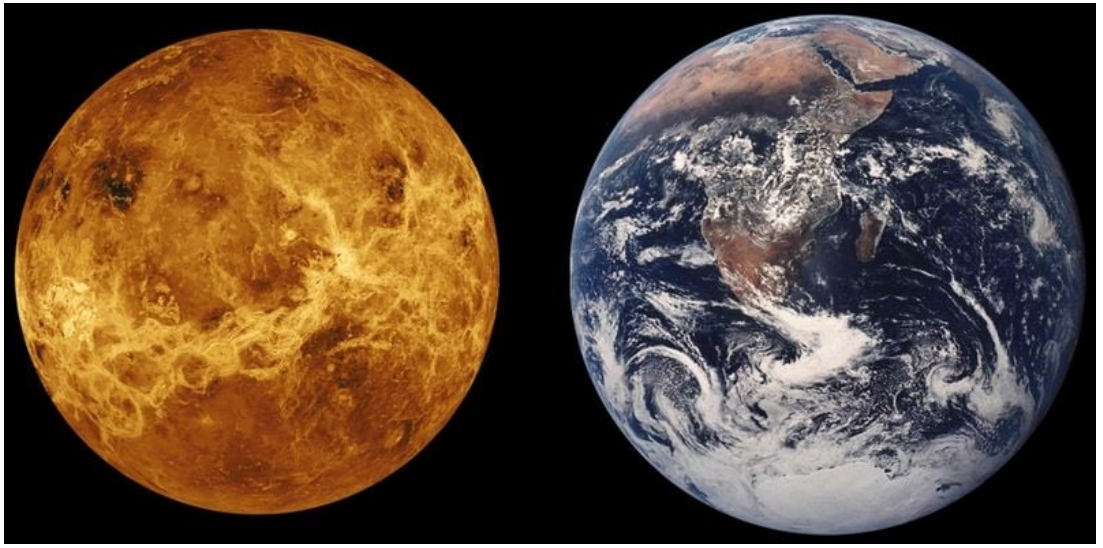
Atmosphère terrestre

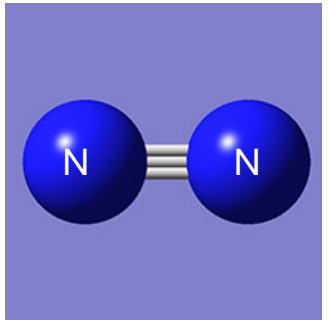
Avant la vie, 4.5 milliards d'années:
80 % H_2O
10 % CO_2
+ N_2, NH_3, CH_4,...

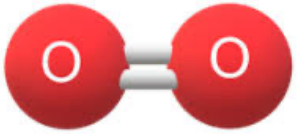
En 1900
78 % N_2
21 % O_2
+ 280 ppm CO_2 ,...











Peu d'hydrogène est resté sur terre ?

L'atmosphère

Avec le refroidissement, l'eau s'est condensée pour former des océans solubilisant une partie du CO_2 qui a été piégé sous forme de carbonates par précipitation chimique.
Suite à l'apparition de la vie sur terre (– 4 milliards d'années) , la précipitation biologique des carbonates a continué à piéger le CO_2 (archéobactéries). Origine marine du Jura.

A environ 2.7 milliards d'années, les cyanobactéries ont utilisé l'énergie solaire pour transformer le CO_2 et l'eau en matière organique et ainsi produire de l'oxygène. Une partie a été piégée par les métaux pour former les minerais et l'autre a été piégée par gravité dans l'atmosphère.

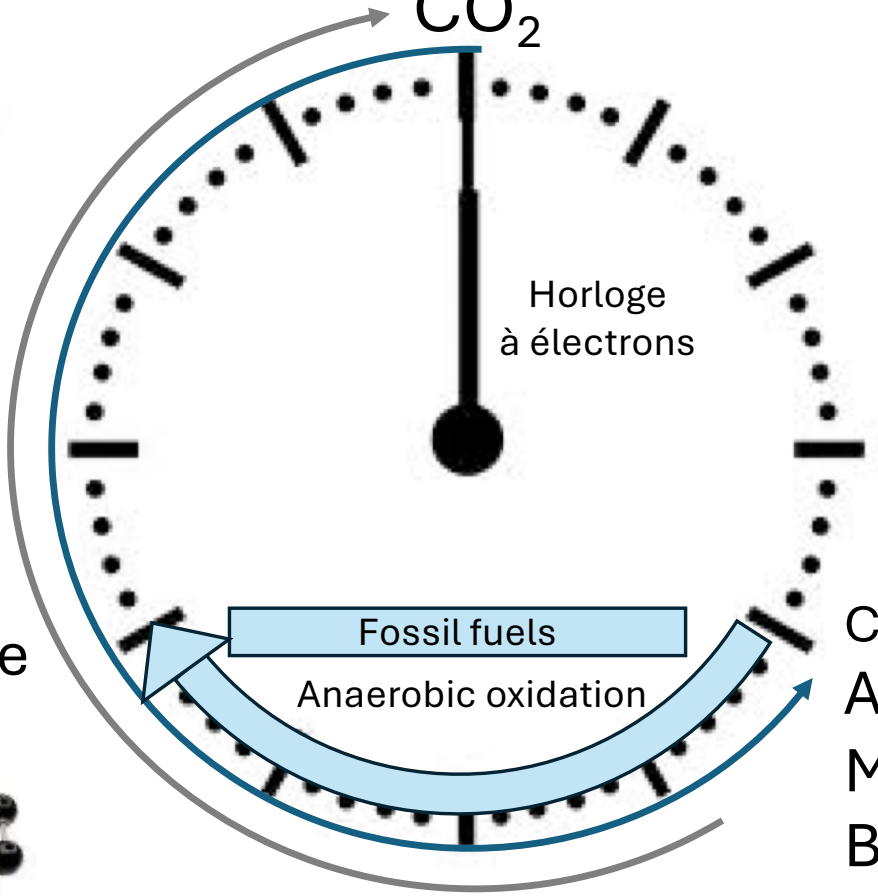
Le carbone fossile a été produit par la décomposition d'organismes vivants.

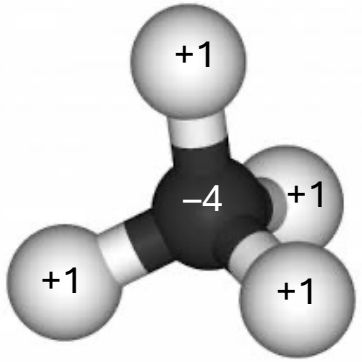
Le cycle du carbone

Piégage pH
Carbonates



Combustion
des énergies
fossiles





Photosynthèse



$CO_2 + 2\ H_2O \rightarrow CH_4 + 2\ O_2$

Autotrophs- Cyanobacteria

Méthane

Biomasse

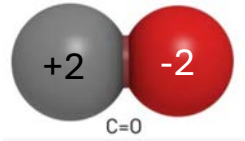
Carbone solide



e-Méthanol : Stockage à 6 électroms

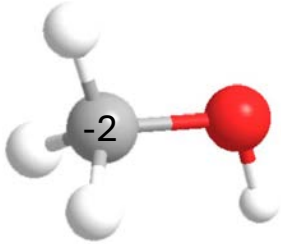
SOEC - Reverse water gas shift $H_2 + CO_2 \longrightarrow CO + H_2O$

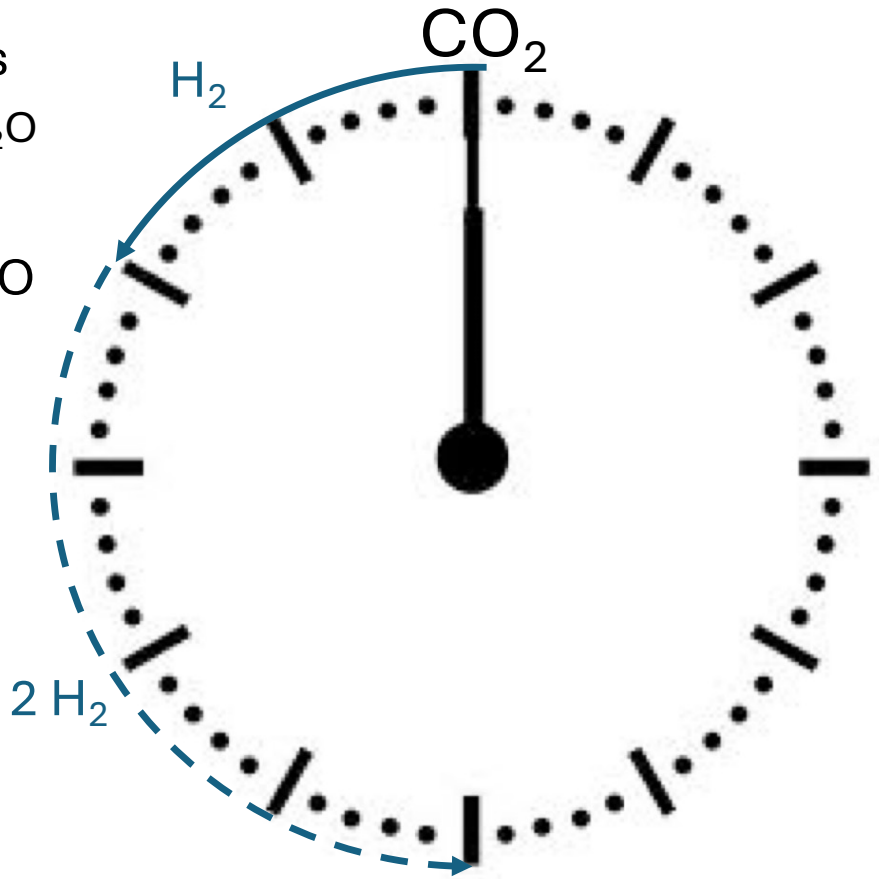
Monoxyde de carbone- CO



Hydrogenation du CO

$CO + 2\,H_2 \longrightarrow CH_3OH$





Méthanol – CH_3OH

SAF -

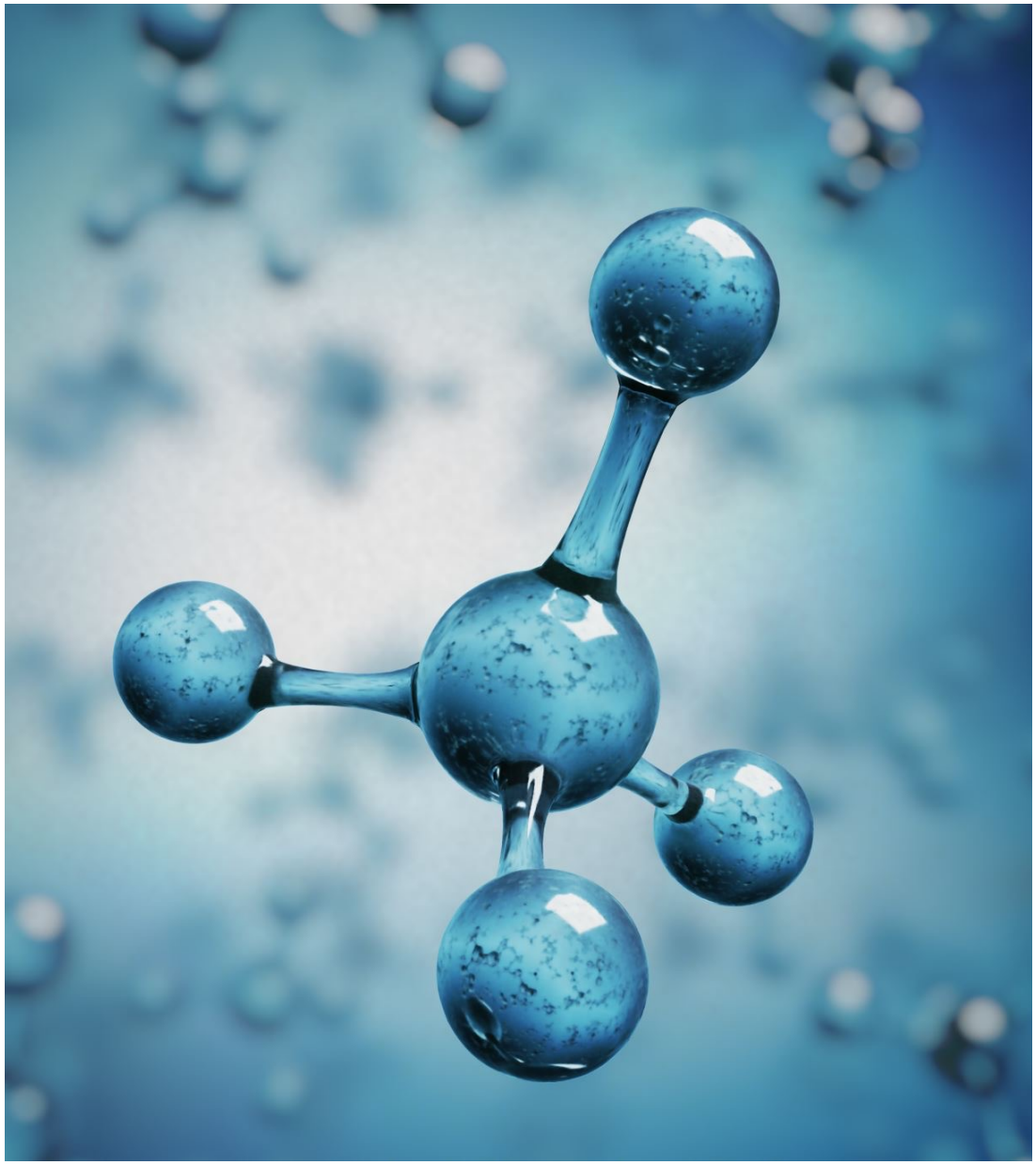
COP28 UAE

MAERSK

CMA CGM

Hapag-Lloyd

msc



Combustibles chimiques

- Les combustibles sont des molecules riches en électrons, oxydables en générant de la chaleur.

- La combustion est une reaction rédox

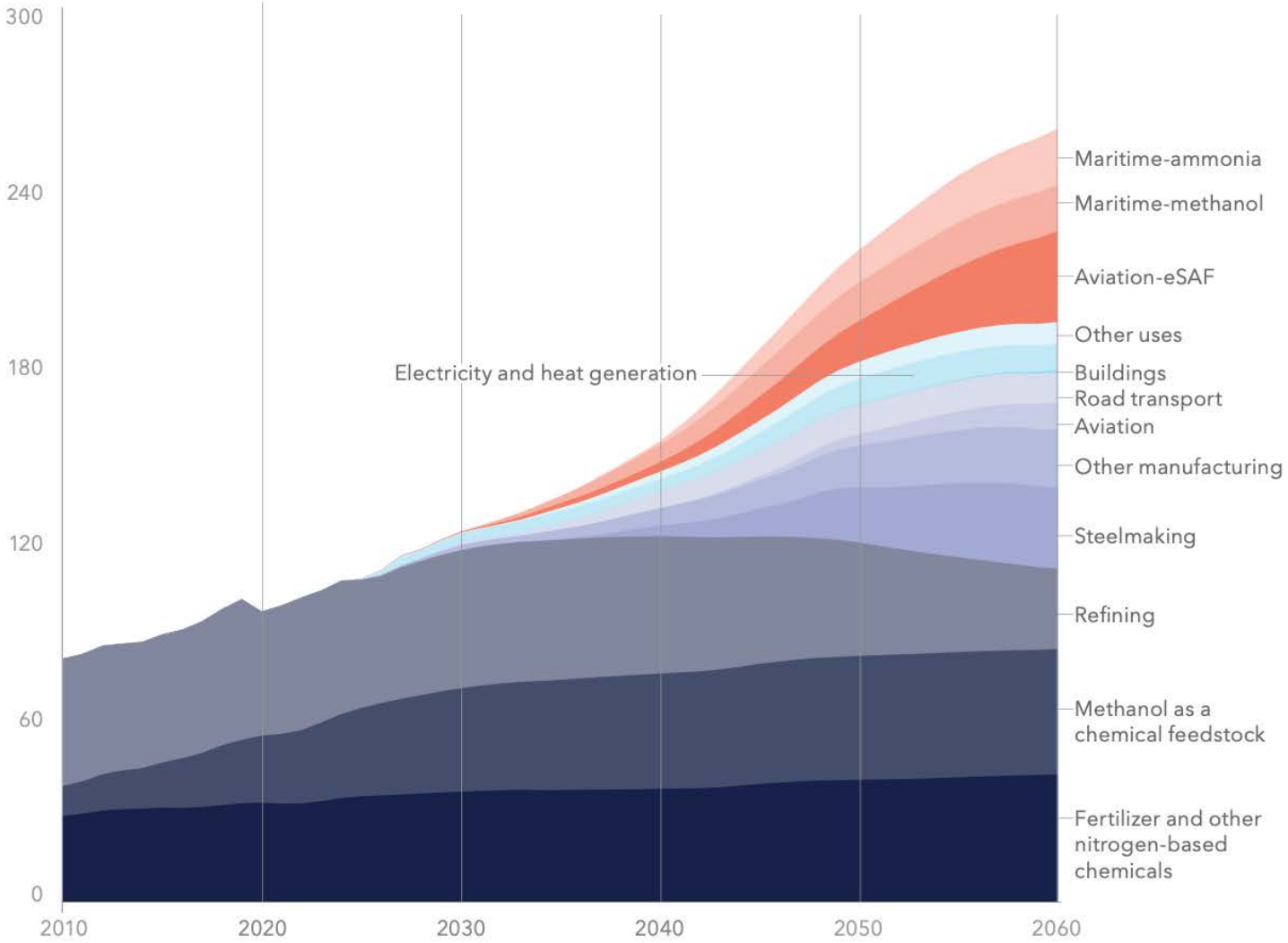
- L'hydrogène est la porte d'entrée pour les e-combustibles, NH_3, CH_3OH, SAF,…

L'hydrogène est un transporteur et donneur d'électrons

Global hydrogen demand

(Mt/yr)

The market for clean hydrogen will attract over USD 3trn in investment over the next three decades.



New derivatives in transport

New hydrogen use

Legacy sectors

DNV

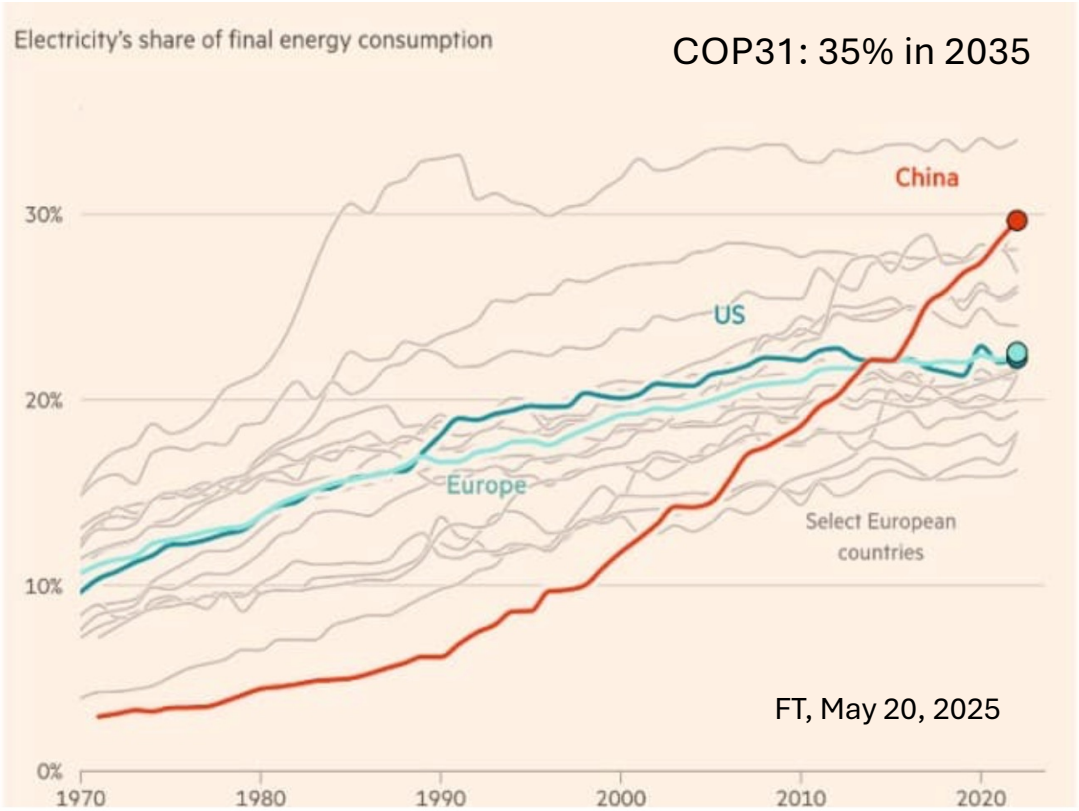
WHEN TRUST MATTERS

Det Norske Veritas

ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2026

A global and regional forecast to 2060

Electrification : Le challenge du XXIème siècle



Challenges:

Stockage des énergies renouvelables

Alimenter les centres de données IA

Alimenter les humanoïdes

•China leads the world in electrification, with a 30% electrification rate—far ahead of the U.S. and EU at ~22%—dominating sectors like transport and industry.

Electrochimie et la gestion des énergies renouvelables

Energies renouvelables



Solaire (20%)



Eolien (35%)

Challenge de l'intermittence

Synchroniser la production et la demande

Diminuer le "curtailment"

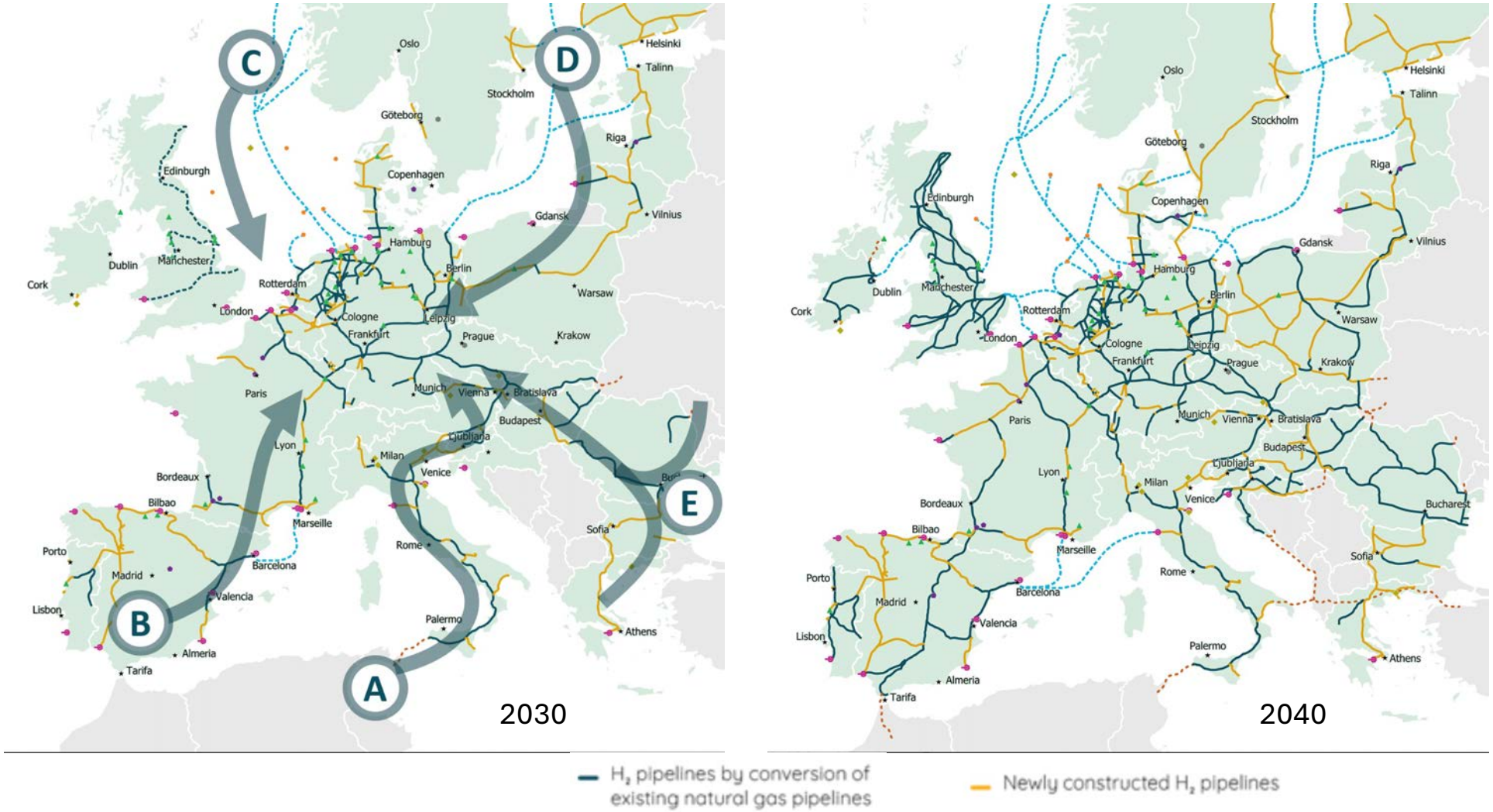
Stockage d'électrons

Condensateurs
Batteries (90%)
Hydrogène (30%)
E-Fuels (15%)

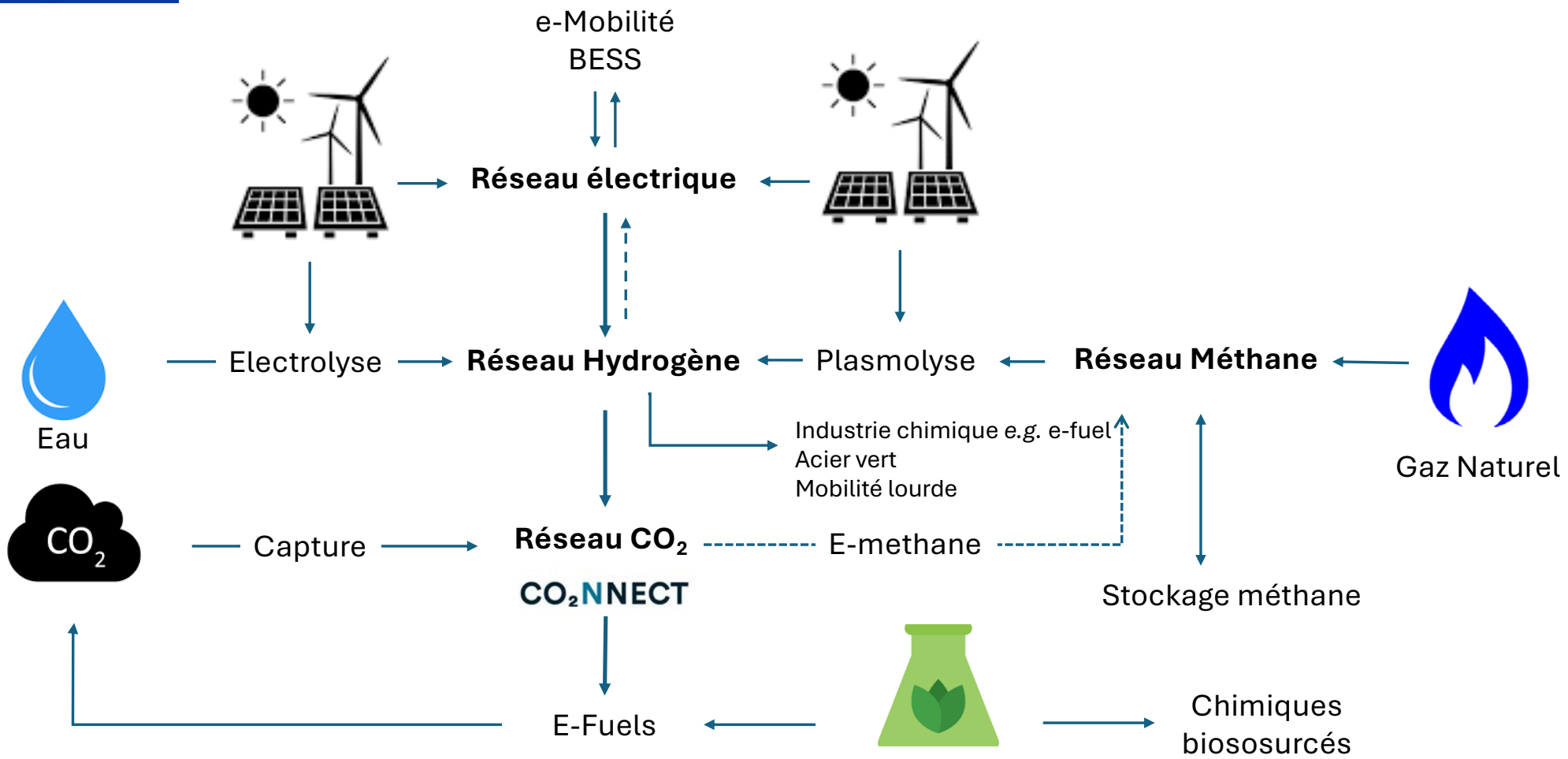
Transport d'électrons

Cables Cu/Al
Hydrogène
E-fuels

Réseau Hydrogène Européen



Réseau triple : Electrons – H2 – CO2



Conclusion

Besoin d’une production massive d’électricité

Besoin de produire de l’hydrogène vert pour le transport longue distance et le stockage moléculaire



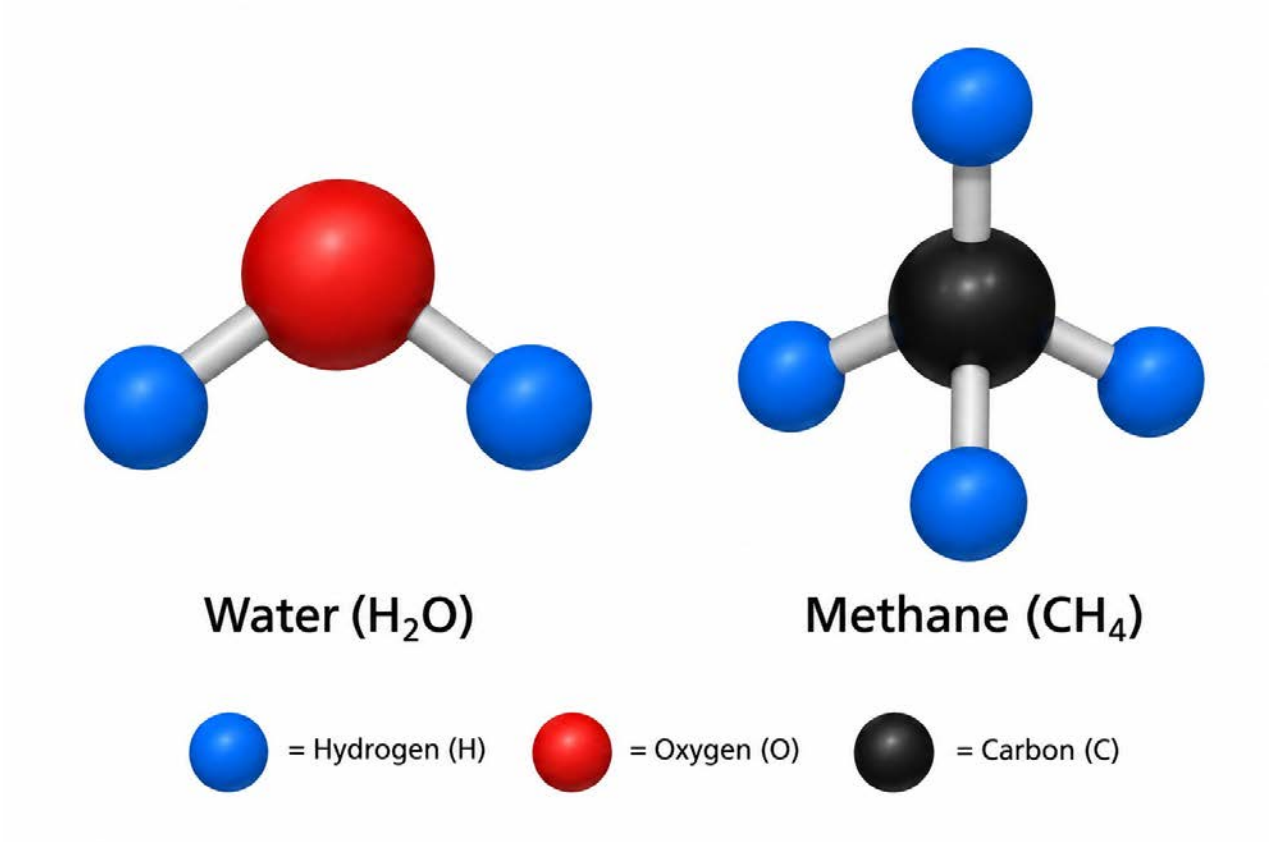
Priorité du XVème plan quinquennal Chinois avec la fusion nucléaire, l’ordinateur quantique et l’IA

Average annual R&D expenditure growth (7 %)

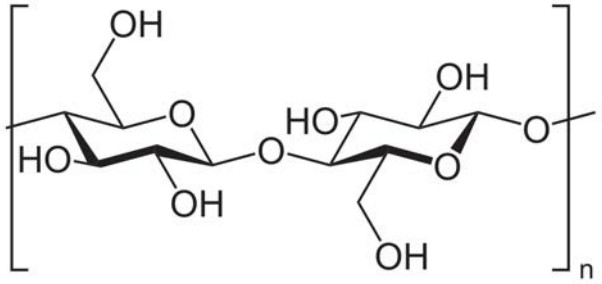
Reduction in CO_2 emissions per unit of GDP in 2030 (–17%)

Comment faire ?

Où trouver des atomes d'hydrogène?



11% en masse



Cellulose ($C_6H_{10}O_5$)

25 % en masse

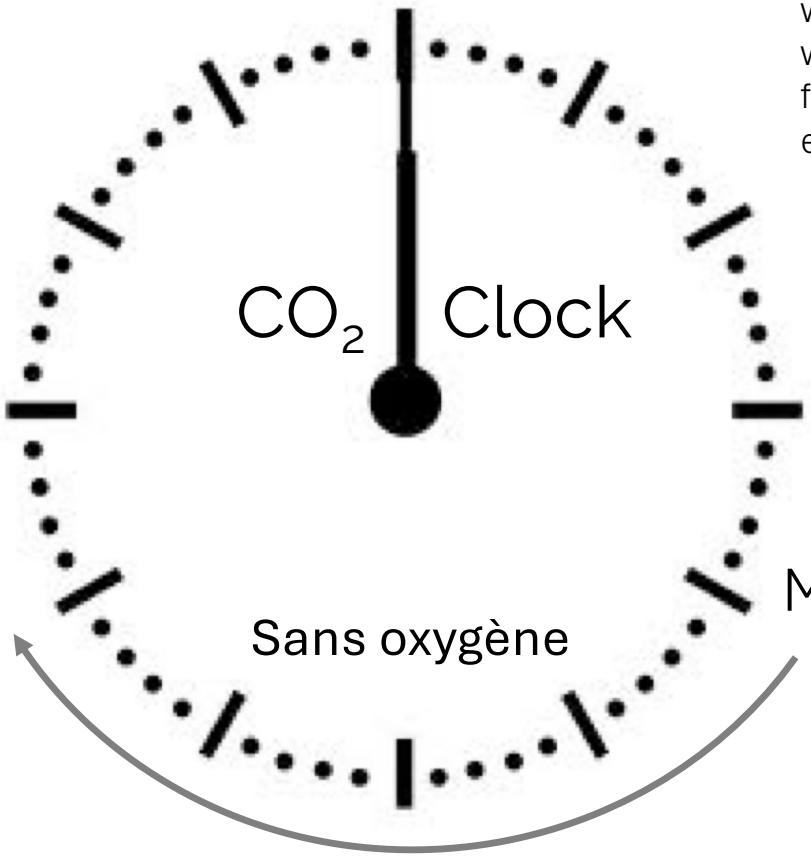
6% en masse

Plasmolyse du méthane : stockage à 4 électrons

Pyrolyse de la biomasse
Charbonnière
Charbon de bois

A350 XWB: 53% composite materials by weight, an entire carbon-fiber fuselage and wing skins bonded to aluminium-lithium frames, alongside composite tail planes and engine pylons.





Carbone solide

Miralon

$CH_4 \rightarrow C + 2\ H_2$

Réaction de Sabatier 1897
$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$
E-méthane

Global hydrogen and derivatives supply by production route

(MtH_2eq/yr)

Clean hydrogen accounting for most net additions.

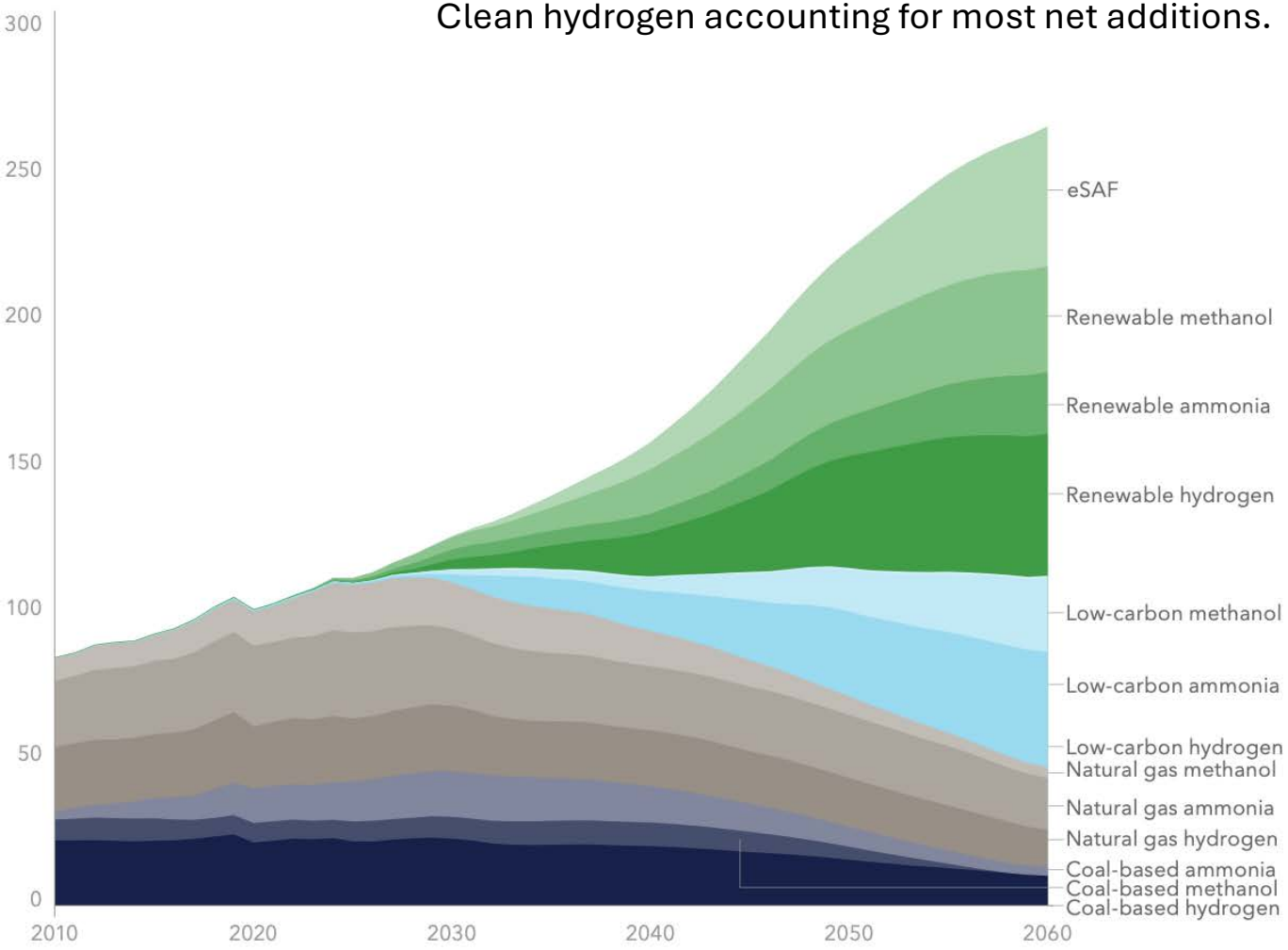
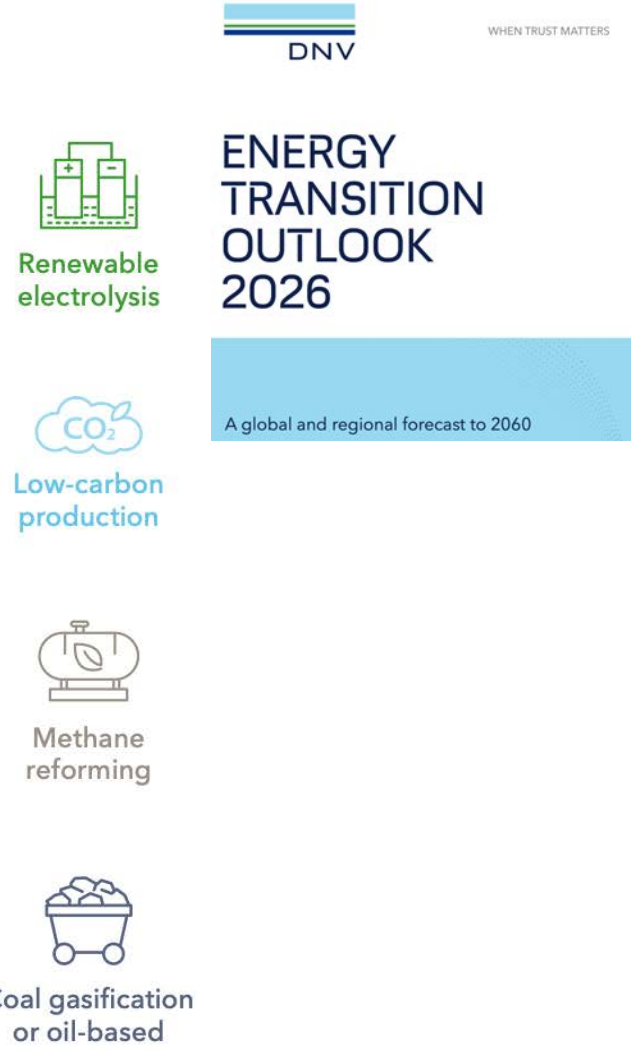
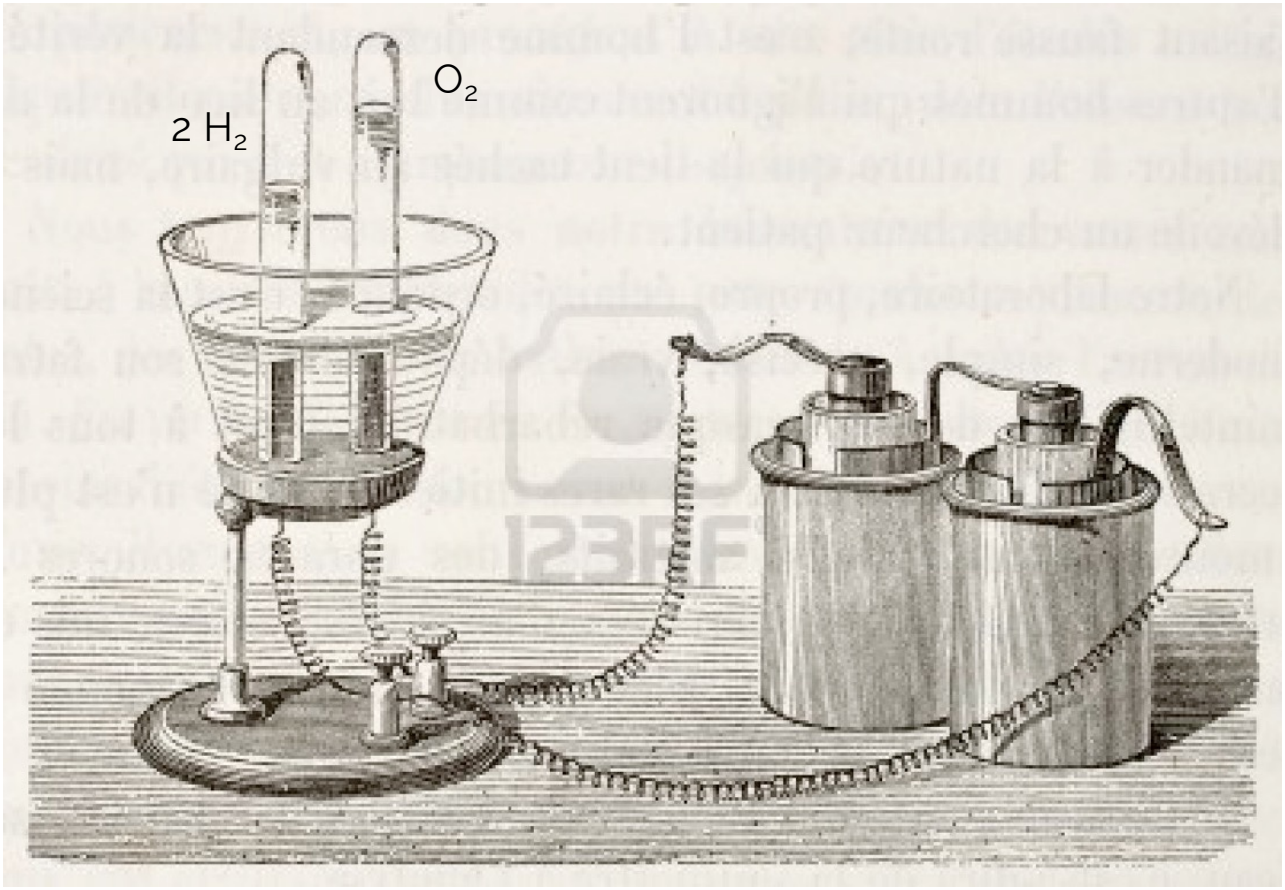


FIGURE 6.4 | Historical data source: IEA (2026). Low-carbon production includes coal gasification with CCS.



Electrolyse de l'eau



www.123rf.com

Tension standard de cellule:
$E^{\ominus} = 1.23$ V

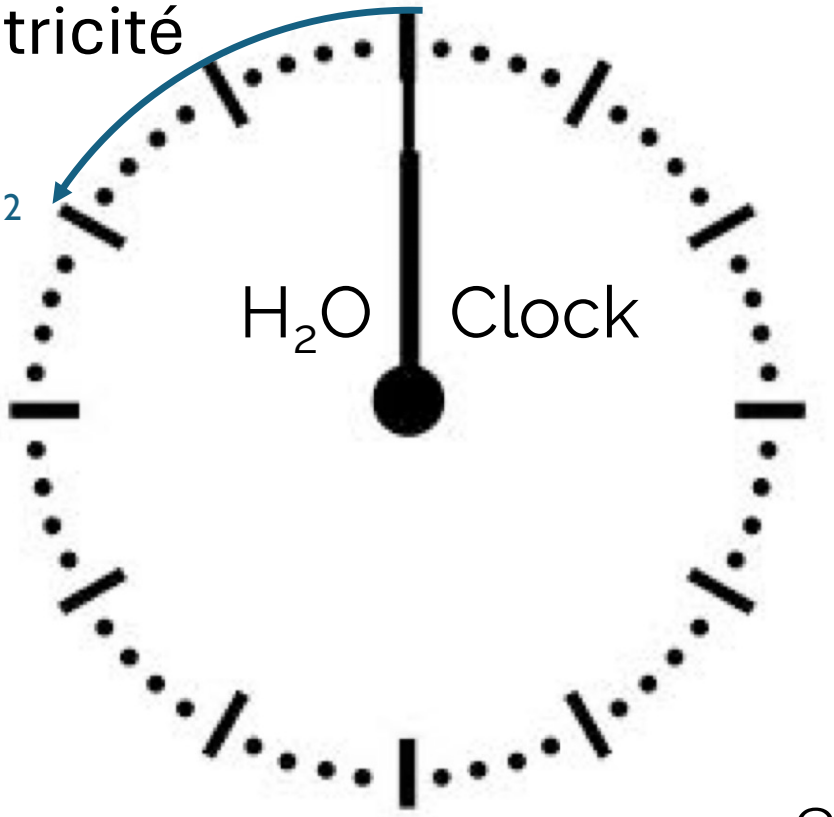
$2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$

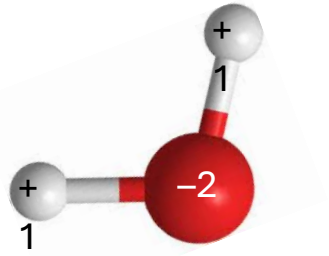
L'Eau, par G. Tissandier, Hachette, Paris, 1873

Electrolyse de l'eau: Stockage de 2 électrons

Electricité

O_2 H_2





Electrolyse
55 %

$$2\,H^+ + 2\,e^- \rightleftharpoons H_2$$

Fuel cell
55%

Génération d'oxygène

Production d'hydrogène en 1899

Schmidt, O. (1899)
Apparat zur Elektrolysevon Wasser. Patent DE 111,131, Jun.13, 1899.

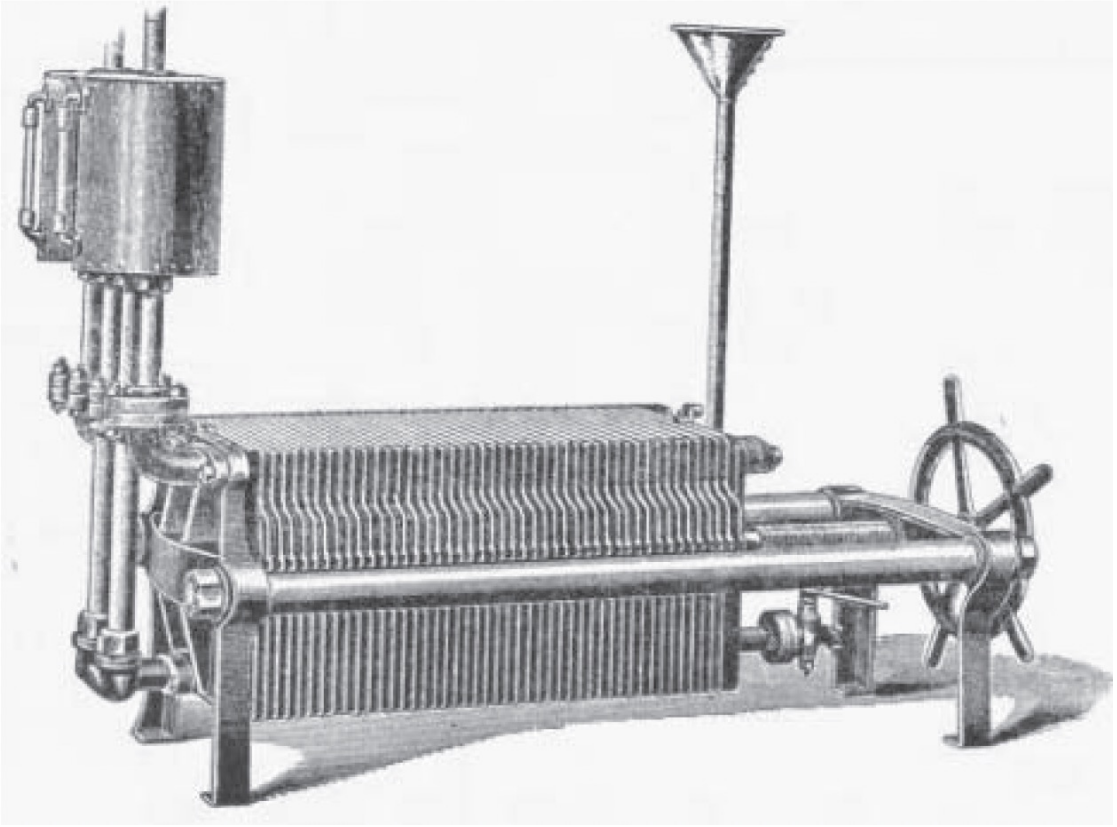
Bipolar filter-press electrolyser with asbestos cloth diaphragm

2.5 V per cell

Current ranging from 15 A to 150 A

Oerlikon, Zurich, Switzerland

Voltage control (no thyristors yet...)
Dynamos



Nicolas Guillet and Pierre Millet in Hydrogen Production: by Electrolysis, First Edition. Edited by Agata Godula-Jopek.
2015Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Published 2015 byWiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

100 ans d'électrolyse alcaline en Valais



Usine électrique de la Lonza, Gampel, 1887, (source: Wyer 2008, p. 19)

UNITED STATES PATENT OFFICE.

RODOLPHE PECHKRANZ, OF CAROUGE-GENEVA, SWITZERLAND.

ELECTROLYZER.

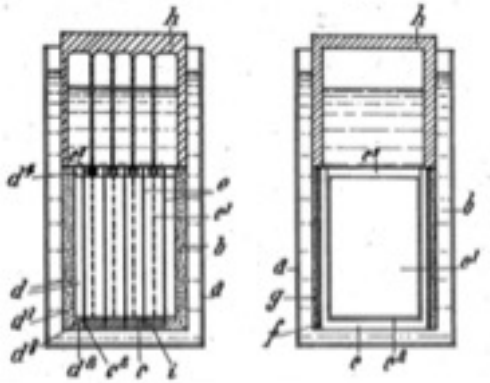
1,415,466. Specification of Letters Patent. Patented May 9, 1922.

Application filed June 1, 1920. Serial No. 385,598.

R. PECHKRANZ.
ELECTROLYZER.
APPLICATION FILED JUNE 1, 1920.

1,415,466. Patented May 9, 1922.

Fig.1 Fig2.





In the twenties, there was still no viable electrolyzer outfit for industrial-scale production of hydrogen. It was only with the discovery and development of water electrolyzers by *Pechkranz*, an engineer at *Lonza's* Valais works, that the way was opened. The electrolyzers at the Ackersand electrolysis plant were fed with di- rect current from appropriately equipped generators at the company's power station. Altogether, Visp and Ackersand produced 5800 m³ hydrogen per hour.

Chimia 51 (1997) 259-269

Alfred Eschler (1819-1882)

Un pionnier Suisse du rail

Credit Suisse



ETHZ -1854

Ecole spéciale de Lausanne -1853

Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne -1890
Ingénieurs civils, mécaniciens et chimistes

1946 –EPUL, 1969-EPFL

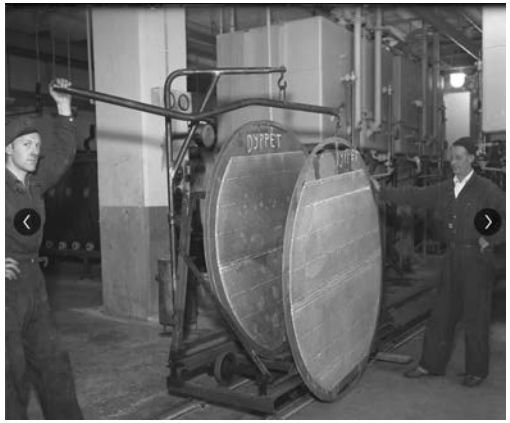
- Le Gamsit était un explosif combinant du nitrate d'ammonium, de la nitroglycérine, du dinitrotoluène et du coton-poudre (collodiumwolle).
- Pour les travaux alpins et le creusement de tunnels, le Gamsit possédait une propriété cruciale : **il ne gelait qu'à partir de -14°C**, ce qui le rendait beaucoup plus sûr et stable à manipuler en haute altitude que la dynamite classique. Tunnel du Simplon

Production d'hydrogène en 1920-30: Norsk Hydro

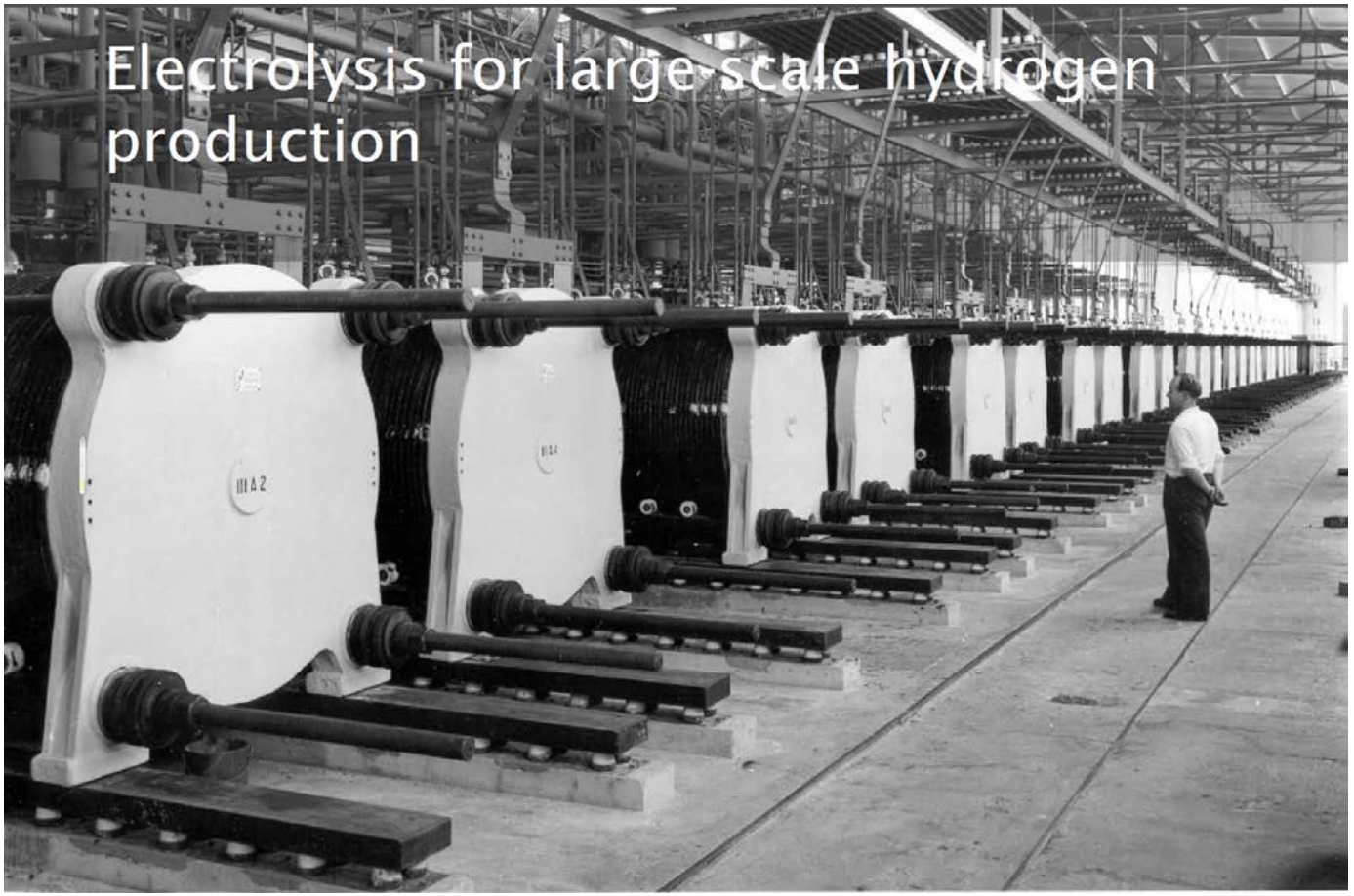
The Vemork power plant, had six floors housing more than 300 Pechkranz electrolyzers. The stacks consisted of 140 cells operated at 2.5 kA with approx. 2.5V/cell (262.5 MW). The plant could produce 43500 Nm^3 of hydrogen in one hour (3.9 tons H_2/h compared to 5.2 today).





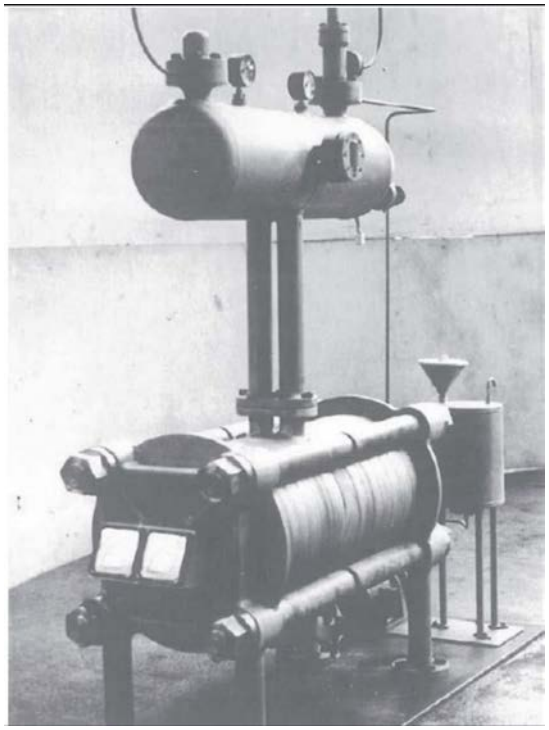


Production d'hydrogène en 1950s



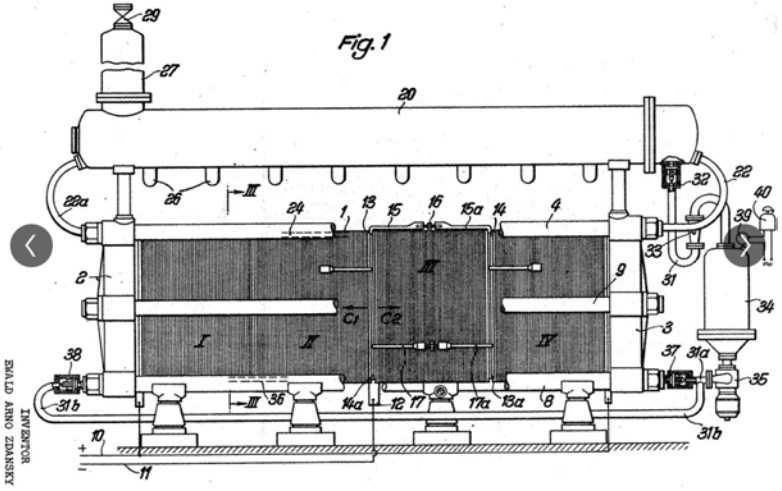
Norsk Hydro, 135 MW, Glomfjord, Norway, 1953

Production d'hydrogène in 1950-1960
Zdansky - Lurgi - Lonza



1948: First bipolar pressurized electrolyzer

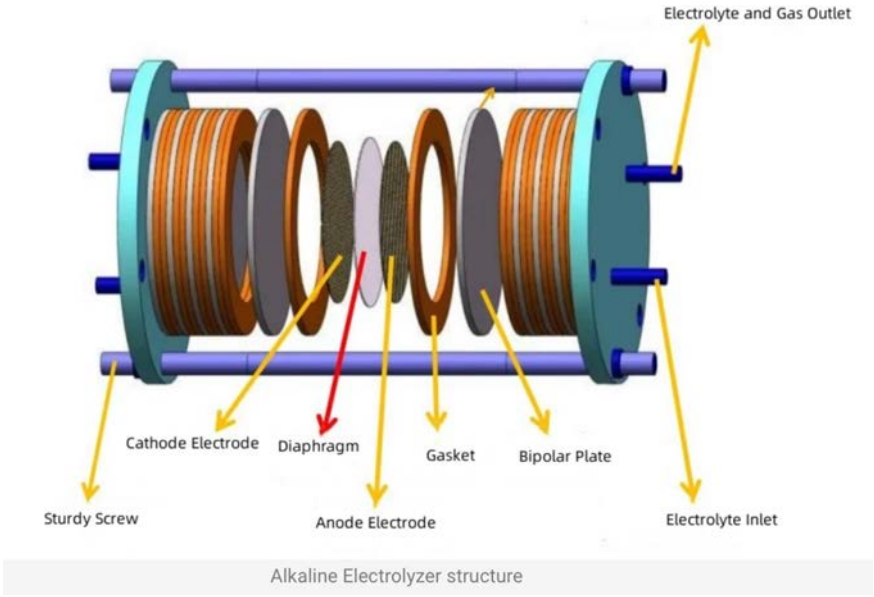




Zimbabwe Electrolyser
165MW - 37000 m^3H_2/h

Hydrogen was linked to hydroelectricity and continuous electricity supply

Les électrolyseurs alcalins en 2026



Alkaline Electrolyzer structure



Incremental progresses

Still mainly bipolar electrodes
Still circular electrodes (mostly..)
Still operating at up to 30 bars and 80°C
Membranes :
- PPS-PSU with inorganic fillers
- Ion solvating membrane (PBI)

Catalysts :
- Nickel based
- PGM

Key drawbacks:
- Bubbles
- Plant corrosion

Key advantages:
- Robust and proven



All in all, a chemical plant...
to operate at steady-state

Entre promesses industrielles et réalité économique

L'industrie des électrolyseurs traverse actuellement une crise systémique marquée par un décalage profond entre les capacités de production d'usine et la demande réelle sur le terrain.

Voici les raisons fondamentales qui expliquent cet échec temporaire de la production en masse d'hydrogène vert par électrolyse :

1. **Une surcapacité industrielle face à une demande quasi-inexistante**

2. **Le coût prohibitif de l'électricité et de l'hydrogène vert**

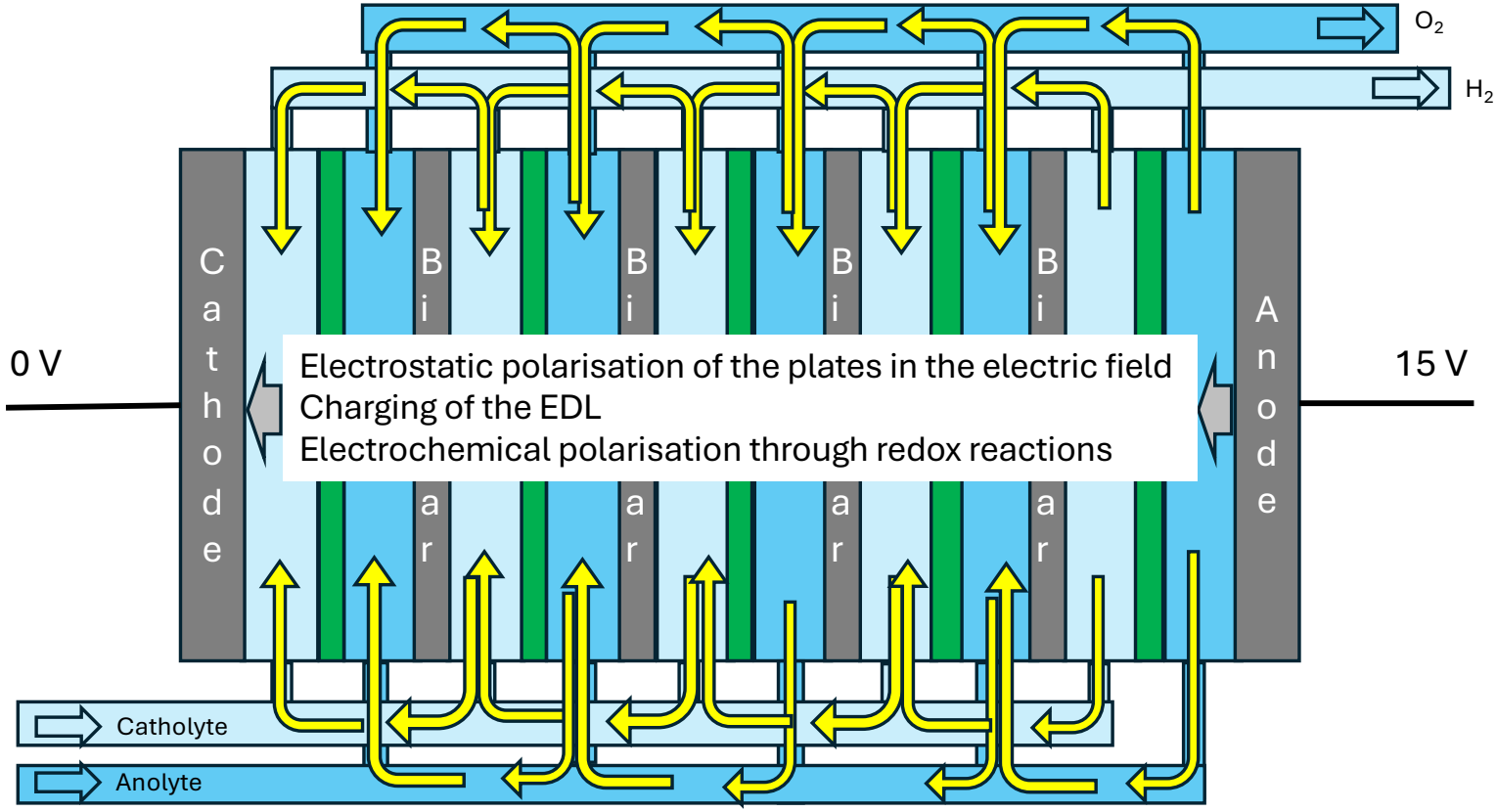
3. **La concurrence asymétrique de la Chine**

4. **Le gouffre technologique de la "produitisation" (La vallée de la mort du labo à l’unité de production)**

5. **L'absence d'infrastructures de transport et de stockage**

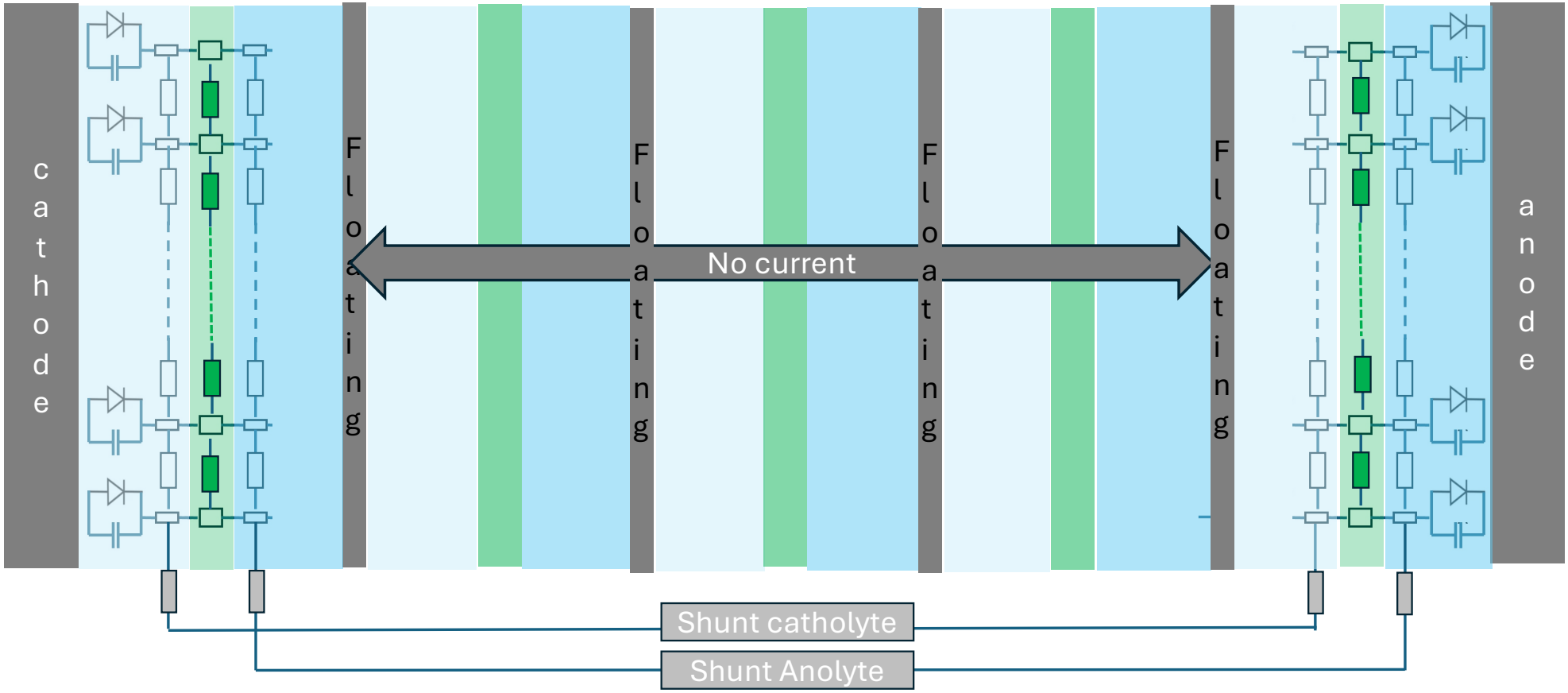
AI Overview

Bipolar stack – Shunt currents



Electrochim. Act., 554 (2026) 148305

Bipolar stack at low loads



Electrochim. Act., 554 (2026) 148305



Dans les électrodes bipolaires empilées, le potentiel des électrodes internes n’est pas contrôlé





Toujours difficile de viser juste. quand on ne contrôle pas…

Conclusion

Développer des nouveaux procédés de production d’hydrogène

Et la Suisse ?

Electromobilis-Martigny : EPFL hydrogen mobility demonstrator

2015-2020

Wind energy - Charrat







Solar energy - Martigny





Started 2015

H_2 O_2

Dual circuit



Redox flow battery
200 kW /400 kWh



H_2 O_2



Electrolyser 50 kW

H_2 gas storage
Delivery
350 & 700 bars

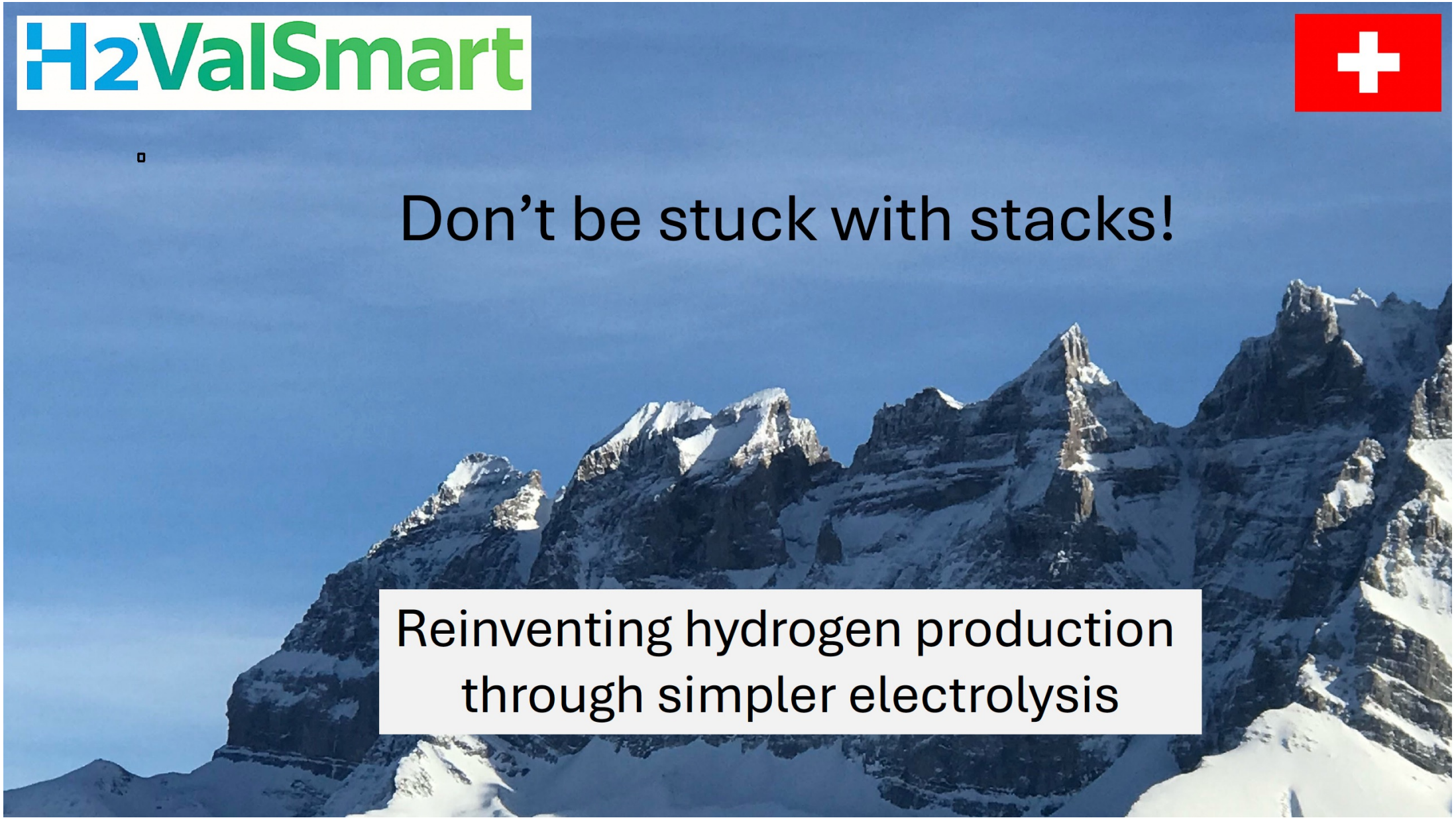
55 kWh = 1 kg hydrogen

Electric car charger
500 V DC Fast charge - 80 kW





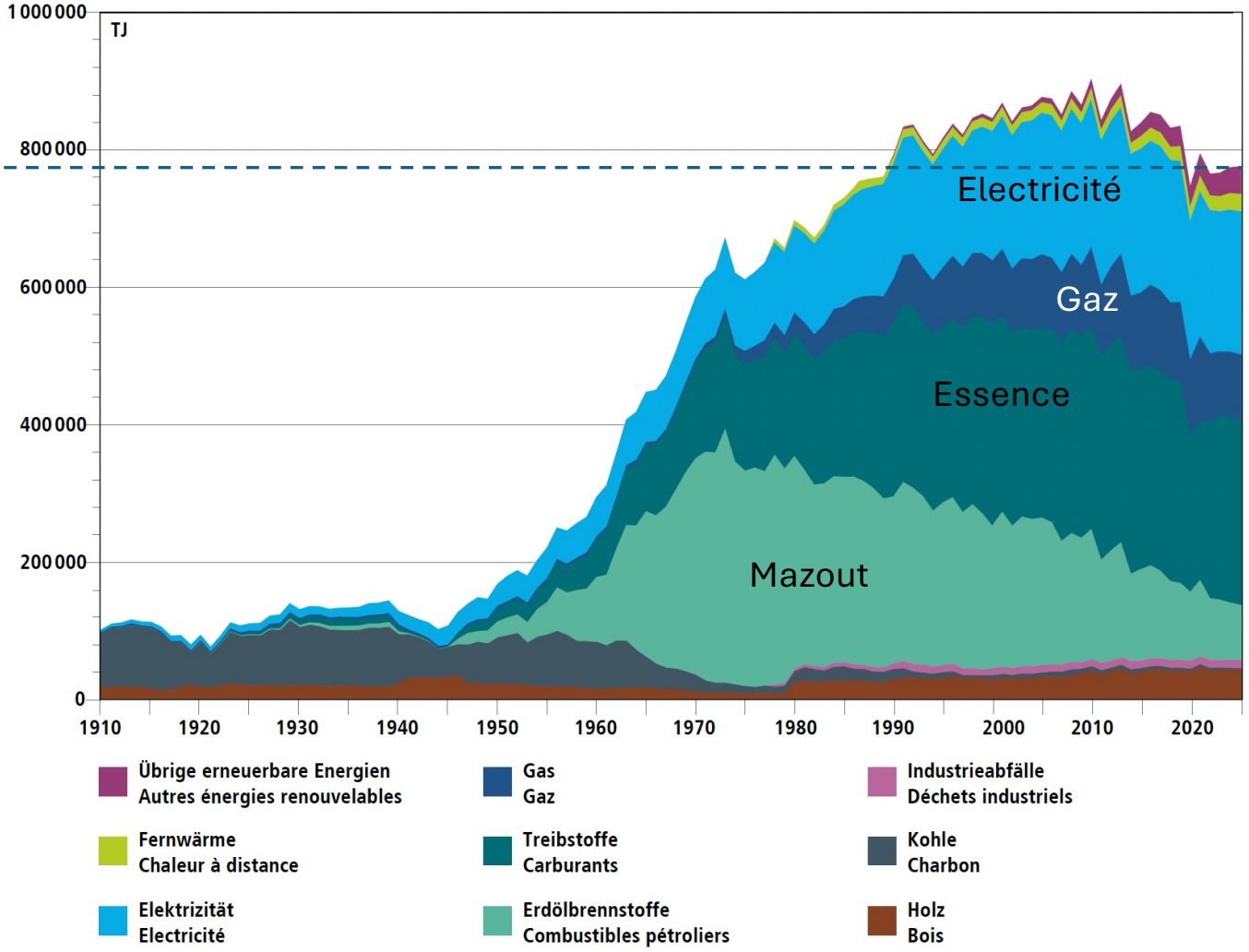
EPFL


H2ValSmart
Don’t be stuck with stacks!
Reinventing hydrogen production
through simpler electrolysis

Consommation Suisse

777’780 TJ
216 TWh

Fig. 1 Endenergieverbrauch 1910–2025 nach Energieträgern
Consommation finale 1910–2025 selon les agents énergétiques



BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2025 (Fig. 1)
OFEN, Statistique globale suisse de l’énergie 2025 (fig. 1)

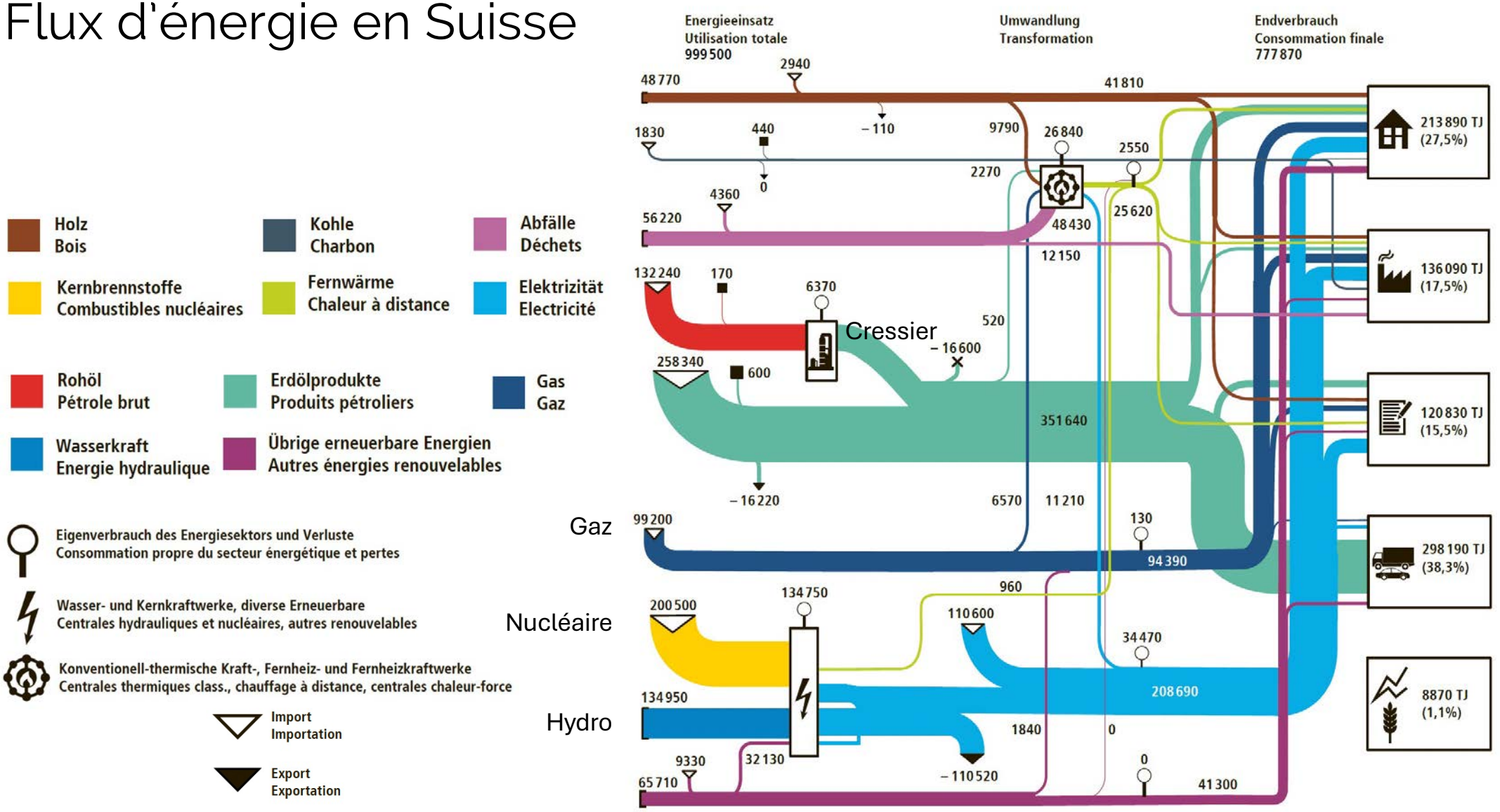
58 TWh
6.61 GW moyenne
25 GW max

Grande Dixence 2 GW

Flux d'énergie en Suisse

Fig. 5 Detailliertes Energieflussdiagramm der Schweiz 2025 (in TJ)
Flux énergétique détaillé de la Suisse en 2025 (en TJ)

BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2025 (Fig. 5)
OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2025 (fig. 5)



Scénarii pour la Suisse

- Distribution sur tout le territoire de petites unités 5-20 MW flexibles pour aider la stabilisation du réseau électrique. Transfert des excédents dans le réseau de gaz naturel* (450 kg H_2/jour/MW).
  Business model : Se faire payer pour produire de l'hydrogène
  165 heures prix négatifs sur le premier semestre 2026 (Avenir Suisse)

- Production locale d'hydrogène pour la mobilité. Voiture 5kg – Camion 50kg

- **Préparer les connexions au circuit de distribution Européen**

- **Développer et exporter de la technologie**

* EU's Decarbonised Gases and Hydrogen Package (including EU Regulation 2024/1789 and EU Directive 2024/1788

From fundamental science to racetrack…



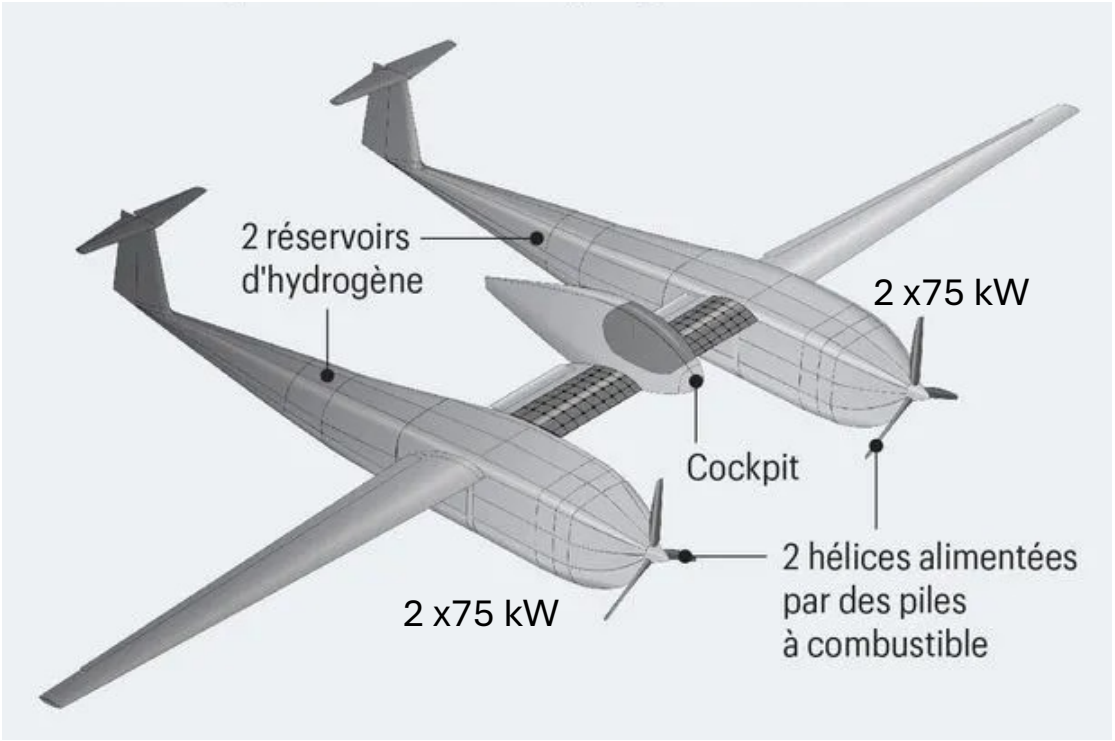
High power at the lowest weight (4 x 60kW at 324 kg)

CLIMATE IMPULSE

Bertrand Picard
Solar Impulse



Développement de fuel cells hypobariques avec
55% de rendement à 4000 mètres



Ou vivra-t-on en 2050?



Ou produira-t-on de l'énergie en 2050?

NASA's Blue Marble Next Generation, a composite of cloud-free satellite images

Wikipedia

Remerciements:















Société Vaudoise des
Sciences Naturelles